

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

VINÍCIUS HENRIQUE FARIAS BRITO

**PROPOSTA DE UMA TOPOLOGIA ALTERNATIVA PARA UM REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO**

UBERLÂNDIA

2020

VINÍCIUS HENRIQUE FARIAS BRITO

**PROPOSTA DE UMA TOPOLOGIA ALTERNATIVA PARA UM REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Uberlândia

2020

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

B862 2020	<p> Brito, Vinícius Henrique Farias, 1994- Proposta de uma topologia alternativa para um regulador eletromagnético de tensão [recurso eletrônico] / Vinícius Henrique Farias Brito. - 2020.</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.2020.612 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

VINÍCIUS HENRIQUE FARIAS BRITO

**PROPOSTA DE UMA TOPOLOGIA ALTERNATIVA PARA UM REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO**

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

Uberlândia, 21 de agosto de 2020

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira - UFU

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende - UFU

Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek - UNIFEI



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 Acadêmico, 746, PPGEELT				
Data:	Vinte e um de agosto de dois mil e vinte	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11822EEL007				
Nome do Discente:	Vinícius Henrique Farias Brito				
Título do Trabalho:	Proposta de uma topologia alternativa para um regulador eletromagnético de tensão				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade e racionalização da energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Desenvolvimento de subestação subterrânea hermética, pressurizada, automatizada e isolada Agência Financiadora: CEB (Companhia Energética de Brasília) através de P&D ANEEL Início 23/11/2018 Término 23/11/2021 No. do Projeto na agência: PD-05160-1803/2018 (Código ANEEL do projeto) Professor Coordenador: Ivan Nunes Santos				

Reuniu-se por meio videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Paulo Henrique Oliveira Rezende - FEELT; Ângelo José Junqueira Rezek - UNIFEI; José Carlos de Oliveira - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Carlos de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), 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(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

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 **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/08/2020, às 15:31, 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 **Angelo José Junqueira Rezek, Usuário Externo**, em 21/08/2020, às 16:54, 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 **JOSE CARLOS DE OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 21/08/2020, às 23:16, 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 **2162743** e o código CRC **8F0B11F1**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Marly e minha irmã Gabriella que são e sempre serão a maior inspiração da minha vida. Em especial ao meu pai Farias, que a cada dia de vida me mostrou o significado de amor. Saudades eternas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço minha companheira de vida e de trabalho, Bárbara Morais Giancesini. Apenas consegui concluir mais essa etapa, pois tive sua presença nos momentos alegres e conturbados. Obrigado por cada momento que passamos juntos nessa caminhada.

À minha mãe Marly Souza Brito Farias e minha irmã Gabriella Farias Brito, que sempre estão presentes nas minhas escolhas, me proporcionando todo apoio necessário, e por compreenderem pelos momentos que estive ausente. Agradeço à toda minha família, sobretudo meus tios Agimiro, Sirlene, Maria de Fátima e Juarez e meus primos Agimiro Neto, Roanna, Lucielly, Gleison e Anielly.

Ao meu orientador, Prof. José Carlos de Oliveira, pela confiança em mim depositada, pelos ensinamentos e incentivos.

Agradeço também aos professores da pós-graduação, Ivan N. Santos, Paulo Henrique O. Rezende, Isaque Gondim, José W. Resende, José Rubens M. Jr, Antônio Carlos Delaiba e Helder de Paula, e amigos de pós-graduação Celso, Giordanni, Camila, Adrian, Abner, Arthur, Márcio, Luís, Leonardo e Fabrício. Em especial, à Raquel e ao Humberto, pela amizade e companheirismo.

Ao meu amigo Mateus S. Quinalia, que se tornou um irmão durante a faculdade e esteve presente em todas as etapas importantes dessa jornada.

Atesto que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e expresso também meus agradecimentos à Companhia Energética de Brasília pelo Projeto de P&D UFU/TCE-CEB (PD-05160-1803/2018) por todo suporte concedido a esta pesquisa.

Por fim, e mais importante, agradeço a Deus, pois apenas ele conhece meus mais profundos sentimentos e sabe me confortar, e agradeço principalmente por colocar tantas pessoas especiais em minha vida.

“No fim, tudo dá certo, se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim.”

Fernando Sabino

RESUMO

Não obstante o reconhecimento de uma extensa gama de dispositivos reguladores de tensão hoje disponíveis, a busca por concepções estruturais constituídas por arranjos fisicamente mais simples, custos competitivos, menores requisitos de manutenção, dentre outros aspectos, ainda se apresenta como foco de pesquisas. Neste sentido, encontra-se uma solução desenvolvida inicialmente por pesquisadores da UFU intitulada por regulador eletromagnético de tensão, no qual se apresenta constituído por um autotransformador que supre, através de tapes discretos, uma unidade série responsável pela regulação da tensão do alimentador em pauta. O presente trabalho tem como foco o equipamento em questão, e se apresenta centrado na otimização da potência das unidades eletromagnéticas do regulador. Para tanto é feita a proposição de uma alteração no arranjo físico concebido para o dispositivo inicial visando, sobretudo, uma redução da potência do dispositivo eletromagnético de acoplamento com o alimentador. Uma vez apresentado o arranjo modificado, é estabelecido o modelo elétrico equivalente do compensador no domínio da frequência e desenvolvidas as equações que representam sua operacionalidade e grandezas, as quais servem como embasamentos para o projeto e construção de unidades físicas deste dispositivo. Quanto a avaliação de desempenho, visando a esclarecer sobre a eficácia do regulador, esta é realizada através de uma modelagem implementada no software MATLAB/Simulink. Através deste recurso computacional, estudos são desenvolvidos com vistas a validar a eficácia na nova concepção diante da manifestação de distintas variações de tensões impostas à rede de suprimento. Também, para um pronto correlacionamento das características elétricas requeridas pelo novo compensador com aquele originalmente proposto, são conduzidas investigações complementares que culminam por esclarecer as vantagens do novo produto. Por fim, uma vez reconhecido que uma das unidades eletromagnéticas se apresenta num modo operativo distinto dos transformadores convencionais, análises envolvendo a técnica de representação por elementos finitos, são realizadas para o transformador de acoplamento ou série. Tais investigações visam à identificação das condições magnéticas impostas ao seu núcleo magnético e servem como balizadores para projetos de futuras unidades de regulação, nos termos aqui desenvolvidos.

Palavras-chave: Regulador de Tensão, Dispositivo Eletromagnético, Modelagem Computacional, Qualidade da Energia Elétrica, Método de Elementos Finitos.

ABSTRACT

Despite the recognition of an extensive range of voltage regulating devices available nowadays, the search for structural concepts composed of arrangements with simple features, competitive costs, lower maintenance requirements, among other aspects, still presents itself as a relevant topic. In this sense, there is a solution initially developed by researchers from the Federal University of Uberlandia that is called electromagnetic voltage regulator. This is composed of an autotransformer that supplies, via discrete tapes, a series unit responsible for regulating the voltage of the feeder where it is connected. In this way, the present work is focused on optimizing the power of the electromagnetic units of the regulator herein described. For this purpose, a change in the design of the original physical arrangement is proposed, which is mainly to reduce the power of the series electromagnetic unit. Once the modified arrangement is presented, the equivalent electrical model of the compensator is established in the frequency domain. In addition, the equations that represent its operation and electrical variables are developed. These equations are the basis for the design and construction of the device units. In order to clarify the effectiveness of the regulator, performance evaluation tests are carried out through modeling implemented in the MATLAB/Simulink software. By using this computational approach, in order to validate the effectiveness of the new design of the regulator, studies are performed by imposing different voltage variations on the supply network. Moreover, further investigations are performed in order to establish a prompt comparison between the electrical characteristics of the new compensator and the original device. The comparison highlights the advantages of the new design. Since one of the electromagnetic units has an operating mode different from conventional transformers, analyses involving finite element modeling for the series transformer are performed. Such investigations aim to identify the magnetic conditions imposed on its core and are the basis for designing future regulating units under the terms herein proposed.

Keywords: Voltage Regulator, Electromagnetic Device, Computational Models, Power Quality, Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Faixas de classificações de tensões para regime permanente	19
Figura 2.1 – Diagrama de conexão de um alimentador elétrico com a presença do RET... 28	
Figura 2.2 – Processo de alternância entre as polaridades das tensões série de compensação	29
Figura 2.3 – Diagrama fasorial ilustrativo do funcionamento do regulador	30
Figura 2.4 – Diagrama de blocos para o controle do compensador	31
Figura 2.5 – Sistemática da busca pelo tape mais adequado à regulação da tensão.....	32
Figura 2.6 – Arranjo físico do regulador contendo as correntes elétricas	33
Figura 2.7 – Arranjo físico do regulador modificado	34
Figura 2.8 – Circuito elétrico equivalente do regulador atuando como elevador de tensão 36	
Figura 2.9 – Diagrama fasorial do regulador ideal atuando como elevador de tensão.....	41
Figura 2.10 – Circuito elétrico equivalente do regulador atuando como redutor de tensão 42	
Figura 3.1 – Grandezas elétricas presentes no regulador	50
Figura 3.2 – Faixa de atuação do regulador.....	51
Figura 3.3 – Limites de regulação do maior tape do transformador de excitação.....	52
Figura 3.4 – Correlação entre os níveis de subtensão e a relação de transformação do transformador de excitação	56
Figura 3.5 – Correlação entre os níveis de sobretensão e a relação de transformação do transformador de excitação	56
Figura 3.6–Modelo computacional do sistema elétrico utilizado para os estudos	62
Figura 3.7 – Modelo computacional do transformador de acoplamento.....	63
Figura 3.8 – Implementação computacional do transformador de excitação	64
Figura 3.9 – Circuito representativo do transformador de excitação	65
Figura 3.10 – Tensão na fonte de suprimento e na carga – valores eficazes por fase.....	67
Figura 3.11 – Tensões nos terminais dos transformadores de acoplamento e de excitação do regulador	69
Figura 3.12 – Correntes nos transformadores do regulador e no alimentador	69
Figura 3.13 – Modelo computacional do sistema elétrico com a topologia original do regulador	71
Figura 3.14 – Tensão na fonte de suprimento e na carga – valores eficazes por fase.....	72
Figura 3.15 – Tensões nos transformadores de acoplamento e de excitação do regulador. 72	

Figura 3.16 – Correntes nos transformadores de acoplamento e de excitação do regulador	73
Figura 4.1 – Exemplo de definição do MEF. (a) problema de geometria complexa, (b) discretização do problema, (c) geometria simples (tetraédrico)	77
Figura 4.2 – Protótipo do transformador de acoplamento ou série utilizado para as simulações.	79
Figura 4.3 – (A) Geometria do núcleo magnético (B) Geometria dos enrolamentos.....	80
Figura 4.4 – Estrutura física do transformador objeto da simulação.....	81
Figura 4.5 – Relação B-H do aço silício M530-50A [34]	82
Figura 4.6 – Curva B-P do material M530-50A [34]	83
Figura 4.7 – Malha de elementos finitos para o transformador.....	84
Figura 4.8 – Circuito representativo da conexão no secundário do transformador - Caso A	86
Figura 4.9 – Perdas no núcleo para o caso A	87
Figura 4.10 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – caso A – instante correspondente ao maior nível de magnetização	88
Figura 4.11 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – caso A	89
Figura 4.12 – Circuito representativo da conexão do primário do transformador - caso B	90
Figura 4.13 – Gráfico das perdas nos enrolamentos para o caso B.....	90
Figura 4.14 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – caso B – instante correspondente ao maior nível de magnetização	91
Figura 4.15 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – caso B	91
Figura 4.16 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – Caso C – instante correspondente ao maior nível de magnetização	92
Figura 4. 17 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – Caso C	93
Figura 4.18 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – caso D – instante correspondente ao maior nível de magnetização	94
Figura 4.19 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – caso D	95
Figura 4.20 – Tensão no primário do transformador.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Equações das tensões do regulador no modo elevador.....	40
Tabela 2.2 – Equações das correntes do regulador no modo elevador.....	40
Tabela 2.3 – Equações das tensões do regulador no modo redutor.....	45
Tabela 2.4 – Equações das correntes do regulador no modo redutor.....	45
Tabela 3.1 – Características do alimentador elétrico e da carga	53
Tabela 3.2 – Parâmetros, relação de transformação e limites de tensão para a faixa adequada para o caso sob análise	54
Tabela 3.3 – Tapes definidos para o transformador de excitação e seus limites de regulação	57
Tabela 3.4 – Tapes e tensões definidos para o transformador de excitação	58
Tabela 3.5 – Valores para as máximas grandezas elétricas de operação dos transformadores de acoplamento e de excitação	60
Tabela 3.6 – Características elétricas operativas requeridas dos transformadores de excitação e de acoplamento.....	61
Tabela 3.7 – Parâmetros de entrada do bloco <i>linear transformer</i>	63
Tabela 3.8 – Parâmetros de entrada do bloco <i>multi-winding transformer</i>	65
Tabela 3.9 – Variações de tensão impostas na fonte	66
Tabela 3.10 – Variação das chaves do regulador	68
Tabela 3.11 – Comparação entre os valores simulados e calculados	70
Tabela 3.12 – Comparação entre as máximas grandezas elétricas para as duas topologias do regulador	73
Tabela 4.1 – Principais Características Elétricas do transformador	79
Tabela 4.2 – Propriedades do cobre inseridos no ANSYS Maxwell.....	81
Tabela 4.3 – Características do cobre dos enrolamentos.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

QEE	Qualidade da Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
OLTC	<i>On-Load Tap Changer</i>
NLTC	<i>No-Load Tap Changer</i>
SVR	<i>Step Voltage Regulator</i>
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
RET	Regulador Eletromagnético de Tensão
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
LVR	<i>Line Voltage Regulator</i>
Chpp	Chave de Polaridade Positiva
Chpn	Chave de polaridade Negativa
Ch0 a Ch4	Chaves dos Tapes do Autotransformador
MEF	Método dos Elementos Finitos
TC	Transformador de Corrente

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{V}_{TH}	Tensão de Thévenin equivalente do alimentador
R_{TH}	Resistência de Thévenin equivalente do alimentador
X_{TH}	Reatância de Thévenin equivalente do alimentador
\dot{I}_F	Corrente fornecida pelo supridor
\dot{V}_{1TA}	Tensão no primário do transformador de acoplamento
\dot{V}_{2TA}	Tensão no secundário do transformador de acoplamento
\dot{I}_{1TA}	Corrente no primário do transformador de acoplamento
\dot{V}_{AT-TE}	Tensão total no transformador de excitação (lado de alta tensão)
\dot{V}_{BT-TE}	Tensão de tape disponibilizada pelo transformador de excitação (lado de baixa tensão)
\dot{I}_{AT-TE}	Corrente total no transformador de excitação (lado de alta tensão)
\dot{I}_{2TE}	Corrente no enrolamento comum do transformador de excitação
\dot{V}_C	Tensão na carga
R_C	Resistência da carga
X_C	Reatância da carga
\dot{I}_C	Corrente da carga
\dot{Z}_{TH}	Impedância complexa de Thévenin equivalente do alimentador
\dot{Z}_C	Impedância complexa da carga elétrica
α_{TA}	Relação de transformação do transformador de acoplamento
α_{TE}	Relação de transformação do transformador de excitação

SUMÁRIO

Capítulo I

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações iniciais	18
1.2	Contextualização dessa dissertação	20
1.3	Contribuições desta dissertação	23
1.4	Estrutura da dissertação	24

Capítulo II

2	CONCEPÇÃO FÍSICA DO REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO.....	26
2.1	Considerações iniciais	26
2.2	Estrutura física do regulador e sua operacionalidade [19], [20].....	26
2.3	Estratégia de controle do regulador [19]	30
2.4	Uma proposta alternativa para a estrutura física do regulador	32
2.5	Modelagem matemática do regulador modificado	35
2.5.1	Regulador modificado atuando como elevador de tensão	35
2.5.2	Regulador atuando como redutor de tensão	42
2.6	Considerações finais	46

Capítulo III

3	ANÁLISE DE DESEMPENHO E COMPARAÇÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS DO REGULADOR	48
3.1	Considerações iniciais	48
3.2	Tensões, correntes e potências requeridas do regulador de tensão modificado	49
3.2.1	Tensões, correntes e potência do regulador	50
3.3	Modelagem computacional.....	61
3.3.1	Modelagem do transformador de acoplamento.....	62
3.3.3	Modelagem do transformador de excitação	64

3.4	Avaliação de desempenho do regulador.....	66
3.5	Avaliação comparativa do desempenho das topologias original e modificada do regulador.....	70
3.6	Considerações finais.....	74

Capítulo IV

4	ANÁLISE MAGNÉTICA DO TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO.....	75
4.1	Considerações iniciais.....	75
4.2	Características do simulador ANSYS®.....	76
4.3	Modelagem do transformador de acoplamento no software ANSYS.....	78
4.4	Estudos de casos.....	85
4.4.1	Caso A – Transformador operando com tensão imposta no primário e secundário aberto.....	85
4.4.2	Caso B – Transformador operando com corrente imposta no secundário e primário em curto-circuito.....	89
4.4.3	Caso C – Transformador operando com tensão imposta no enrolamento primário e corrente imposta no secundário.....	92
4.4.4	Caso D – Transformador operando com corrente imposta no enrolamento secundário e primário em aberto.....	93
4.5	Considerações finais.....	96

Capítulo V

5	CONCLUSÕES.....	98
----------	------------------------	-----------

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
--	------------

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O atendimento aos requisitos impostos para os indicadores relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) se apresenta como condição essencial ao cumprimento da legislação que rege o relacionamento comercial entre fornecedores e consumidores. De fato, diversas normativas atuam no sentido de preconizar os padrões considerados adequados para as tensões de suprimento, e, caso os limites sejam violados, medidas diversas podem ser tomadas por parte do agente regulador, até mesmo na forma de penalizações financeiras para a concessionária de energia. Isto se deve, sobretudo, a necessidade de oferecer um suprimento elétrico dentro de padrões adequados para a operação de equipamentos e cargas que perfazem as unidades consumidoras.

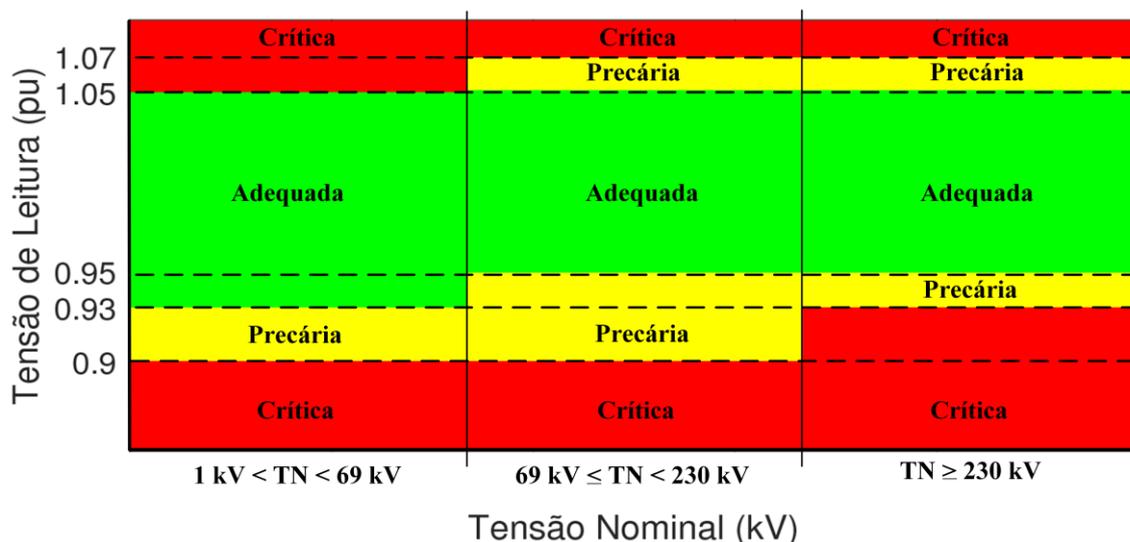
Visando à regulamentação da matéria, distintos documentos normativos nacionais e internacionais estabelecem as diretrizes que norteiam, dentre outros, os padrões mínimos de qualidade da energia junto aos pontos de conexão entre os fornecedores e consumidores. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através do módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [1], é responsável por classificar os fenômenos em pauta, estabelecer definições, formas de cálculo e limites associados aos desvios dos padrões mínimos exigidos. Em particular, o indicador relacionado com a magnitude da tensão em regime permanente possui uma importância significativa, uma vez que esse distúrbio se enquadra como um desafio que as distribuidoras de energia encaram constantemente [2]. Devido à relevante preocupação em manter os níveis de tensão no sistema elétrico em valores adequados, as concessionárias de energia têm aumentado os esforços no sentido de monitorar a tensão em regime permanente nos barramentos do sistema elétrico. Dessa forma, uma pesquisa realizada em 43 países mostra que a regulação de tensão apresenta-se como o fenômeno de QEE de maior interesse e monitoramento por parte das concessionárias de distribuição e de transmissão [3].

Vale aqui destacar que o Brasil conta com duas agências que têm, dentre outras funções, a tarefa da regulamentação dos padrões de qualidade dos fornecimentos elétricos. Uma, já mencionada,

refere-se à ANEEL, a outra entidade é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A primeira tem sob sua jurisdição as redes de distribuição com um nível de até 138 kV, enquanto que a segunda tem por foco o sistema elétrico denominado por rede básica nacional, via de regra acima dos 230 kV. Feitos tais esclarecimentos, fica aqui destacado que os desenvolvimentos realizados no âmbito dessa dissertação, de um modo geral, estão direcionados para os sistemas de distribuição, ressaltando-se, todavia, que os princípios que regem a matéria em foco são aplicáveis a quaisquer níveis de tensão.

A norma nacional para sistemas de distribuição (PRODIST), no que se refere à tensão em regime permanente, estabelece os limites considerados adequados, precários e críticos para cada nível de tensão. A classificação das faixas de tensão está apresentada na Figura 1.1, onde nota-se que os valores limites variam segundo o nível de tensão. Ademais, esse documento também determina os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e de registro e os prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os valores preconizados [1]. Uma observação meritória de destaque é que tal documento, no que se refere aos níveis de tensão, contemplam as clássicas variações de longa duração (tempos superiores a 3 minutos) e também, na sua última versão, inicia as tratativas dos fenômenos de curta-duração (com duração inferior ao limite anterior). Muito embora tal destaque, é relevante aqui observar que, para a maioria absoluta das tratativas a serem feitas nessa dissertação, apenas os primeiros fenômenos se apresentam como cerne dos estudos.

Figura 1.1 – Faixas de classificações de tensões para regime permanente



Fonte: [4].

Do exposto segue que a regulação de tensão no sistema elétrico é um tema que oferece contínuos desafios para a engenharia elétrica. A junção de fatores como: extensão das linhas de

transmissão e de distribuição, dinamicidade do consumo dos centros de carga, padrões de desempenho requeridos, exigências dos consumidores a nível da rede básica e distribuição, dentre outros, determinam a necessidade de medidas mitigatórias [5] para manutenção da magnitude de tensão conforme previsto pela norma vigente. Particularmente, no que se refere aos sistemas de distribuição, a variação de tensão de longa duração é um fenômeno amplamente presente em alimentadores rurais extensos, haja vista a elevada impedância de linha nesses sistemas [6].

Além dos fatores supramencionados, o elevado aumento da geração distribuída também afeta diretamente a regulação de tensão nos barramentos do sistema elétrico. Diante desse novo cenário, diversos estudos detalham o impacto da conexão de fontes renováveis em sistemas de distribuição. Dentre os efeitos causados, um deles está correlacionado com o fato que sistemas de geração distribuída podem apresentar significativas sobretensões nas redes de conexão [7].

Assim, muito embora o reconhecimento que as técnicas para o controle dos níveis de tensão se apresentem como temáticas envolvendo discussões, efeitos, soluções, etc., já tenham sido muito exploradas, o fato é que, a dinâmica da natureza dos sistemas elétricos determinam uma constante evolução dos desafios quanto à manutenção das tensões dentro dos limites preconizados [6]. É, pois, dentro deste cenário que se situa a presente dissertação, como descrito na sequência.

1.2 Contextualização dessa dissertação

Uma vez constatada a violação na magnitude da tensão no sistema elétrico, várias ações podem ser consideradas como possibilidades ao enquadramento aos padrões requeridos, a exemplo da construção de novas subestações e alimentadores, repotencialização de componentes e aumento da seção transversal dos condutores, emprego de equipamentos mitigadores, entre outros [8].

Focando, de forma pontual, nas técnicas voltadas para o enquadramento da tensão através de dispositivos reguladores, reconhece-se, na atualidade, que as filosofias operacionais desses equipamentos se encontram alicerçadas em dois princípios básicos. Um primeiro compreendendo a ação de regulação através de meios indiretos, como é o caso do controle da tensão via dispositivos estáticos ou dinâmicos associados com fluxos controlados de potências reativas. Um outro, que exerce sua função agindo diretamente nas tensões através de dispositivos que alteram seus valores via comutadores de tapes ou injeções diretas de tensões de compensação.

No contexto dos dispositivos à base do controle das potências reativas sobressai, na sua forma mais elementar, os bancos de capacitores e/ou reatores, fixos ou automáticos [9]. Outra possibilidade, largamente utilizada no passado e utilizada por grandes sistemas de potência está no

uso dos compensadores síncronos [10]. Ainda no cenário dos recursos à base do controle da potência reativa, com o advento e evolução das tecnologias dos chaveamentos eletrônicos, surgiram outros produtos comerciais que fazem uso da conhecida tecnologia FACTS [11]. Neste grupo encontram-se os denominados *Static Var Compensators* (SVCs) [12] [13] e *Static Synchronous Compensators* (STATCOMs) [14].

No que tange à tecnologia da regulação com atuação direta sobre os níveis da tensão, destacam-se os tradicionais transformadores com comutação de tapes com carga (OLTCs) e sem carga (NLTCs) [15], e demais reguladores eletromagnéticos baseados em mudanças de tapes para adequação das grandezas elétricas, como o *Step Voltage Regulator* (SVR) [16]. Também, outros dispositivos que utilizam chaveamentos eletrônicos, se fazem hoje disponíveis no mercado. Este é, por exemplo, o caso do *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) [17] [18].

Muito embora a extensa gama de equipamentos utilizados para o propósito da regulação de tensão, conforme acima, deve-se destacar que os dispositivos que utilizam os meios diretos para mitigação das variações de tensão de longa duração apresentam uma melhor performance quando se trata de sistemas de distribuição. Via de regra, para esse cenário, as impedâncias série da linha apresentam uma característica particular, com valores de resistência de mesma grandeza ou superiores à reatância, além do mais, verifica-se baixos níveis de curto circuito, sobretudo considerando alimentadores de grande extensão. Como consequência destas particularidades, a compensação da potência reativa mostra-se pouco eficaz quando comparada aos dispositivos embasados no método direto [6].

Dentre os equipamentos que atuam diretamente no controle da tensão, os reguladores que utilizam dispositivos eletromagnéticos são classicamente aqueles mais utilizados. Isso se deve a um bom equilíbrio entre os fatores técnicos e econômicos. De fato, estes equipamentos, mesmo apresentando tempos de resposta superiores àqueles baseados em chaveamentos eletrônicos, apresentam resultados adequados em relação à regulação da tensão em regime de longa duração ou permanente. Portanto, a utilização dessas soluções mais sofisticadas deve ser considerada como opções importantes, quando, dentre outras características, as questões tratadas evoluem para as denominadas variações de tensão de curta duração.

Ainda no contexto dos dispositivos reguladores à base da atuação direta sobre os níveis de tensão, encontra-se o equipamento focado nessa dissertação, o qual compreende uma concepção alternativa de um compensador proposto por [19], inicialmente concebido no âmbito da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Nesse trabalho foi proposto um equipamento denominado por regulador eletromagnético de tensão (RET), cuja composição física se apresenta na forma de um autotransformador em paralelo com a rede, cujos tapes suprem um transformador, conectado em série

com o alimentador, o qual é responsável pela injeção de uma tensão controlada de reforço, positiva ou negativa, visando à compensação requerida. Assim, sua estrutura construtiva está alicerçada em dois dispositivos eletromagnéticos e uma estratégia de controle que oferece propriedades atrativas quando comparada com os demais equipamentos comumente utilizados para esse fim.

Sintetizando, o produto desenvolvido em [19] e, que se apresenta como centro dos trabalhos investigativos dessa dissertação, possui as seguintes características construtivas e propriedades operativas [20]:

- Fundamentação operacional baseada em componentes eletromagnéticos, sem a obrigatoriedade de utilização de dispositivos complementares (fontes e chaves) eletrônicos;
- Estratégia de controle simples e efetiva;
- Equipamento factível de aplicação monofásica ou trifásica;
- Potências envolvidas no processo de compensação em proporções inferiores à da carga suprida;
- Dispositivos de chaveamento mecânico em níveis de tensão inferiores à nominal ou de operação;
- Processo de compensação de tensões sem interrupções da corrente da carga;
- Tempo de resposta adequado à regulação de variações de tensão de longa duração;
- Robustez às exposições ao tempo impostas pelos locais de instalação;
- Baixos requisitos de manutenção;
- Experiências consolidadas no país para o processo de fabricação do produto.
- Maior confiabilidade operacional, com possibilidade de desconexão do autotransformador conectado em paralelo, assim como das chaves de comutação sem o desligamento da rede, em caso de uma eventual manutenção.

Em atenção ao produto acima, sua primeira abordagem, como já mencionado, foi feita em [19]. Essa referência contemplou sua concepção física e operacional, estudos computacionais através do simulador ATP e diversas análises de desempenho. Este trabalho também culminou com um protótipo do regulador em escala reduzida, possibilitando a realização de testes de desempenho do dispositivo em ambiente laboratorial e ratificando sua eficácia de forma experimental. Avançando, foi feita uma modelagem analítica em [20], que resultou num modelo matemático no domínio da frequência para o regulador, a qual foi validada através de experimentos conduzidos através do já citado protótipo. Ainda, outros trabalhos contribuíram para o aprimoramento e validação do regulador ora tratado, como em [21], [22], [23], [24] e [25].

Em anos posteriores ao início dos trabalhos conduzidos no âmbito da UFU, outros grupos realizaram atividades associadas com reguladores cujas topologias se mostraram similares, a exemplo de [6] e [26]. De fato, estas referências indicaram arranjos físicos semelhantes e materializados em produtos comerciais que confirmam a factibilidade física, operacional e comercial do regulador. Assim, em total similaridade com o denominado RET, [27] descreve um arranjo de compensador instalado em um alimentador rural de média tensão com elevada presença de geração distribuída. O equipamento comercial foi denominado *Line Voltage Regulator* (LVR) e os resultados em campo ratificam a eficácia do regulador quanto à melhoria nas magnitudes das tensões para a instalação elétrica empregada. Além da efetividade operacional, ficou ainda destacado que o regulador se apresentou com uma relação custo-benefício superior às demais opções para regulação de tensão, aumentando significativamente a capacidade de conexão de geração distribuída. Ainda dentro da mesma filosofia construtiva e operacional, em [28] explorou e comprovou a eficácia do dispositivo para distintos níveis de tensão.

Embora o expressivo número de pesquisas alinhadas com o assunto abordado, fica evidenciado, portanto, que o tema ainda tem motivado estudos objetivando novas concepções de reguladores e também melhorias nos equipamentos existentes. Nesse contexto, encontra-se a motivação da pesquisa proposta nessa dissertação.

1.3 Contribuições desta dissertação

Tendo, pois, por base o regulador eletromagnético inicialmente proposto em [19], essa dissertação se apresenta centrada numa proposta de modificação na estrutura física do regulador visando uma diminuição da corrente em suas unidades de transformação, sem prejuízo para a sua ação quanto ao controle da tensão, impactando, assim, na redução da potência nominal do regulador.

Uma vez estabelecida a nova proposição, o trabalho avança no sentido do desenvolvimento de uma modelagem matemática do processo de operação do regulador. Empregando-se as técnicas de representação no domínio da frequência, são estabelecidas as equações que correlacionam as grandezas elétricas associadas com a operação do equipamento e os parâmetros da rede elétrica de conexão.

No campo da modelagem e estudos de desempenho, o compensador ora tratado é inserido no simulador MATLAB/Simulink e, através de distintas variações de tensão impostas à rede de suprimento, são então investigadas suas propriedades quanto a eficácia do processo da regulação da tensão, nos termos requeridos por esta pesquisa.

Ainda, com vistas a uma análise comparativa entre o desempenho da nova proposta para o regulador, e aquela originalmente estabelecida, estudos complementares são feitos para fins de uma análise comparativa das grandezas de desempenho e, desta forma, evidenciar as vantagens da nova concepção.

Ademais, tendo em vista que as condições operativas presentes no denominado transformador série ou de acoplamento se apresentam com características peculiares, visto que em um de seus enrolamentos tem-se uma tensão imposta e no outro uma corrente imposta, isso motivou uma análise das condições magnéticas aplicáveis ao componente objetivando, sobretudo, orientar o processo fabril desta unidade.

Em consonância com o exposto segue que essa dissertação possui como principais contribuições:

- Proposta e modelagem matemática de um arranjo físico modificado para o RET;
- Implementação computacional do regulador modificado e realização de estudos computacionais de desempenho visando à análise de sua eficácia no processo da regulação da tensão, e ainda, visando a correlacionar as grandezas elétricas (tensões, correntes e potências) do novo produto com sua versão original;
- Modelagem do transformador série num software de elementos finitos para a identificação das condições operativas sob o ponto de vista eletromagnético visando consubstanciar o projeto e construção desta unidade.

1.4 Estrutura da dissertação

Além do capítulo introdutório, o presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

Capítulo II – Concepção Física do Regulador Eletromagnético de Tensão

Essa unidade apresenta o princípio de funcionamento do regulador, seu arranjo físico e unidade de controle. Uma nova topologia quanto ao arranjo físico é proposta. Por fim, são apresentados os equacionamentos que regem o processo de regulação sob a ação do novo dispositivo.

Capítulo III – Análise de Desempenho e Comparação entre as Topologias do Regulador

Neste capítulo é feita a implementação computacional do modelo do regulador proposto no software MATLAB/Simulink e realizados estudos de desempenho visando a destacar suas propriedades operativas e também sua

correlação com a versão original do dispositivo. Somado aos estudos operacionais, são também estabelecidas as bases para o dimensionamento dos componentes que perfazem o arranjo proposto.

Capítulo IV – Análise Magnética do Transformador de Acoplamento

Nessa etapa é feita uma análise computacional, através do software de elementos finitos ANSYS visando ao conhecimento das condições magnéticas impostas ao núcleo do transformador série.

Capítulo V – Conclusões

O último capítulo apresenta as considerações finais e conclusões concebidas nos capítulos precedentes, destacando as questões mais relevantes identificadas ao longo da realização dos trabalhos. Ainda, são indicados os trabalhos futuros que o tema necessita.

CAPÍTULO II

2 CONCEPÇÃO FÍSICA DO REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO

2.1 Considerações iniciais

O equipamento focado neste trabalho, como já mencionado, foi proposto inicialmente em [19] e se apresenta constituído por um complexo eletromagnético com as unidades de potência formadas por dois dispositivos. O primeiro corresponde a um transformador de dois enrolamentos com um de seus enrolamentos conectado em série com a carga, e um segundo, associado com um autotransformador conectado a jusante do anterior e destinado a fornecer a tensão de compensação requerida.

Visando, pois, a consubstanciar o texto com a síntese da estrutura física e suas funções no dispositivo regulador, este capítulo apresenta os conceitos introdutórios relacionados ao regulador originalmente concebido, com destaque as suas unidades de potência e manobra, filosofia de operação, lógica de controle e outras propriedades relevantes ao conhecimento do produto em pauta.

Na sequência, é apresentada uma concepção diferenciada do regulador, com destaque a inversão do posicionamento físico entre o autotransformador e o transformador série, objetivando, melhorias quanto a sua eficácia para o processo da manutenção da tensão na carga dentro dos padrões requeridos. Assim procedendo, é feita uma adequação da modelagem matemática do sistema de compensação como um todo, empregando-se, para tanto, a técnica de representação de seu circuito equivalente no domínio da frequência.

2.2 Estrutura física do regulador e sua operacionalidade [19], [20]

A Figura 2.1 mostra, através de um sistema elétrico com características radiais, um exemplo típico de rede constituída pelo ramal alimentador, dispositivo regulador em foco (aqui também identificado pela sigla RET) e a carga objeto da regulação da tensão. Também, através dessa figura,

é possível constatar, de forma ilustrativa, a manifestação de um distúrbio atrelado com uma subtensão do lado do supridor e a lógica do mecanismo de regulação imposta. Como indicado, a magnitude da tensão da fonte de suprimento é significativamente reduzida, originando um fenómeno de subtensão na barra 1 do sistema elétrico. Na ausência de um equipamento para mitigação desse fenómeno, esse distúrbio de subtensão é concomitantemente transferido para os terminais da carga. Contudo, na presença e operação do dispositivo regulador, pode-se verificar que uma tensão de reforço é injetada em série com rede e, como consequência, há uma restauração da tensão no barramento da carga em conformidade com os limites definidos pela norma vigente. Vale, todavia, ressaltar que, muito embora a condição apresentada esteja relacionada com a compensação de subtensões, o regulador também é capaz de atuar quando a tensão da fonte de suprimento é objeto de fenómenos opostos, isto é, sobretensões acima dos limites permitidos. Para tanto, a tensão injetada pelo equipamento é imposta com polaridade negativa à tensão do alimentador.

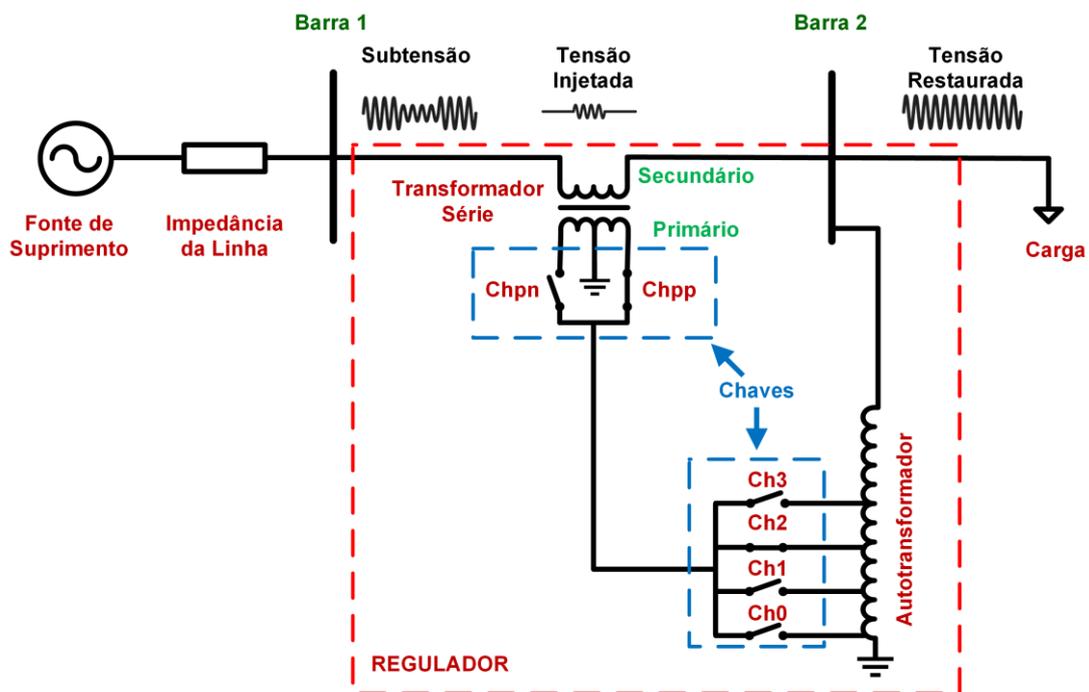
Focando a questão da tensão de compensação série, esta é proporcionada pelo arranjo físico composto pelas duas unidades de transformação, quais sejam: o transformador série e o autotransformador. Estes componentes se apresentam com as seguintes propriedades operativas:

- **Autotransformador (transformador de excitação):** este é conectado diretamente no barramento que a carga está inserida, de modo que sua tensão de alimentação é a própria tensão da carga. Também, este dispositivo possui diversos taps de tensão para suprir o transformador série, sendo que a seleção do mais adequado está diretamente relacionada com a variação de tensão da fonte de suprimento, proporcionando, assim, a restauração da tensão na barra da carga;
- **Transformador Série (transformador de acoplamento):** este se apresenta na forma de um transformador convencional de dois enrolamentos, com um dos seus terminais (interpretado por primário) sendo alimentado por uma tensão imposta pelo tap selecionado do autotransformador. O outro enrolamento (interpretado como secundário) seria responsável pela inserção do reforço positivo ou negativo da tensão de regulação. É importante reconhecer, que esta unidade magnética irá operar com características distintas de um transformador convencional pois, um enrolamento terá uma tensão imposta, e o outro, uma corrente imposta pelo alimentador. Assim sendo, essa propriedade específica pode acarretar em mudanças no comportamento do fluxo magnético no núcleo dessa unidade quando comparado com um transformador convencional. Esse fator afeta diretamente no projeto do regulador. Nessa perspectiva, o protótipo do regulador eletromagnético desenvolvido no âmbito da UFU, conforme apresentado em [21], teve o transformador série sobredimensionado, haja vista que o

valor da indução magnética em seu núcleo não estava estabelecido. Esse fato foi um dos motivadores para o estudo proposto no capítulo 4 dessa dissertação.

O tape central deste segundo transformador viabiliza a inserção de uma tensão de reforço positiva ou negativa

Figura 2.1 – Diagrama de conexão de um alimentador elétrico com a presença do RET



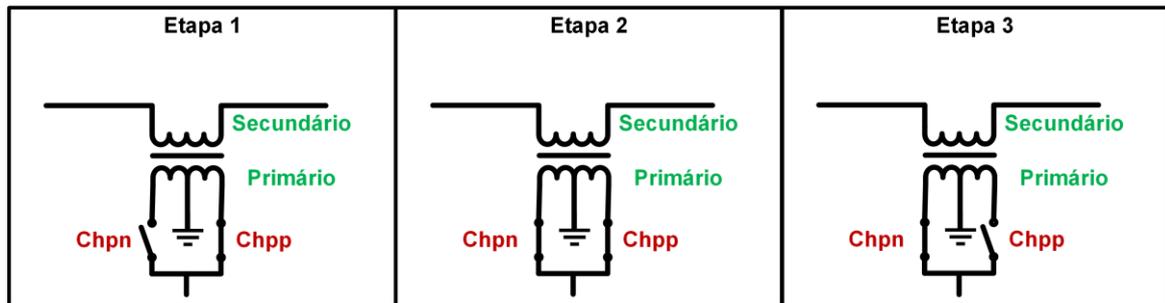
Fonte: Adaptado de [19].

Além das unidades eletromagnéticas já mencionadas, o regulador também possui dispositivos de manobra (chaves). Essas são operadas por uma unidade de controle, cuja função é fundamental para o correto funcionamento do RET. As chaves de polaridade (Chpn e Chpp) estão diretamente relacionadas com o sentido da tensão injetada. A chave de polaridade negativa (Chpn) é utilizada nas situações de sobretensão, disponibilizando uma tensão injetada com polaridade oposta à tensão de suprimento. A chave de polaridade positiva (Chpp) é acionada quando da manifestação de fenômenos de subtensão, proporcionando, assim, uma tensão injetada de mesmo sentido que a tensão da fonte.

Recorrendo novamente à Figura 2.1, o exemplo ilustrado mostra que a chave Chpp está fechada (com a Chpn aberta), conseqüentemente, essa condição operativa evidencia que o regulador está compensando uma queda da tensão advinda do suprimento. Uma questão de suma importância no funcionamento do dispositivo é que as chaves de polaridade, simultaneamente, não podem estar abertas, pois isso implicará em interrupção da corrente e fenômenos transitórios eletromagnéticos podem surgir em elevadas proporções. Para contornar esta limitação, o processo de mudança de

polaridade da tensão, como indica a Figura 2.2, determina que, estando a chave Chpp fechada (etapa 1), uma eventual necessidade de alteração da polaridade da tensão requer que, durante um pequeno espaço de tempo, as duas chaves (etapa 2) estejam fechadas para, na sequência, proceder a abertura daquela de polaridade positiva, e vice-versa.

Figura 2.2 – Processo de alternância entre as polaridades das tensões série de compensação



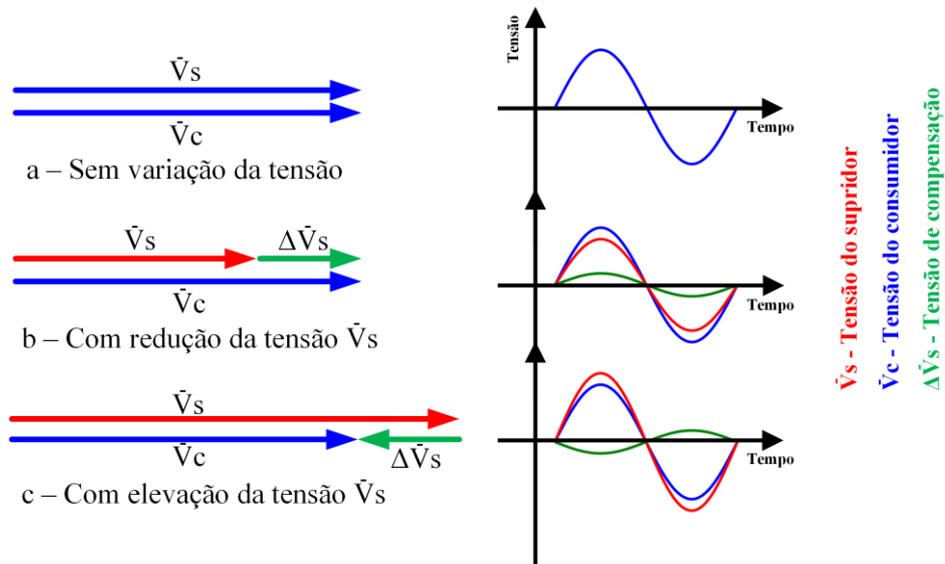
Fonte: O Autor.

No que tange às chaves dos tapes do autotransformador (Ch0 a Ch3), estas estão diretamente relacionadas com a amplitude da tensão requerida para ser injetada no sistema. Ainda utilizando o caso mostrado na Figura 2.1, verifica-se que a chave Ch2 está fechada, ao ponto que as demais estão abertas. Nesse particular, deve-se reconhecer que as transições entre uma e outra chave, caso ocasione uma abertura do circuito, haverá também transitórios eletromagnéticos indesejáveis. Para contornar tal problema, o processo da transferência de um tape para outro deve, necessariamente, ocorrer através de mecanismos clássicos utilizados na tecnologia da regulação de tensão via dispositivos com mudanças de tapes, a exemplo de reatores ou resistores de transição.

Outro recurso importante presente no compensador é a chave Ch0, a qual resulta numa tensão nula aplicada ao transformador série. Portanto, quando esta se encontra operante, não há nenhuma ação do dispositivo regulador sobre a tensão nos terminais da carga.

Resumindo, a Figura 2.3 ilustra o processo da regulação proporcionado pelo dispositivo em pauta para três casos distintos. O caso a indica situações em que a tensão de suprimento está dentro dos limites considerados adequados, assim, a chave Ch0 encontra-se acionada e a tensão injetada é nula. Já para os casos b e c, as chaves Chpp e Chpn se apresentam, ora uma ora outra, conectadas de forma a oferecer tensões de compensação em fase com a tensão do supridor, ou defasada em 180°.

Figura 2.3 – Diagrama fasorial ilustrativo do funcionamento do regulador

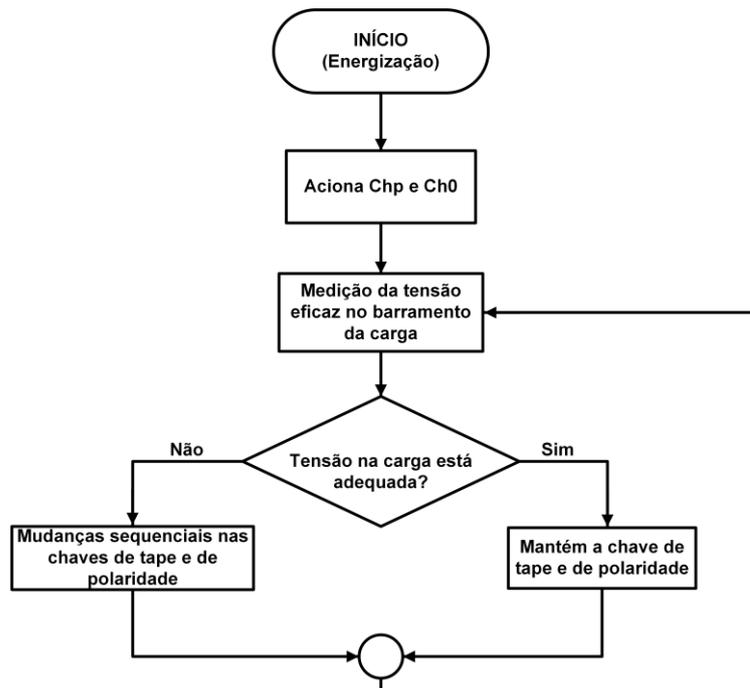


Fonte: Adaptado de [19].

2.3 Estratégia de controle do regulador [19]

A decisão a respeito das conexões das chaves de polaridade e das chaves dos tapes do autotransformador é realizada através de uma lógica de controle detalhadamente apresentada em [19]. O diagrama de blocos da Figura 2.4 ilustra a sistemática estabelecida para o atendimento às condições operativas anteriormente descritas.

Figura 2.4 – Diagrama de blocos para o controle do compensador

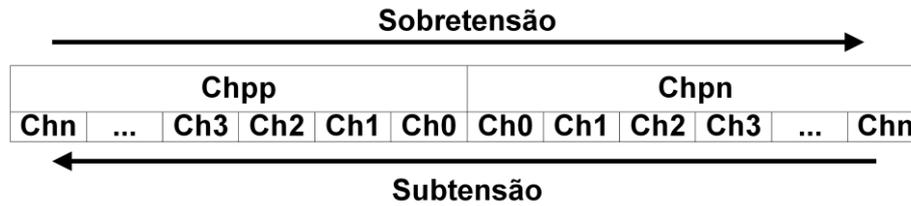


Fonte: O autor.

O fluxograma apresentado indica que o controle do regulador segue as seguintes etapas:

- Inicialmente, com a energização, a chave de terra (Ch0) e a de polaridade positiva (Chpp) são acionadas durante um intervalo de tempo suficiente para estabelecer o regime permanente do sistema elétrico;
- Na sequência, o sistema de controle utiliza a medição da tensão eficaz no barramento da carga e compara com os limites preconizados pelo PRODIST. Caso o valor da tensão ultrapasse os limites estabelecidos, ocorre então uma busca pelo tape mais adequado ao processo da restauração da tensão. Para tanto, são realizadas mudanças sequenciais nas chaves de polaridade e dos tapes, respeitando a ordem indicada na Figura 2.5, indicando um regulador genérico com “n” tapes;
- No momento que a tensão do barramento atinge um valor adequado, a comutação dos tapes é finalizada. O sistema permanece nesse modo de operação até que ocorra uma nova variação no sistema elétrico, em nível suficiente para acionar a busca de uma nova posição para o tape do autotransformador.

Figura 2.5 – Sistemática da busca pelo tape mais adequado à regulação da tensão

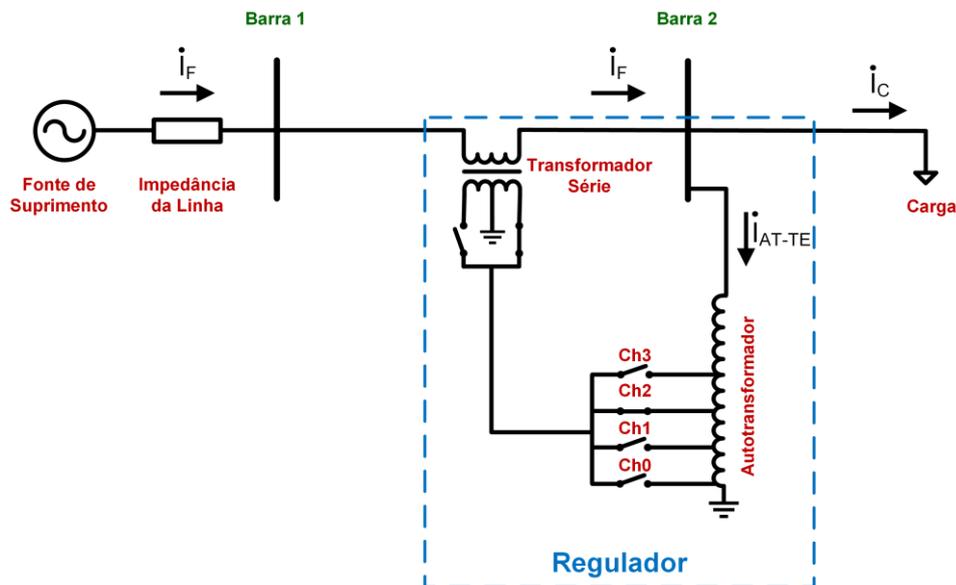


Fonte: O autor.

2.4 Uma proposta alternativa para a estrutura física do regulador

O diagrama da Figura 2.6 ilustra a composição física do regulador proposto originalmente. O diagrama revela que a corrente na fonte de suprimento (\dot{I}_F) é composta por duas parcelas, uma atrelada com a carga (\dot{I}_C) e outra com o transformador de excitação (\dot{I}_{AT-TE}). Como a tensão no barramento da carga é considerada constante, então a corrente da carga (\dot{I}_C) não é alterada mesmo quando da manifestação de variações de tensão na barra 1. Por outro lado, a corrente \dot{I}_F é alvo de modificações em consonância com as variações na tensão da fonte de suprimento. Utilizando uma abordagem numérica para exemplificar o comportamento da operação do sistema de regulação, quando ocorre uma subtensão na fonte de suprimento levando tal grandeza para 0,8 pu, o regulador atua nas chaves dos tapes e de polaridade para que a tensão na carga seja elevada para sua condição nominal (1 pu), mantendo, dessa forma, a potência da carga em seu valor nominal. Para isso, a corrente \dot{I}_F aumenta para um valor de 1,25 pu ($1/0,8$). Ao contrário, quando a fonte de suprimento experimenta uma situação de sobretensão de 1,2 pu, a corrente \dot{I}_F reduz seu valor para 0,83 pu ($1/1,2$). Portanto, em situações de subtensão, a corrente da fonte de suprimento tem um valor superior ao da carga.

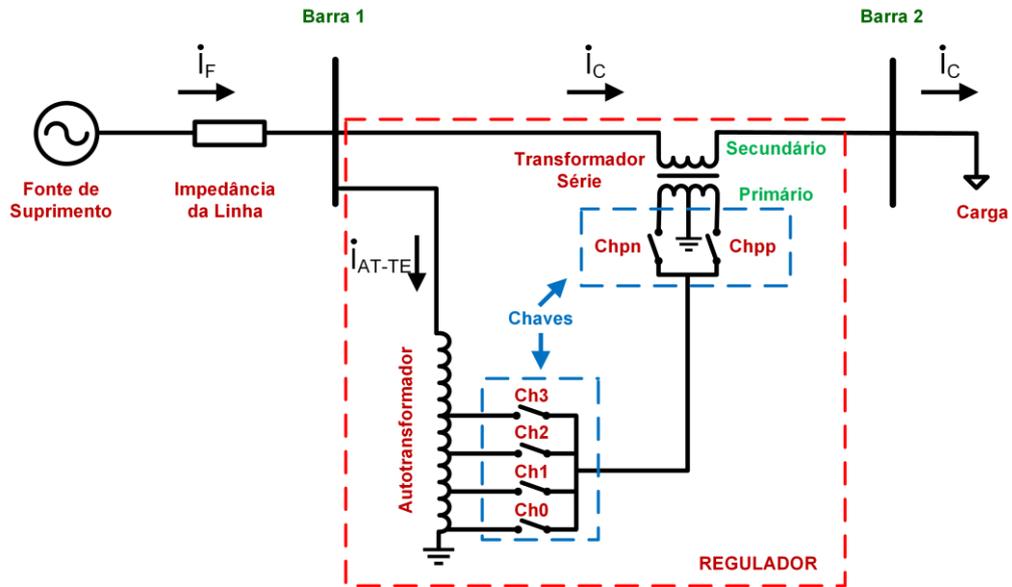
Figura 2.6 – Arranjo físico do regulador contendo as correntes elétricas



Fonte: O Autor.

Analisando o arranjo físico do regulador (Figura 2.6), é notório que o transformador série deve estar dimensionado para suportar a circulação da corrente I_F em seu enrolamento série. Dessa forma, com a finalidade de reduzir a potência do transformador de acoplamento do regulador, surge a concepção física feita nessa dissertação, a qual se apresenta consonante com o indicado na Figura 2.7. Como pode ser observado, para o novo arranjo a corrente que flui no secundário do transformador série é a própria corrente da carga, independente da variação de tensão que a fonte de suprimento experimenta. Este fato conduz a uma redução da potência nominal do transformador de acoplamento, como será comprovado quando dos estudos de desempenho contemplados no capítulo 3.

Figura 2.7 – Arranjo físico do regulador modificado



Fonte: O Autor.

De modo similar ao regulador de tensão original, as principais unidades que compõem o arranjo da Figura 2.7 são:

- **Fonte de Suprimento:** Representada através do circuito equivalente de Thévenin;
- **Autotransformador:** Esta unidade, muitas vezes denominada por transformador de excitação, se apresenta com uma função idêntica a estrutura original, visto que o mesmo tem por objetivo o suprimento do transformador série;
- **Transformador série:** Este componente, por vezes denominado por transformador de acoplamento, também tem a mesma função que aquele do arranjo original. O enrolamento suprido pelos tapes da unidade de excitação é tratada como primário, e a outra, conectada em série com o alimentador, como secundário;
- **Carga:** Esta é representada por um consumo $P + jQ$, sendo tratada neste trabalho por uma impedância equivalente e constante.

Tendo, pois, estabelecida esta nova configuração procede-se, na sequência, o estabelecimento de um modelo matemático aplicável ao arranjo físico, cuja diferença em relação à concepção original está na inversão do ponto de conexão das unidades eletromagnéticas supra identificadas.

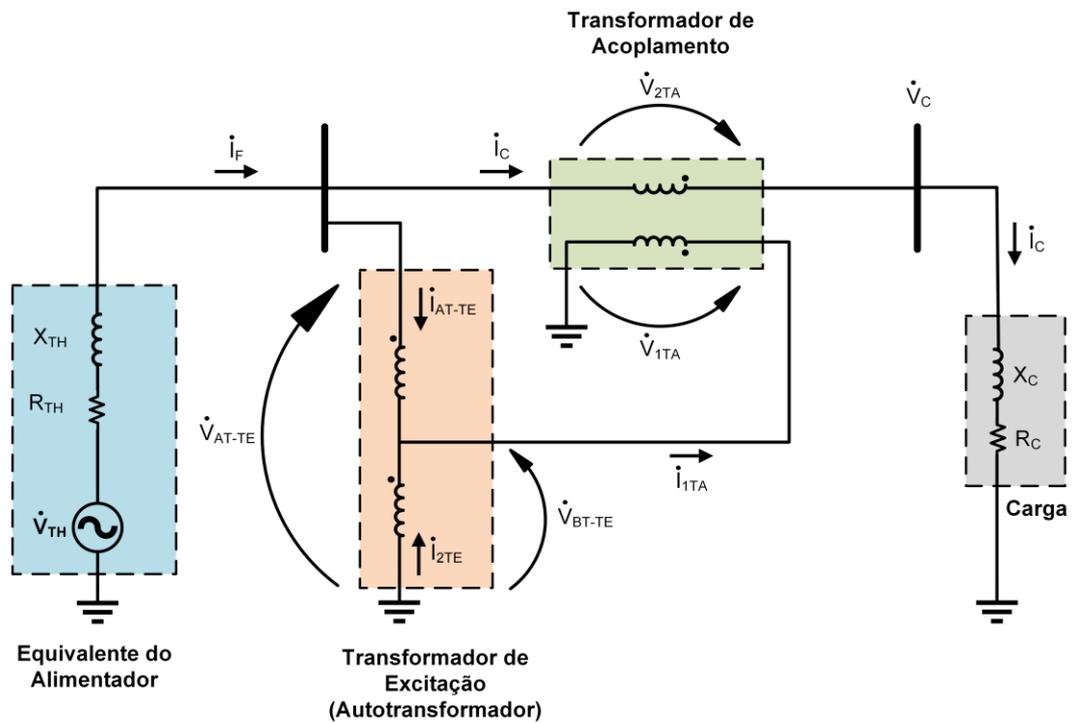
2.5 Modelagem matemática do regulador modificado

O estabelecimento do modelo matemático a seguir encontra-se associado com o funcionamento do regulador sob condições de regime permanente, portanto, as tratativas são feitas com base em representações embasadas na técnica do domínio da frequência. Por questões didáticas, os trabalhos são conduzidos subdividindo os desenvolvimentos diante das duas condições de funcionamento, uma considerando a operação sob condições de subtensões no suprimento e, posteriormente, sob a ação de sobretensões. Isso determina uma alternância entre as chaves de polaridade anteriormente destacadas.

2.5.1 Regulador modificado atuando como elevador de tensão

A atuação do regulador como elevador de tensão é ilustrada através do circuito elétrico mostrado na Figura 2.8. Este mostra o alimentador representado pelo seu equivalente de Thévenin visto a partir dos terminais da carga, como já referido. No que se refere aos transformadores de acoplamento e de excitação, os mesmos encontram-se identificados através das suas tensões induzidas, todavia, devido a pequena influência das reatâncias de dispersão e resistências dos enrolamentos, e tendo como objetivo uma simplificação do equacionamento, estas são desconsideradas. Vale ainda destacar que o circuito equivalente mostrado é aplicável à cada estágio (tape) requerido pelo processo da regulação.

Figura 2.8 – Circuito elétrico equivalente do regulador atuando como elevador de tensão



Fonte: O autor.

Os parâmetros e demais grandezas indicadas na Figura 2.8 são:

- \dot{V}_{TH} Tensão de Thévenin equivalente do alimentador;
- R_{TH} Resistência de Thévenin equivalente do alimentador;
- X_{TH} Reatância de Thévenin equivalente do alimentador;
- \dot{I}_F Corrente fornecida pelo supridor;
- \dot{V}_{1TA} Tensão no primário do transformador de acoplamento;
- \dot{V}_{2TA} Tensão no secundário do transformador de acoplamento;
- \dot{I}_{1TA} Corrente no primário do transformador de acoplamento;
- \dot{V}_{AT-TE} Tensão total no transformador de excitação (lado de alta tensão);
- \dot{V}_{BT-TE} Tensão de tape disponibilizada pelo transformador de excitação (lado de baixa tensão);
- \dot{I}_{AT-TE} Corrente total no transformador de excitação (lado de alta tensão);
- \dot{I}_{2TE} Corrente no enrolamento comum do transformador de excitação;
- \dot{V}_C Tensão na carga;
- R_C Resistência da carga;

- X_C Reatância da carga;
- \dot{I}_C Corrente da carga;

Ainda:

$$\dot{Z}_{TH} = R_{TH} + j \cdot X_{TH} \quad (2.1)$$

$$\dot{Z}_C = R_C + j \cdot X_C \quad (2.2)$$

$$\alpha_{TA} = \frac{\dot{V}_{1TA}}{\dot{V}_{2TA}} \quad (2.3)$$

$$\alpha_{TE} = \frac{\dot{V}_{AT-TE}}{\dot{V}_{BT-TE}} \quad (2.4)$$

Onde:

- \dot{Z}_{TH} Impedância complexa de Thévenin equivalente do alimentador;
- \dot{Z}_C Impedância complexa da carga elétrica;
- α_{TA} Relação de transformação do transformador de acoplamento;
- α_{TE} Relação de transformação do transformador de excitação;

Tomando por base o circuito equivalente da Figura 2.8, podem ser estabelecidas as seguintes equações:

$$\dot{I}_{AT-TE} = \frac{\dot{I}_{1TA}}{\alpha_{TE}} \quad (2.5)$$

$$\dot{I}_{2TE} = \dot{I}_{1TA} - \dot{I}_{AT-TE} \quad (2.6)$$

$$\dot{I}_F = \dot{I}_C + \dot{I}_{AT-TE} \quad (2.7)$$

$$\dot{I}_{1TA} = \frac{\dot{I}_C}{\alpha_{TA}} \quad (2.8)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{V}_C}{\dot{Z}_C} \quad (2.9)$$

Tendo a equação (2.5) como referência e substituindo a equação (2.8), tem-se:

$$\dot{I}_{AT-TE} = \frac{\dot{I}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \quad (2.10)$$

Da equação (2.10) em (2.7), e rearranjando os termos, chega-se a:

$$\dot{I}_F = \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \right) \cdot \dot{I}_C \quad (2.11)$$

Também, a equação (2.8) e (2.10) em (2.6), e produz:

$$\dot{I}_{2TE} = \frac{(\alpha_{TE} - 1) \cdot \dot{I}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \quad (2.12)$$

Quanto às tensões, para encontrar uma relação da tensão na carga em função das variações de tensão experimentadas pela fonte, e tendo como referência o circuito elétrico apresentado, prossegue-se com as seguintes relações:

$$\dot{V}_C = \dot{V}_{2TA} + \dot{V}_{AT-TE} \quad (2.13)$$

$$\dot{V}_{2TA} = \frac{\dot{V}_{1TA}}{\alpha_{TA}} \quad (2.14)$$

$$\dot{V}_{1TA} = \dot{V}_{BT-TE} = \frac{\dot{V}_{AT-TE}}{\alpha_{TE}} \quad (2.15)$$

$$\dot{V}_{AT-TE} = \dot{V}_{TH} - \dot{Z}_{TH} \cdot \dot{I}_F \quad (2.16)$$

Portanto, tendo a equação (2.13) como referência e substituindo a equação (2.14), conduz a:

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{1TA}}{\alpha_{TA}} + \dot{V}_{AT-TE} \quad (2.17)$$

Substituindo a equação (2.15) em (2.17), e organizando as variáveis, tem-se:

$$\dot{V}_C = \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \right) \cdot \dot{V}_{AT-TE} \quad (2.18)$$

Utilizando as equações (2.16), (2.11) e (2.9) em (2.18), e organizando os termos, obtém-se:

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1} \right) + \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \right) \cdot \frac{\dot{Z}_{TH}}{\dot{Z}_C}} \quad (2.19)$$

Uma vez encontrada as correntes elétricas do circuito e a tensão na carga, é possível, então, calcular as demais tensões nos transformadores de excitação e de acoplamento, sendo essas variáveis de suma importância para o dimensionamento desses equipamentos.

No lado de alta tensão do transformador de excitação, basta organizar os termos da equação (2.18):

$$\dot{V}_{AT-TE} = \frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1} \quad (2.20)$$

A tensão no primário do transformador de acoplamento, assim como a tensão no lado de baixa do transformador de excitação é dada pela substituição de (2.20) em (2.15):

$$\dot{V}_{1TA} = \dot{V}_{BT-TE} = \frac{\alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1} \quad (2.21)$$

Por fim, a tensão no secundário do transformador de acoplamento é dada pela substituição da equação (2.21) em (2.14):

$$\dot{V}_{2TA} = \frac{\dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1} \quad (2.22)$$

A Tabela 2.1 apresenta as principais equações relacionadas com as tensões indicadas no circuito equivalente do regulador, sob a ação de subtensões manifestadas no alimentador, ou seja, situações operacionais que exigem do compensador uma atuação como elevador de tensão.

Tabela 2.1 – Equações das tensões do regulador no modo elevador.

Tensão	Equacionamento
\dot{V}_C	$\frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}\right) + \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}\right) \cdot \frac{\dot{Z}_{TH}}{\dot{Z}_C}}$
\dot{V}_{AT-TE}	$\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}$
$\dot{V}_{1TA} = \dot{V}_{BT-TE}$	$\frac{\alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}$
\dot{V}_{2TA}	$\frac{\dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}$

Em relação às correntes, essas estão sintetizadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Equações das correntes do regulador no modo elevador.

Corrente	Equacionamento
\dot{I}_C	$\frac{\dot{V}_C}{\dot{Z}_C}$
\dot{I}_{AT-TE}	$\frac{\dot{I}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}$
\dot{I}_{2TE}	$\frac{(\alpha_{TE} - 1)}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \cdot \dot{I}_C$
\dot{I}_{1TA}	$\frac{\dot{I}_C}{\alpha_{TA}}$

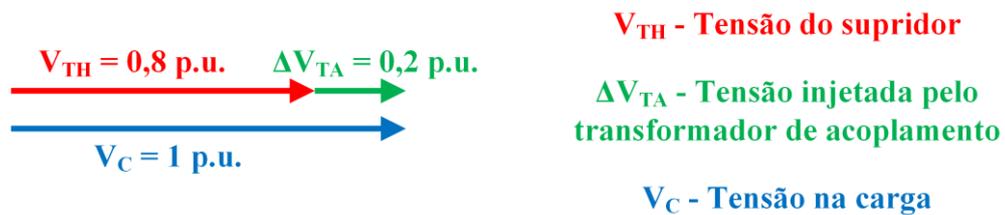
Do exposto, fica evidenciado que a operação do regulador é diretamente influenciada pelos parâmetros próprios do sistema sob análise, a saber: nível de curto circuito, tensão da fonte de suprimento, potência da carga, relação de transformação do transformador de acoplamento e o tape que o transformador de excitação está conectado.

Objetivando oferecer uma visão física sobre o emprego das formulações desenvolvidas, estas são consideradas para um sistema simplificado e ideal, para o qual é adotado um alimentador com nível de curto-circuito infinito e relação de transformação do transformador de acoplamento unitária ($\alpha_{TA} = 1$). Sob tais condições:

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1}\right)} \quad (2.23)$$

Assim, caso a fonte de suprimento desse alimentador esteja submetida a uma subtensão de 0,8 pu, o transformador de excitação operando com um tape de $\alpha_{TE} = 4$ seria suficiente para elevar a tensão na carga para o valor nominal de 1 pu. O diagrama fasorial da Figura 2.9 ilustra a situação descrita, onde V_{TH} corresponde à tensão do supridor, ΔV_{TA} é a tensão injetada pelo transformador de acoplamento e V_C a tensão na carga.

Figura 2.9 – Diagrama fasorial do regulador ideal atuando como elevador de tensão



Fonte: O autor.

Contudo, caso o alimentador em pauta se apresentasse com influência da impedância de curto circuito, a equação da tensão na carga, para $\alpha_{TA} = 1$, seria:

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1}\right) + \left(\frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}}\right) \cdot \frac{\dot{Z}_{TH}}{\dot{Z}_C}} \quad (2.24)$$

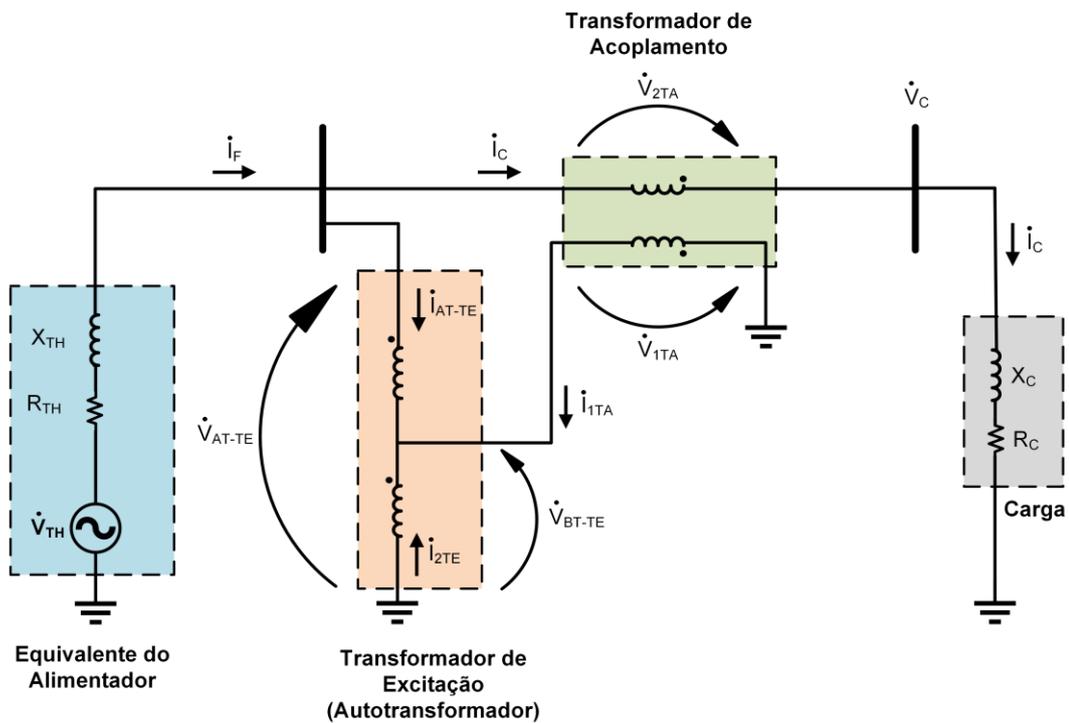
Uma análise comparativa entre o resultados associados com o caso ideal e aquele determinado pela equação (2.24), revela, com clareza, que o processo de regulação para um alimentador real não se conduz a mesma tensão do caso ideal. De fato, à medida que a potência de curto circuito reduz ou a potência da carga aumenta, o denominador da equação é elevado, reduzindo assim a amplitude de \dot{V}_C . Dessa forma, fica evidenciado que esses parâmetros de influência devem ser considerados durante o dimensionamento do regulador eletromagnético.

2.5.2 Regulador atuando como redutor de tensão

Através da chave de polaridade negativa (Chpn) a tensão série injetada pelo transformador de acoplamento possui uma defasagem de 180° em relação à polaridade daquela proporcionada pela fonte de suprimento, viabilizando, assim, uma diminuição da tensão nos terminais da carga.

O circuito elétrico equivalente do regulador, atuando sob as condições acima, encontra-se indicado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Circuito elétrico equivalente do regulador atuando como redutor de tensão



Fonte: O autor.

Tendo em vista que as grandezas envolvidas são as mesmas já descritas, considera-se dispensável maiores considerações sobre as mesmas.

De forma similar ao tratamento feito anteriormente, tem-se as seguintes relações para as correntes:

$$i_{AT-TE} = \frac{-i_{1TA}}{\alpha_{TE}} \quad (2.25)$$

$$i_{2TE} = -(i_{AT-TE} + i_{1TA}) \quad (2.26)$$

$$\dot{I}_F = \dot{I}_C + \dot{I}_{AT-TE} \quad (2.27)$$

$$\dot{I}_{1TA} = \frac{\dot{I}_C}{\alpha_{TA}} \quad (2.28)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{V}_C}{\dot{Z}_C} \quad (2.29)$$

As expressões matemáticas acima apresentadas indicam uma grande correspondência com as equações anteriormente obtidas. Vale observar que uma das diferenças pode ser observada nas equações (2.25) e (2.26).

Assim, substituindo a equação (2.28) em (2.25) e realizando as simplificações, tem-se:

$$\dot{I}_{AT-TE} = \frac{-\dot{I}_C}{\alpha_{TA} \cdot \alpha_{TE}} \quad (2.30)$$

Também, a equação (2.30) em (2.27) conduz a:

$$\dot{I}_F = \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \right) \cdot \dot{I}_C \quad (2.31)$$

Por outro lado, as equações (2.30) e (2.28) em (2.26), resulta em:

$$\dot{I}_{2TE} = \frac{(1 - \alpha_{TE}) \cdot \dot{I}_C}{\alpha_{TA} \cdot \alpha_{TE}} \quad (2.32)$$

Quanto às tensões, o circuito elétrico indica as seguintes equações:

$$\dot{V}_C = \dot{V}_{2TA} + \dot{V}_{AT-TE} \quad (2.33)$$

$$\dot{V}_{2TA} = \frac{\dot{V}_{1TA}}{\alpha_{TA}} \quad (2.34)$$

$$\dot{V}_{1TA} = -\dot{V}_{BT-TE} = -\frac{\dot{V}_{AT-TE}}{\alpha_{TE}} \quad (2.35)$$

$$\dot{V}_{AT-TE} = \dot{V}_{TH} - \dot{Z}_{TH} \cdot \dot{I}_F \quad (2.36)$$

Portanto, tendo a equação (2.33) como referência e substituindo a equação (2.34), conduz a:

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{1TA}}{\alpha_{TA}} + \dot{V}_{AT-TE} \quad (2.37)$$

Substituindo a equação (2.35) em (2.37), tem-se:

$$\dot{V}_C = \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \right) \cdot \dot{V}_{AT-TE} \quad (2.38)$$

Utilizando as equações (2.36), (2.31) e (2.29) em (2.38), e organizando os termos, obtém-se:

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1} \right) + \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}} \right) \cdot \frac{\dot{Z}_{TH}}{\dot{Z}_C}} \quad (2.39)$$

Ademais, organizando a equação (2.38), tem-se a tensão total do transformador de excitação:

$$\dot{V}_{AT-TE} = \frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1} \quad (2.40)$$

A tensão no primário do transformador de acoplamento, assim como a tensão no lado de baixa do transformador de excitação é dada pela substituição de (2.40) em (2.35):

$$\dot{V}_{1TA} = -\dot{V}_{BT-TE} = -\frac{\alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1} \quad (2.41)$$

Por fim, a tensão no secundário do transformador de acoplamento é dada pela substituição da equação (2.41) em (2.34):

$$\dot{V}_{2TA} = -\frac{\dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1} \quad (2.42)$$

A Tabela 2.3 apresenta as principais equações relacionadas com as tensões indicadas no circuito equivalente do regulador, sob a ação de sobretensões manifestadas no alimentador, ou seja, situações operacionais que exigem do compensador uma atuação como redutor de tensão.

Tabela 2.3 – Equações das tensões do regulador no modo redutor.

Tensão	Equacionamento
\dot{V}_C	$\frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}\right) + \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}\right)} \cdot \frac{\dot{Z}_{TH}}{\dot{Z}_C}$
\dot{V}_{AT-TE}	$\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}$
$\dot{V}_{1TA} = -\dot{V}_{BT-TE}$	$-\frac{\alpha_{TA} \cdot \dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}$
\dot{V}_{2TA}	$-\frac{\dot{V}_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}$

Em relação às correntes, essas estão sintetizadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Equações das correntes do regulador no modo redutor.

Corrente	Equacionamento
\dot{I}_C	$\frac{\dot{V}_C}{\dot{Z}_C}$
\dot{I}_{AT-TE}	$\frac{-\dot{I}_C}{\alpha_{TA} \cdot \alpha_{TE}}$
\dot{I}_{2TE}	$\frac{(1 - \alpha_{TE})}{\alpha_{TA} \cdot \alpha_{TE}} \cdot \dot{I}_C$
\dot{I}_{1TA}	$\frac{\dot{I}_C}{\alpha_{TA}}$

No que tange aos fatores de influência sobre o desempenho do regulador, vale aqui destacar que as mesmas considerações já feitas para o modo operante como elevador, o funcionamento do

dispositivo está sujeito aos mesmos fatores de influência já mencionados. Portanto, considera-se desnecessário maiores considerações sobre a correlação, nos termos numéricos anteriormente feitos. Entende-se que, os estudos de caso a serem realizados nessa dissertação irão evidenciar tal afirmativa.

2.6 Considerações finais

O presente capítulo foi centrado numa abordagem dos principais conceitos sobre a estrutura física e operacional de uma primeira versão do regulador eletromagnético de tensão desenvolvido no âmbito da UFU, cuja eficácia foi avaliada computacionalmente e também através de experimentos conduzidos laboratorialmente através de um protótipo em escala reduzida. Como sintetizado no texto, sua composição quanto às unidades de potência, foi embasada no emprego de transformadores, com características próprias. Um deles, denominado por transformador de excitação, foi concebido a jusante da unidade série ou de acoplamento. Essa estrutura, como já mencionado, conduziu a processos de regulação das tensões dentro dos propósitos almejados, todavia, a busca por propriedades que permitam uma otimização das potências dos dispositivos eletromagnéticos foi o desafio enfrentado e que levou a proposta aqui feita.

Visando, pois, à redução das potências dos transformadores empregados na topologia física supra concebida, mantendo-se a performance quanto ao processo da regulação da tensão desejada, foi considerada a hipótese de uma inversão da conexão entre o transformador de excitação e o de acoplamento. Uma vez estabelecido que a unidade série ficaria a jusante do autotransformador, isso requer que sejam realizados novos modelos matemáticos, os quais se apresentaram como cerne dos trabalhos aqui conduzidos. De fato, a exemplo da linha de pesquisa empregada nos trabalhos anteriores ao presente, tendo em mente a questão pontual da análise do processo de restauração das tensões de suprimento diante de variações de longa duração, a opção feita recaiu sobre a técnica de modelagem no domínio da frequência. Isso determina, pois, que estudos investigativos de caráter transitório não se apresentam contemplados nos estudos aqui realizados.

Como constatado ao longo do capítulo, as equações estabelecidas, tanto para o compensador em modo operacional visando à regulação de subtensões como também para condições de sobretensões, foram desenvolvidas levando-se em conta um sistema radial simplificado, através do qual torna-se clara a dedução das expressões que regem o processo de regulação consonante com o compensador e as características intrínsecas e paramétricas do sistema supridor e carga. Assim procedendo, foi possível o estabelecimento das bases matemáticas que permitem o dimensionamento básico das grandezas exigidas pelos dois transformadores e respectivos fatores de influência, segundo a estratégia utilizada.

Com os recursos até então obtidos torna-se factível uma avaliação de desempenho da nova proposição topológica diante da estrutura originalmente concebida, como tratado no capítulo subsequente.

CAPÍTULO III

3 ANÁLISE DE DESEMPENHO E COMPARAÇÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS DO REGULADOR

3.1 Considerações iniciais

Uma vez estabelecida a formulação aplicável ao processo da regulação, através da qual encontram-se correlacionados os parâmetros dos componentes da rede, da carga e o fenômeno a ser compensado, procede-se, nesta unidade com a utilização dos recursos visando, sobretudo, a obter as grandezas requeridas para o dimensionamento básico de um regulador de tensão, nos termos estabelecidos anteriormente.

Somado às questões supra postas, são indicadas as premissas para o estabelecimento de um modelo computacional objetivando a realização de estudos avaliativos sobre o desempenho do regulador diante de variações de tensões manifestadas nas redes elétricas.

Para tanto foi definida como plataforma para a simulação do complexo elétrico e do dispositivo regulador o software MATLAB/Simulink, ao qual foram inseridas as configurações da rede de suprimento, carga e regulador. Utilizando esse recurso e estabelecendo um sistema teste ao qual são impostas distintas condições para as variações de tensão no alimentador, são então realizadas investigações operacionais diversas voltadas para a análise da eficácia e características operativas do sistema diante da manifestação dos fenômenos aqui tratados.

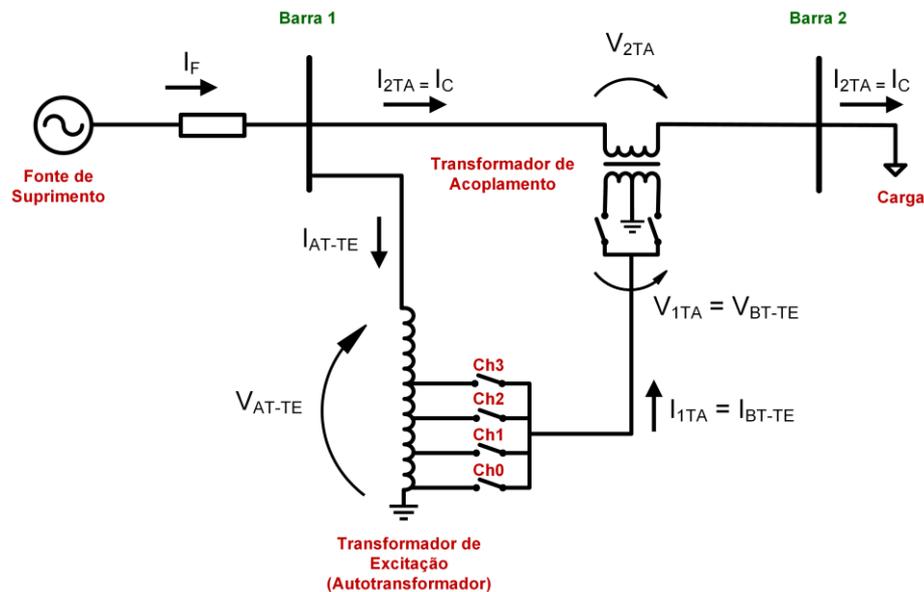
Os trabalhos são conduzidos focando as duas filosofias para a composição física do compensador, ou seja, com o transformador série a jusante da unidade de excitação, e, na sequência, a montante. Dessa forma é possível comparar as duas topologias quanto a questão da eficácia para o processo de regulação e também das características operacionais exigidas quanto as correntes e tensões junto aos dispositivos eletromagnéticos de potência.

3.2 Tensões, correntes e potências requeridas do regulador de tensão modificado

Com base no arranjo físico considerado ao longo desse trabalho e tendo em vista as características paramétricas intrínsecas atreladas com a fonte de suprimento, carga e dispositivo regulador, procede-se, nessa seção, a estudos avaliativos de desempenho para distintas condições impostas ao complexo elétrico quanto às variações de tensão. Assim, impondo-se os parâmetros de rede e níveis de variação das tensões são determinados: os tapes, correntes e tensões requeridas ao processo da regulação e, por conseguinte, as potências para as duas unidades de potência (transformador de acoplamento e de excitação). Mais precisamente, como apresentado na Figura 3.1, os estudos destinam-se a definir as grandezas de operação para o transformador de acoplamento (V_{1TA} , V_{2TA} , I_{1TA} , I_{2TA}) e para o transformador de excitação (V_{AT-TE} , V_{BT-TE} , I_{AT-TE} e I_{BT-TE}).

Uma observação de grande importância a ser feita neste momento refere-se ao tipo de representação indicada na Figura 3.1. Muito embora as aplicações práticas sejam, via de regra, direcionadas para arranjos trifásicos, a estrutura operacional do equipamento de regulação focado nessa dissertação se apresenta com uma representação que deve ser compreendida como sendo por fase. Assim, as variáveis identificadas acima e na figura subsequente devem ser compreendidas como representativas dos equivalentes fase-terra do compensador. Outro ponto relevante a ser destacado corresponde a questão da distinção entre valores requeridos para as tensões de funcionamento e aquelas reconhecidas como níveis de isolamento. Para fins dessa dissertação, as grandezas serão sempre as requeridas para a operação.

Figura 3.1 – Grandezas elétricas presentes no regulador



Fonte: O Autor.

Onde:

- V_{1TA} Tensão no primário do transformador de acoplamento;
- V_{2TA} Tensão no secundário do transformador de acoplamento;
- I_{1TA} Corrente no primário do transformador de acoplamento;
- I_{2TA} Corrente no secundário do transformador de acoplamento;
- V_{AT-TE} Tensão total no transformador de excitação;
- V_{BT-TE} Tensão de tape disponibilizada pelo transformador de excitação;
- I_{AT-TE} Corrente total no transformador de excitação;
- I_{BT-TE} Corrente na saída do tape do transformador de excitação.

3.2.1 Tensões, correntes e potência do regulador

Para o dimensionamento básico das unidades eletromagnéticas que perfazem o equipamento regulador (tensão, corrente e potência de operação) é essencial o prévio conhecimento dos parâmetros representativos do alimentador a ser regulado. Para fins do presente estudo estes compreendem: tensão do alimentador (V_N), nível de curto circuito (impedância de Thévenin do equivalente do sistema elétrico) e potência da carga suprida (S_{CARGA}) através de suas respectivas potências ativa e reativa.

Conhecidas tais informações e, mais uma vez, reconhecendo que os tratamentos matemáticos devem ser feitos por fase, a primeira grandeza elétrica a ser considerada é a corrente no secundário do transformador de acoplamento (I_{2TA}), a qual, como indicado no arranjo físico do regulador, é a própria corrente da carga suprida (I_C).

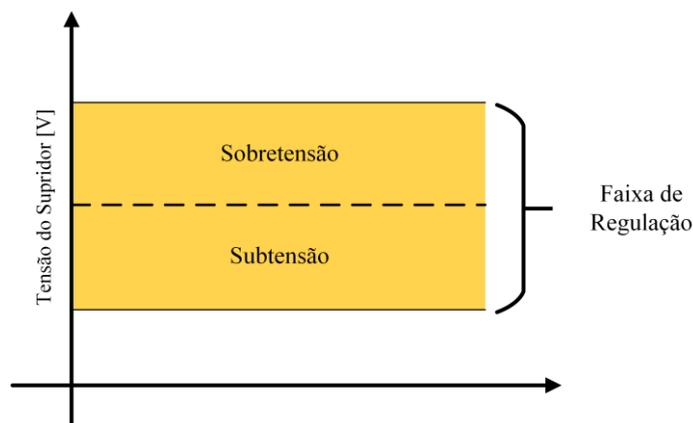
$$I_{2TA} = I_C \quad (3.1)$$

Outro parâmetro refere-se à relação de transformação do transformador de acoplamento (α_{TA}), o qual, idealmente poderia ser unitário. Todavia, sua escolha deverá ser definida levando-se em conta os limites operacionais das chaves de manobra, com destaque a corrente elétrica admissível, a partir da qual é estabelecido o valor de α_{TA} . Conhecida essa relação de transformação, segue que a corrente de operação do primário do transformador de acoplamento é dada pela equação (3.2).

$$I_{1TA} = \frac{I_{2TA}}{\alpha_{TA}} = \frac{I_C}{\alpha_{TA}} \quad (3.2)$$

Quanto às tensões de operação do transformador de acoplamento, deve-se ressaltar que essa grandeza é afetada significativamente pela relação de transformação do transformador de excitação (α_{TE}), fato este que irá impor, para cada condição de compensação requerida, um tape que irá ditar o valor de α_{TE} . A determinação do número de tapes e respectivos níveis de tensão a serem disponibilizados, está diretamente atrelado com a faixa de regulação que deverá ser atendida pelo equipamento. A Figura 3.2 exemplifica graficamente este requisito, a qual evidencia uma determinada região passível de manifestação da variação da tensão e que deverá ser compensada para a restauração dos níveis de tensão aos patamares adequados, conforme indicado no PRODIST.

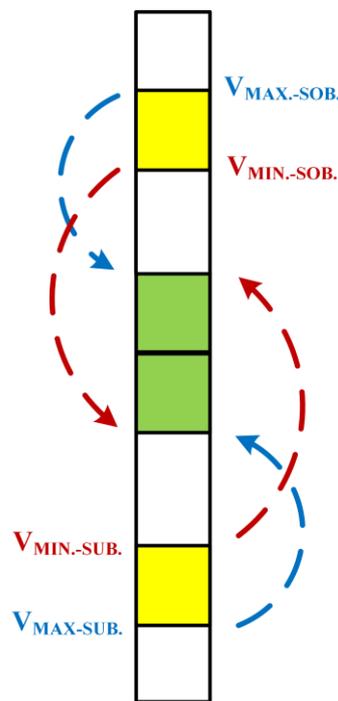
Figura 3.2 – Faixa de atuação do regulador



Fonte: O Autor.

Para atender a condição supra posta, o transformador de excitação, como já caracterizado, é composto por diversos tapes, sendo que o de maior alcance quanto ao nível de compensação é aquele destinado a maior variação que poderia ocorrer no alimentador. Os demais visam a atender às diversas variações de tensão de forma a conduzi-las para a faixas adequada. A Figura 3.3 ilustra esta ação e as duas situações operacionais passíveis de serem impostas, a saber: maiores valores para as sub e sobretensões.

Figura 3.3 – Limites de regulação do maior tape do transformador de excitação



Fonte: O autor.

Para a definição da quantidade de tapes e da relação de transformação a ser utilizada para o transformador de excitação, utiliza-se parte do equacionamento proposto no capítulo 2, transcritas a seguir (equações (3.3) e (3.4)).

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}\right) + \left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}\right)} \cdot \frac{\dot{Z}_{TH}}{\dot{Z}_C} \quad (3.3)$$

$$\dot{V}_C = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA}}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1}\right) + \left(\frac{\alpha_{TA} \cdot \alpha_{TE} - 1}{\alpha_{TA} \cdot \alpha_{TE}}\right)} \cdot \frac{\dot{Z}_{TH}}{\dot{Z}_C} \quad (3.4)$$

Onde:

- V_C Tensão na carga;
- V_{TH} Tensão equivalente do sistema elétrico;
- Z_{th} Impedância equivalente do sistema elétrico;
- Z_C Impedância da carga.

A formulação acima, em conjunto com a Figura 3.3 evidenciam que, ao se fazer $V_{TH} = V_{MAX.-SUB}$, fato este que conduz a um $V_C = \text{limite inferior de tensão}$, permite a determinação do valor de α_{TE} que atenda a faixa de regulação permitida. As demais grandezas (α_{TA} , Z_{TH} e Z_C) requeridas pela formulação devem estar definidas.

De forma análoga, se o fenômeno manifestado fosse na forma de uma sobretensão tal que: $V_{TH} = V_{MAX.-SOB}$. e tendo por base o valor de $V_C = \text{limite superior de tensão}$, igualmente chegasse ao valor de α_{TE} .

Objetivando esclarecer o emprego das formulações é feito, na sequência, a aplicação do procedimento através de um sistema radial cujos parâmetros são explicitados na Tabela 3.1. Destaca-se que, os valores indicados referem-se a um arranjo trifásico, portanto, quando se tratar de potências trifásicas e tensões de linha, ao se considerar o equivalente fase-terra, deve-se empregar os valores adequados para as formulações.

Tabela 3.1 – Características do alimentador elétrico e da carga

Parâmetro	Valor
Tensão (fase-terra)	7,97 kV
Potência de Curto Circuito (trifásica)	200 MVA
Relação R/X	0,5
Fator de potência da carga	0.94 (atrasado)
Potência da carga (trifásica)	10 MVA
Corrente de carga	418,4 A

Em consonância com o exposto, a corrente no enrolamento série do transformador de acoplamento (lado secundário), sendo a própria da carga, será de 418,4 A.

Para a definição do valor para a relação de transformação α_{TA} , fazendo-se a opção que a corrente do lado primário seja de 50% da secundária, isto implica em $\alpha_{TA} = 2$, e:

$$I_{1TA} = \frac{418,4 A}{2} = 209,2 A \quad (3.5)$$

Uma outra característica importante refere-se a faixa de variação de tensão a ser compensada. Para tanto, estabelecendo-se uma subtensão e também uma sobretensão máxima de 20% daquela estabelecida como valor de referência, isso determina que o regulador deverá ser capaz de compensar variações na fonte de suprimento de 0,8 pu até 1,2 pu.

Nos termos postos, a definição do primeiro tape, ou seja, aquele que proporciona a tensão de reforço de maior magnitude, seja positiva ou negativa, é feita com base nas equações (3.3) e (3.4). Visando ao atendimento dos valores regulamentados para as tensões em seus limiares da região adequada, isso implica que a tensão na carga (V_C) seja levada para um valor de 0,93 pu quando a tensão da fonte de suprimento (V_{TH}) for de 0,8 pu. Quando a variação for no sentido inverso, isso é, a tensão atingir 1,2 pu, então esta grandeza deverá ser reduzida para $V_{TH} = 1,05 pu$. Assim sendo, na Figura 3.3 as variáveis indicadas assumem: $V_{MAX. -SUB} = 0,8 pu$ e $V_{MAX. -SOB} = 1,2 pu$. Os limites de tensão de 0,93 pu e 1,05 pu são definidos pelo PRODIST para o nível de tensão de 13,8 kV.

A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros representativos das impedâncias associadas com o presente estudo, a definição da relação de transformação da unidade de acoplamento e os limites de tensão permitidos pelo PRODIST (valores adequados).

Tabela 3.2 – Parâmetros, relação de transformação e limites de tensão para a faixa adequada para o caso sob análise

Parâmetro	Valor
\dot{Z}_{TH}	$0,42 + j.0,85 [\Omega]$
\dot{Z}_C	$17,90 + j.6,50 [\Omega]$
α_{TA}	2
Faixa de tensão adequada (PRODIST)	$0,93 \leq V_C \leq 1,05$

Substituindo os valores da Tabela 3.2 nas expressões anteriormente apresentadas obtém-se as equações (3.6) e (3.7), respectivamente para a situação da subtensão e sobretensão máxima.

$$0,93 \text{ pu} = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{2 \cdot \alpha_{TE}}{2 \cdot \alpha_{TE} + 1}\right) + \left(\frac{2 \cdot \alpha_{TE} + 1}{2 \cdot \alpha_{TE}}\right) \cdot \left(\frac{0,42 + j \cdot 0,85}{17,90 + j \cdot 6,50}\right)} \quad (3.6)$$

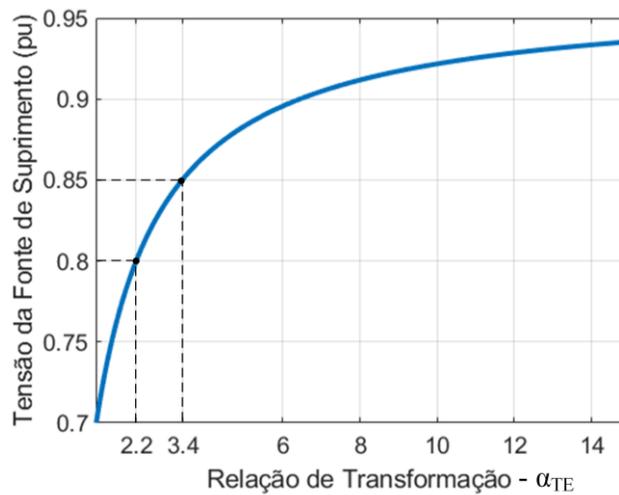
$$1,05 \text{ pu} = \frac{\dot{V}_{TH}}{\left(\frac{2 \cdot \alpha_{TE}}{2 \cdot \alpha_{TE} - 1}\right) + \left(\frac{2 \cdot \alpha_{TE} - 1}{2 \cdot \alpha_{TE}}\right) \cdot \left(\frac{0,42 + j \cdot 0,85}{17,90 + j \cdot 6,50}\right)} \quad (3.7)$$

Para condições operativas associadas com subtensões, a Figura 3.4 correlaciona as variações de tensão ocorridas na rede com o valor de α_{TE} requerido para a restauração das tensões à faixa adequada. A figura mostra que, para $\alpha_{TE} = 3,4$, o regulador é capaz de manter 0,93 pu de tensão no barramento da carga sob a ação de um afundamento de 0,85 pu na fonte de suprimento. Como a faixa de regulação escolhida para o regulador é de 0,2 pu, então a relação de transformação do primeiro tape deve ser de $\alpha_{TE} = 2,2$.

A situação acima implica que o maior tape para o transformador de excitação, associado com $\alpha_{TE} = 2,2$ ou inferior, requer uma tensão de 45,4 % ou superior na tensão primária, como determina a equação (3.8).

$$V_{BT-TE} = \frac{V_{AT-TE}}{\alpha_{TE}} = \frac{1 \text{ pu}}{2,2} = 0,454 \text{ pu} \quad (3.8)$$

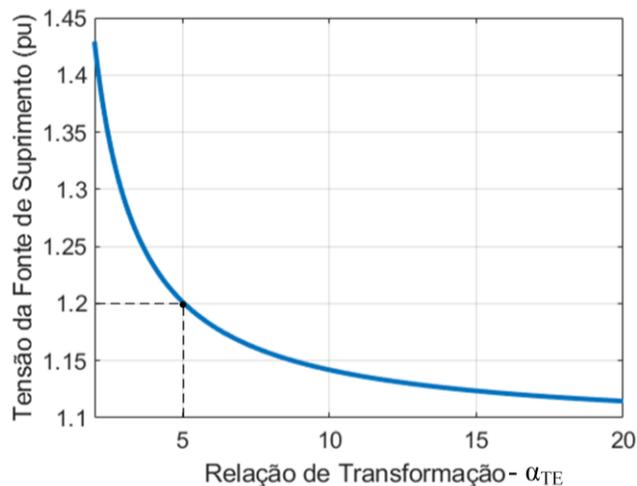
Figura 3.4 – Correlação entre os níveis de subtensão e a relação de transformação do transformador de excitação



Fonte: O Autor.

Quando da manifestação de sobretensões, a Figura 3.5 mostra a mesma correlação supra discutida, a qual foi derivada da equação (3.7). Nota-se que, sob a ação de uma sobretensão de 1,2 pu, para a restauração da tensão da carga dentro da faixa adequada será requerida uma relação de transformação de $\alpha_{TE} = 5$. Este valor determina que as condições de subtensões se apresentam como requisitos que exigem maiores tensões dos tapes que as sobretensões. Portanto, a definição dos tapes do transformador de excitação se apresenta como consequência dos fenômenos associados com subtensões.

Figura 3.5 – Correlação entre os níveis de sobretensão e a relação de transformação do transformador de excitação



Fonte: O Autor

A definição dos demais tapes deve ser estabelecida de forma tal que, no mínimo, toda a faixa de regulação seja atendida. Dessa forma, utilizando a equação da tensão na carga, definiu-se um passo de 10% para um regulador constituído por um transformador de excitação com 5 tapes. Optando-se, também, por tapes igualmente escalonados, chega-se às seguintes relações de transformação $\alpha_{TE-1} = 10$ (10%), $\alpha_{TE-2} = 5$ (20%), $\alpha_{TE-3} = 3,33$ (30%), $\alpha_{TE-4} = 2,5$ (40%), $\alpha_{TE-5} = 2$ (50%). Observando os limites de regulação para cada tape, conforme Tabela 3.3, fica evidenciado que toda a faixa de regulação entre 0,93 pu e 0,85 pu se mostra contemplada, da mesma forma com que é atendida a faixa das sobretensões entre 1,05 pu e 1,2 pu.

Tabela 3.3 – Tapes definidos para o transformador de excitação e seus limites de regulação

Relação de transformação	Limites de Regulação em subtensão (pu)	Limites de Regulação em sobretensão (pu)
Tape 1 $\alpha_{TE-1} = 10$	1,04 – 0,92	1,14 – 1,01
Tape 2 $\alpha_{TE-2} = 5$	1,00 – 0,88	1,20 – 1,06
Tape 3 $\alpha_{TE-3} = 3,33$	0,96 – 0,85	1,27 – 1,12
Tape 4 $\alpha_{TE-4} = 2,5$	0,92 – 0,82	1,34 – 1,19
Tape 5 $\alpha_{TE-5} = 2$	0,89 – 0,79	1,43 – 1,26

Com os tapes estabelecidos, é possível a determinação das tensões e correntes requeridas pelo transformador de excitação. Nesse contexto, através dos valores limites para cada tape, pode-se perceber que, para situações de sobretensão, apenas os tapes 1 e 2 são suficientes para regular toda a faixa definida. Enquanto que para as condições de subtensão, os tapes especificados se fazem necessário. Com essa consideração, pode-se calcular a tensão do lado de alta tensão do transformador de excitação, tanto para condições de subtensão (equação (3.9)), quanto para sobretensão (equação (3.10)) para as situações críticas:

$$V_{AT-TE} = \frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} \cdot V_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 7,97 \text{ kV}}{2 \cdot 2 + 1} = 6,38 \text{ kV} \quad (3.9)$$

$$V_{AT-TE} = \frac{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} \cdot V_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1} = \frac{5 \cdot 2 \cdot 7,97 \text{ kV}}{5 \cdot 2 - 1} = 8,85 \text{ kV} \quad (3.10)$$

Portanto, considerando o maior valor de tensão, pode-se determinar a tensão de operação V_{AT-TE} como sendo de 8,85 kV. Na sua saída, cada tape possui uma tensão distinta, calculada de acordo com a equação (3.11). Para o exemplo numérico abordado, a Tabela 3.4 indica os valores encontrados.

$$V_{BT-TE} = \frac{V_{AT-TE}}{\alpha_{TE}} \quad (3.11)$$

Tabela 3.4 – Tapes e tensões definidos para o transformador de excitação

Parâmetro	Tensões dos tapes do transformador de excitação (fase-terra)
Tape 1	885 V
Tape 2	1,77 kV
Tape 3	2,655 kV
Tape 4	3,54 kV
Tape 5	4,425 kV

A máxima tensão no primário e secundário do transformador de acoplamento, para condições de subtensão e sobretensão, são calculadas pelas equações (3.12) a (3.15), portanto, a condição mais crítica ocorre durante eventos de subtensão.

Para condições de subtensão:

$$V_{1TA} = \frac{\alpha_{TA} \cdot V_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1} = \frac{2 \cdot 7,97 \text{ kV}}{2 \cdot 2 + 1} = 3,19 \text{ kV} \quad (3.12)$$

$$V_{2TA} = \frac{V_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} + 1} = \frac{7,97 \text{ kV}}{2 \cdot 2 + 1} = 1,59 \text{ kV} \quad (3.13)$$

Para condições de sobretensão:

$$V_{1TA} = \frac{\alpha_{TA} \cdot V_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1} = \frac{2 \cdot 7,97 \text{ kV}}{5 \cdot 2 - 1} = 1,77 \text{ kV} \quad (3.14)$$

$$V_{2TA} = \frac{V_C}{\alpha_{TE} \cdot \alpha_{TA} - 1} = \frac{7,97 \text{ kV}}{5 \cdot 2 - 1} = 0,885 \text{ kV} \quad (3.15)$$

As demais correntes elétricas são determinadas pelas equações (3.16) e (3.17). Portanto, a Tabela 3.5 apresenta um resumo dos valores máximos para as grandezas operativas associadas com os dois transformadores que perfazem o regulador aqui tratado. Vale ressaltar que, as tensões e correntes indicadas na Figura 3.1 e traduzidas através das equações apresentadas são indicativas das máximas grandezas de operação, por fase. Portanto, no que tange às tensões, estas não correspondem aos níveis de isolamento requeridos nos projetos.

$$I_{BT-TE} = I_{1TA} = 209,2 \text{ A} \quad (3.16)$$

$$I_{AT-TE} = \frac{I_C}{\alpha_{TA} \cdot \alpha_{TE}} = \frac{418,4}{2 \cdot 2} = 104,6 \text{ A} \quad (3.17)$$

Tabela 3.5 – Valores para as máximas grandezas elétricas de operação dos transformadores de acoplamento e de excitação

Grandezas Elétricas	Valor
V_{AT-TE}	8,85 kV
V_{BT-TE} / V_{1TA}	3,19 kV
V_{2TA}	1,59 kV
I_{AT-TE}	104,6 A
I_{BT-TE} / I_{1TA}	209,2 A
I_{2TA}	418,4 A

Uma vez conhecida as tensões e correntes de operação para ambos os transformadores, resta calcular as potências por fase através das equações (3.18) e (3.19).

$$S_{TE} = V_{AT-TE} \cdot I_{AT-TE} = 8,85 \text{ kV} \cdot 104,6 \text{ A} = 926 \text{ kVA} \quad (3.18)$$

$$S_{TA} = V_{2TA} \cdot I_{2TA} = 1,59 \text{ kV} \cdot 418,4 \text{ A} = 625 \text{ kVA} \quad (3.19)$$

Por fim, a Tabela 3.6 sintetiza as principais informações operacionais do regulador requerido para fins do atendimento ao sistema sob análise. Quanto aos parâmetros representativos das impedâncias das unidades eletromagnéticas, estas foram embasadas em meras adoções de valores típicos.

Tabela 3.6 – Características elétricas operativas requeridas dos transformadores de excitação e de acoplamento

Dados	Potência (kVA)	Tensão nos enrolamentos Primário/Secundário	Zcc (%)	Rcc (%)
Transformador de Acoplamento	625	3,19 / 1,59 kV	4	1
Transformador de Excitação	926	8,85 kV / Tapes	2	0,5
Tapes do Transformador de Excitação	0,885 kV (Tape 1) – 1,77 kV (Tape 2) – 2,655 kV (Tape 3) – 3,54 kV (Tape 4) – 4,425 kV (Tape 5)			

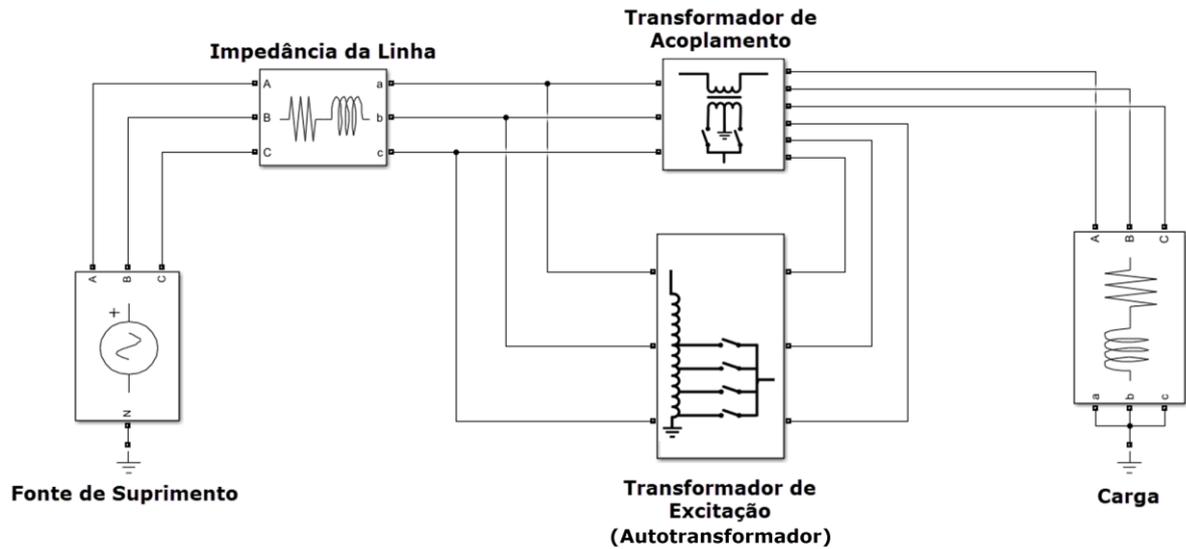
3.3 Modelagem computacional

Uma vez estabelecidas as bases conceituais e matemáticas que regem o comportamento de um alimentador elétrico típico ao qual foi inserido o regulador eletromagnético focado nessa dissertação, o complexo, como um todo, requer uma ferramenta computacional para estudos diversos, preferencialmente, através de técnicas de modelagem no domínio do tempo. Assim procedendo, torna-se possível a análise de desempenho do compensador diante de ocorrências adversas manifestadas na rede elétrica, como também fica estabelecido um mecanismo sistematizado para investigações sobre a eficácia do regulador aos fins a que se destina.

Com vistas a atender a tal propósito, foi empregado o software MATLAB/Simulink, de amplo uso no meio científico e que, comprovadamente, oferece recursos para os mais diversos estudos requeridos pela engenharia elétrica. Não obstante a diversidade dos estudos passíveis de realização com o software, para fins desse trabalho, o foco será totalmente direcionado a investigações associadas com condições de regime permanente.

A Figura 3.6 mostra o sistema implementado na plataforma computacional. Iniciando pela modelagem da fonte, esta foi representada através do bloco denominado *three-phase programmable voltage source*. Este permite a realização de estudos através de uma dada tensão de referência definida pelo usuário, e ainda, a inserção de diferentes níveis de variações de tensão em períodos pré-programados, como requerido pelas simulações dos fenômenos aqui tratados. Em relação à impedância equivalente do sistema, esta utiliza o bloco *three-phase series RLC branch*. Quanto a carga, esta é modelada através de sua impedância equivalente.

Figura 3.6 – Modelo computacional do sistema elétrico utilizado para os estudos



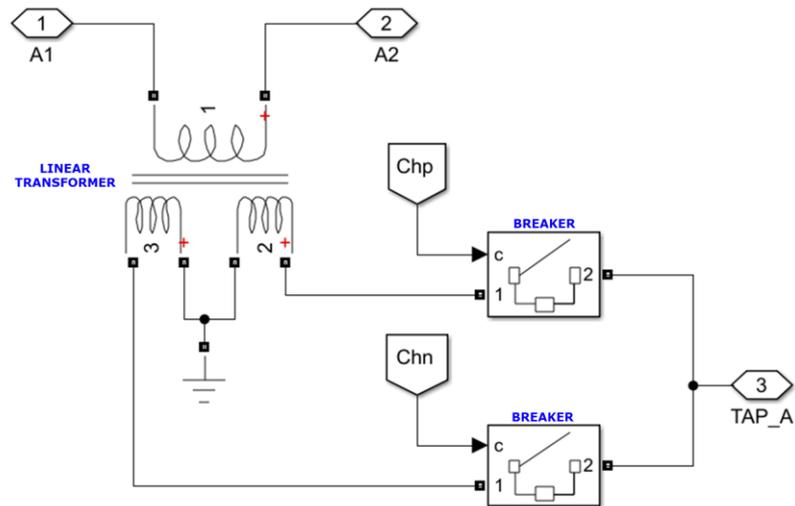
Fonte: O Autor.

Os componentes eletromagnéticos que formam o regulador são considerados na sequência.

3.3.1 Modelagem do transformador de acoplamento

Para a representação do transformador de acoplamento, tendo em vista a natureza trifásica do alimentador sob análise, este componente foi modelado através de três unidades monofásicas, cada qual como indicado na Figura 3.7. Nesta fica evidenciado que a proposta feita se encontra embasada num transformador de 3 enrolamentos. Um deles corresponde à bobina secundária ligada em série com o alimentador através das portas de conexão A1 e A2. As duas outras bobinas destinam-se a modelar o primário, o qual, como estabelecido na concepção do equipamento, é formado por duas unidades, aterradas no seu ponto central. Seus terminais são conectados ao bloco *breaker* do MATLAB/Simulink, que corresponde a ação das chaves de definição da polaridade da tensão de compensação. Por fim, observa-se uma outra porta, identificada por TAP_A, através da qual é feito o suprimento de tensão atrelada com o tape selecionado do transformador de excitação.

Figura 3.7 – Modelo computacional do transformador de acoplamento



Fonte: O Autor.

Correlacionando o modelo genérico estabelecido para o transformador de acoplamento com os valores das grandezas associadas com o exemplo numérico explorado neste capítulo, a Tabela 3.7 fornece os parâmetros e demais grandezas operacionais do componente em evidência. Como se observa, as resistências e indutâncias de dispersão foram divididas igualmente entre os enrolamentos primário e secundário. Quanto ao ramo magnetizante, sua influência é pequena nos estudos, motivo pelo qual foi considerado como um circuito aberto.

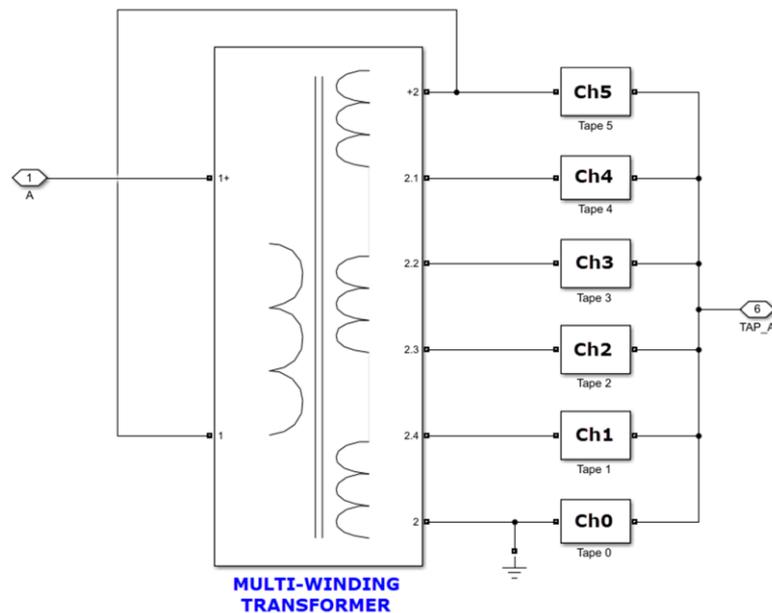
Tabela 3.7 – Parâmetros de entrada do bloco *linear transformer*

Parâmetro	Enrolamento 1	Enrolamento 2	Enrolamento 3
Potência	625 kVA		
Tensão	1,59 kV	3,19 kV	3,19 kV
Resistência	0,005 pu	0,005 pu	0,005 pu
Indutância de dispersão	0,019 pu	0,019 pu	0,019 pu

3.3.3 Modelagem do transformador de excitação

De modo similar ao realizado anteriormente, o transformador de excitação também foi simulado através de três unidades monofásicas. Para tanto, como ilustrado na Figura 3.8, utilizou-se, para cada fase, o bloco *multi-winding transformer*. Esta opção ocorreu diante do fato que a utilização desse bloco permite o emprego de tapes nos enrolamentos do transformador.

Figura 3.8 – Implementação computacional do transformador de excitação



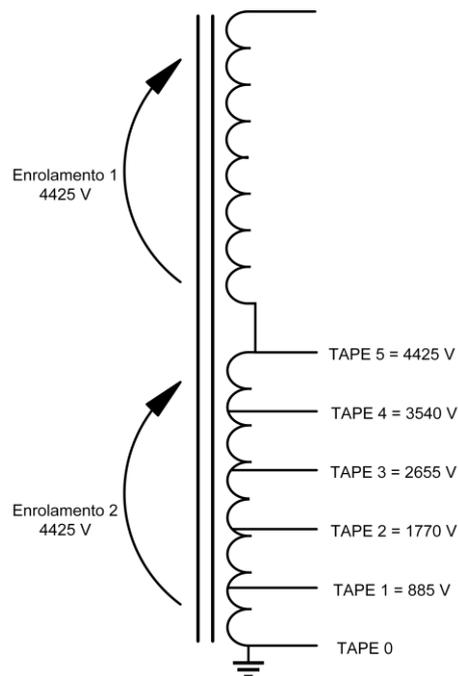
Fonte: O Autor.

Os parâmetros e grandezas de operação associadas com o sistema teste encontram-se fornecidos na Tabela 3.8. Como o autotransformador está sendo modelado através de um transformador convencional, como mostra a Figura 3.9, os dados de entrada devem estar compatibilizados com o componente utilizado.

Tabela 3.8 – Parâmetros de entrada do bloco *multi-winding transformer*

Parâmetro	Enrolamento 1	Enrolamento 2
Tensão	4,425 kV	4,425 kV
Potência de operação	926 kVA	
Resistência do enrolamento	0,0025 pu	0,0025 pu
Indutância de dispersão	0,0097 pu	0,0097 pu
Quantidade de tapes	-	4

Figura 3.9 – Circuito representativo do transformador de excitação



Fonte: O Autor.

Quanto à questão da lógica para o controle dos tapes, visando à seleção do mais adequado para cada situação imposta para a variação da tensão, esta encontra-se consonante com as *toolbox* disponibilizadas pelo software. Sua atuação ocorre, inicialmente, através da medição da tensão na carga e, na sequência o sistema realiza uma excursão sequencial dos tapes disponibilizados no

transformador de excitação, como ilustrado na seção 2.3 do capítulo 2. Esta operação, naturalmente, implicará em fenômenos transitórios de chaveamentos, os quais não são avaliados nessa dissertação.

3.4 Avaliação de desempenho do regulador

Uma vez estabelecido o modelo computacional, definido o sistema teste e feitas as parametrizações necessárias, procede-se, na sequência, os estudos avaliativos quanto ao desempenho do equipamento frente a distintos distúrbios na rede.

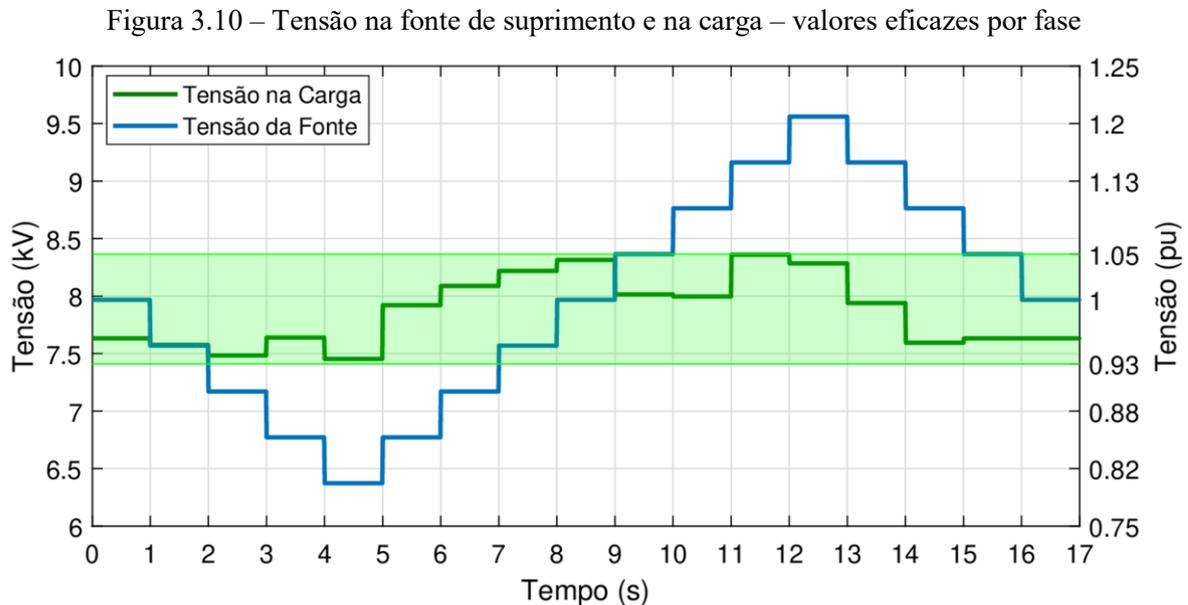
Para tanto foram impostas variações de tensão na fonte de suprimento através de degraus sucessivos de 5% da tensão de referência, como indicado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Variações de tensão impostas na fonte

Intervalos	Tensão da fonte de suprimento (kV)	Tensão da fonte de suprimento (pu)
0 a 1s	13,8	1
1 a 2s	13,11	0,95
2 a 3s	12,42	0,9
3 a 4s	11,73	0,85
4 a 5s	11,04	0,8
5 a 6s	11,73	0,85
6 a 7s	12,42	0,9
7 a 8s	13,11	0,95
8 a 9s	13,8	1
9 a 10s	14,49	1,05
10 a 11s	15,18	1,1
11 a 12s	15,87	1,15
12 a 13s	16,56	1,2
13 a 14s	15,87	1,15
14 a 15s	15,18	1,1
15 a 16s	14,49	1,05
16 a 17s	13,8	1

Na Figura 3.10 é indicado o perfil das variações supra definidas, assim como as tensões nos terminais da carga resultante do processo de regulação utilizado. É importante destacar, novamente, que os transitórios decorrentes de um e outro ponto discreto de operação e, por conseguinte, do

processo de compensação, não são indicados na figura. A motivação maior para tal simplificação na apresentação dos resultados é uma maior clareza sobre a efetividade no mecanismo da restauração da tensão da carga aos padrões regulamentados.



Fonte: O Autor.

Verifica-se que, durante todo o intervalo de simulação envolvendo as variações de tensão impostas na fonte, a tensão na carga permaneceu dentro da faixa adequada. De fato, seus valores ficaram situados entre 7,41 kV e 8,37 kV (região verde), com um valor mínimo de 7,45 kV no intervalo entre 4 e 5s. A maior magnitude, de 8,35 kV, ocorreu entre 11e 12s.

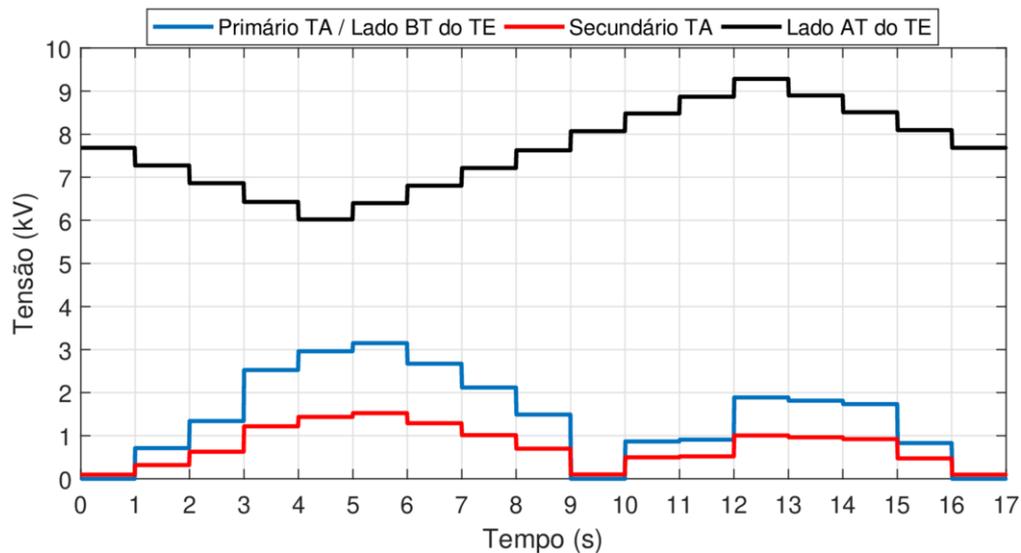
Na Tabela 3.10 tem-se o resultado do processo seletivo do tape mais adequado para o enquadramento do nível da tensão aos patamares adequados. Um fato importante de destaque está relacionado com o controle do regulador. De fato, para a simulação apresentada, os limites estabelecidos estão condizentes com os valores indicados pelo PRODIST, todavia, esses limites também podem ser configurados de modo que a tensão na carga tenha uma variação ainda menor, mantendo mais próximo ao nominal. Porém, com essa mudança, certamente as chaves serão atuadas mais frequentemente, podendo causar um desgaste mecânico nesses elementos.

Tabela 3.10 – Variação das chaves do regulador

Intervalos	Chaves dos tapes	Chaves de polaridade
0 a 1s	Tape 0	Positiva
1 a 2s	Tape 1	Positiva
2 a 3s	Tape 2	Positiva
3 a 4s	Tape 4	Positiva
4 a 5s	Tape 5	Positiva
5 a 6s	Tape 5	Positiva
6 a 7s	Tape 4	Positiva
7 a 8s	Tape 3	Positiva
8 a 9s	Tape 2	Positiva
9 a 10s	Tape 0	Positiva
10 a 11s	Tape 1	Negativa
11 a 12s	Tape 1	Negativa
12 a 13s	Tape 2	Negativa
13 a 14s	Tape 2	Negativa
14 a 15s	Tape 2	Negativa
15 a 16s	Tape 1	Negativa
16 a 17s	Tape 0	Negativa

As tensões de operação que os transformadores de excitação e de acoplamento estão sujeitos, para as distintas variações de tensão impostas nos intervalos de tempo anteriores, encontram-se indicadas na Figura 3.11. Nesta, os termos AT e BT referem-se à alta e baixa tensão, enquanto que TA e TE identificam se o transformador é o de acoplamento ou de excitação. Os resultados apontam para que a maior tensão de operação do transformador de acoplamento ocorre entre 5 e 6s, com um valor de 3,15 kV para o primário e 1,53 kV para o secundário. Quanto ao transformador de excitação, a tensão no tape selecionado (baixa tensão) é numericamente igual ao primário do transformador de acoplamento, já do lado de alta tensão, esta indica uma maior magnitude entre 12 e 13s, atingindo 9,28 kV.

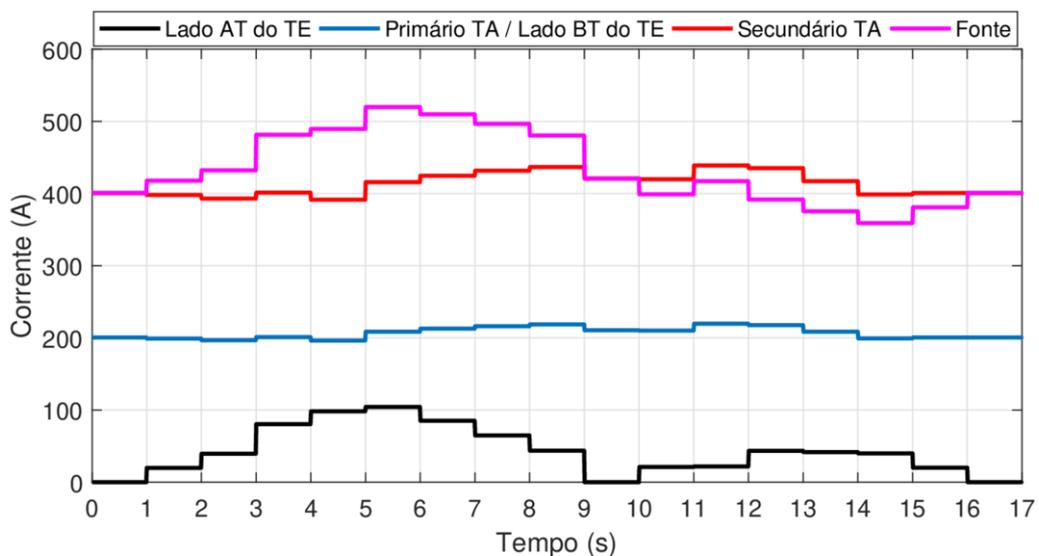
Figura 3.11 – Tensões nos terminais dos transformadores de acoplamento e de excitação do regulador



Fonte: O Autor.

As correntes presentes nos enrolamentos das unidades eletromagnéticas encontram-se ilustradas na Figura 3.12. A corrente no secundário do transformador de acoplamento é a própria corrente da carga, portanto, não experimenta variações mais expressivas tendo em vista que a tensão pouco varia na mesma. No seu primário, a corrente será 50% destes valores, visto a relação de transformação utilizada. No transformador de excitação, tem-se que, do lado de alta tensão, o maior valor é de 104,3 A, enquanto que no enrolamento de baixa, a corrente entregue é a mesma do primário do transformador de acoplamento.

Figura 3.12 – Correntes nos transformadores do regulador e no alimentador



Fonte: O Autor.

Por fim, a Tabela 3.11 mostra uma comparação entre os resultados de simulação em relação aos calculados pelas formulações definidas. Nota-se, então, que as tensões e correntes estão de acordo com os equacionamentos, não ultrapassando um erro de 5% daqueles calculados. Essa pequena diferença deve-se principalmente à variação da tensão na carga.

Tabela 3.11 – Comparação entre os valores simulados e calculados

Parâmetro	Valores da Simulação	Valores Calculados
Tensão no lado AT do TE	9,28 kV	8,85 kV
Tensão no lado BT do TE / Tensão no Primário TA	3,15 kV	3,19 kV
Tensão no Secundário TA	1,53 kV	1,59 kV
Corrente no lado AT do TE	104,3 A	104,6 A
Corrente no lado BT do TE/ Corrente no Primário TA	219,5 A	209,2 A
Corrente no Secundário TA	439 A	418,4 A

Os resultados das simulações apresentados são indicativos que:

- O regulador se mostrou efetivo no processo de restauração da tensão da carga aos padrões requeridos pelo PRODIST, para quaisquer variações impostas para a rede de suprimento;
- Os resultados se mostraram consonantes com os equacionamentos matemáticos e respectivas estimativas de valores para as grandezas operativas;
- Também, a seleção dos tapes estabelecida foi comprovadamente eficaz para a restauração das tensões da carga diante das variações impostas para a fonte;

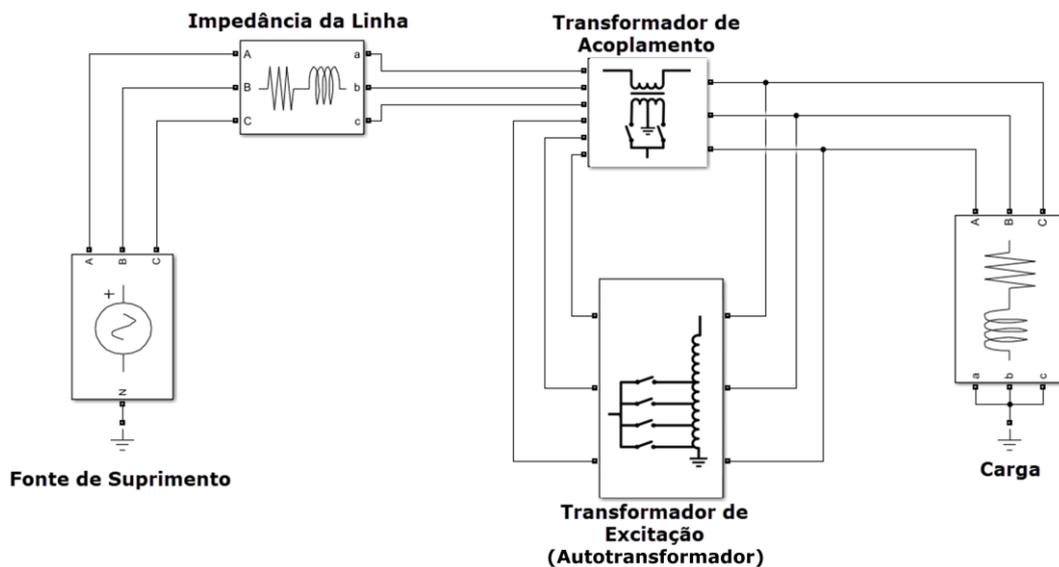
3.5 Avaliação comparativa do desempenho das topologias original e modificada do regulador

Como já considerado no início dos trabalhos, há duas possibilidades para a estrutura física da montagem dos transformadores que compõem o regulador. Numa delas o transformador de acoplamento se encontra a montante do de excitação e, numa versão modificada, os posicionamentos destas unidades são invertidos.

Em atenção à questão acima, todos os desenvolvimentos e estudos realizados até então primaram pela versão modificada, a qual, como mencionado, se mostraria mais atrativa devido aos

menores carregamentos impostos ao transformador de acoplamento. Por tal motivo, procede-se, a seguir, através do emprego dos modelos computacionais já postos, uma análise comparativa entre o desempenho operacional das duas versões quanto ao arranjo físico para o compensador. Para tanto, para se obter uma modelagem computacional do regulador originalmente proposto, basta inverter os pontos de conexão dos transformadores de acoplamento e de excitação, como apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Modelo computacional do sistema elétrico com a topologia original do regulador

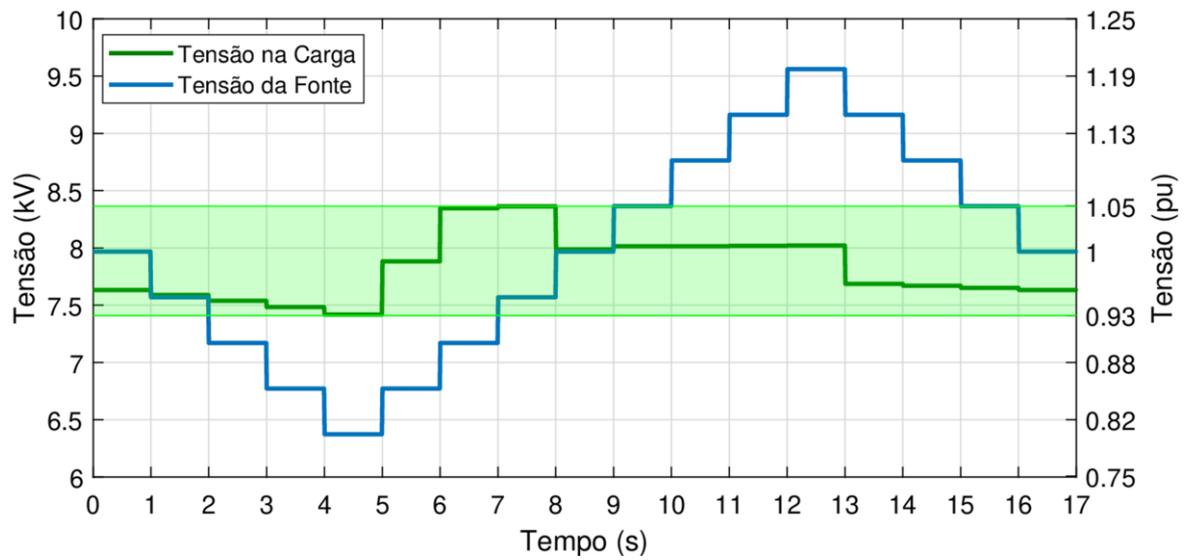


Fonte: O Autor.

Com vistas aos estudos comparativos, são realizadas novas simulações utilizando-se variações de tensão nos mesmos padrões já explorados anteriormente. Assim, são impostas variações da tensão do suprimento decaindo e depois elevando em degraus de 5%, respeitados os mesmos intervalos de tempo.

Assim, a Figura 3.14 ilustra as tensões da fonte de suprimento e nos terminais da carga sob a ação do processo de compensação nos termos originais. Como se observa, indiscutivelmente, a eficácia da regulação é notória.

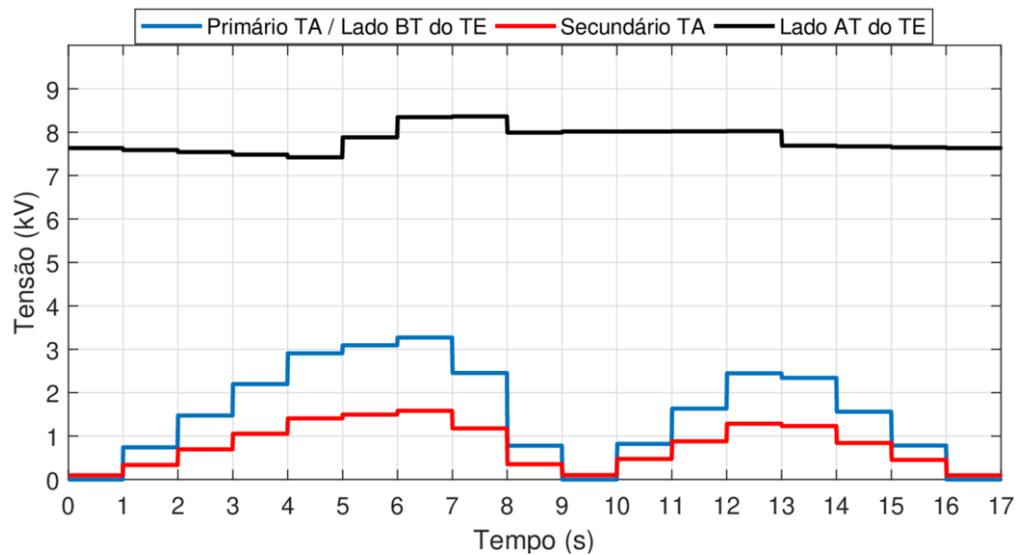
Figura 3.14 – Tensão na fonte de suprimento e na carga – valores eficazes por fase



Fonte: O Autor.

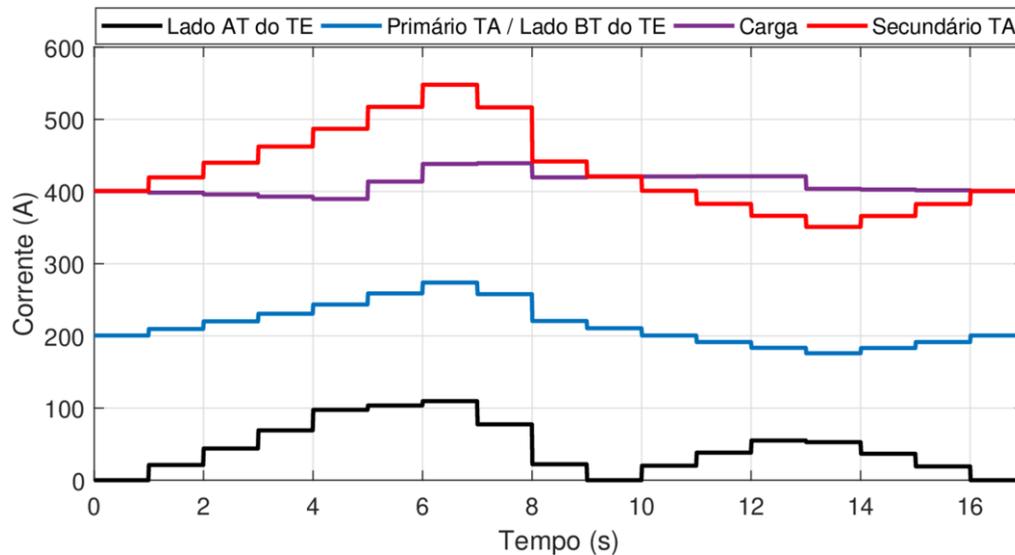
Quanto aos níveis das tensões e correntes nos transformadores de acoplamento e de excitação, estas se encontram nas Figura 3.15 e Figura 3.16.

Figura 3.15 – Tensões nos transformadores de acoplamento e de excitação do regulador



Fonte: O Autor.

Figura 3.16 – Correntes nos transformadores de acoplamento e de excitação do regulador



Fonte: O Autor.

A Tabela 3.12 apresenta uma síntese das tensões e correntes máximas requeridas para os dois transformadores (acoplamento e de excitação). De um modo geral, as grandezas se mostram próximas. Por exemplo, na estrutura original o transformador de excitação está conectado diretamente no barramento da carga, então sua tensão é a mesma da carga. Todavia, ao se observar as correntes, reconhece-se que, com a mudança da topologia, a corrente no secundário do transformador de acoplamento foi reduzida de 547,9 A para 439 A, e, por consequência, a do primário passou de 273,9 A para 219,5 A. Esta é a principal propriedade atrativa para o uso da topologia modificada.

Tabela 3.12 – Comparação entre as máximas grandezas elétricas para as duas topologias do regulador

Parâmetro	Primeira Versão do Regulador	Regulador com Topologia Modificada
Tensão no lado AT do TE	8,36 kV	9,28 kV
Tensão no lado BT do TE / Tensão no Primário TA	3,27 kV	3,15 kV
Tensão no Secundário TA	1,58 kV	1,53 kV
Corrente no lado AT do TE	109,6 A	104,3 A
Corrente no lado BT do TE/ Corrente no Primário TA	273,9 A	219,5 A
Corrente no Secundário TA	547,9 A	439 A

3.6 Considerações finais

Esse capítulo dedicou-se à aplicação das formulações matemáticas que regem a operação do regulador de tensão para uma situação específica, e assim, indicar os procedimentos para a obtenção das principais grandezas de operação (tensões, correntes e potências) associadas com os transformadores de excitação e acoplamento. Com isso, ficou evidenciado o processo de cálculo que conduzirá, certamente, as informações requeridas pelos projetistas para fins do dimensionamento físico dessas unidades que perfazem o compensador em pauta.

Objetivando uma sistematização para os processos de análise do desempenho do dispositivo assim especificado, foram então realizados trabalhos destinados a modelar computacionalmente um arranjo elétrico radial junto ao qual foi inserido o regulador focado nessa dissertação. Para tanto, o recurso empregado foi o software MATLAB/Simulink o qual apresenta recursos no domínio do tempo para estudos operacionais sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente. Não obstante tais propriedades, seu uso nesse trabalho, ficou restrito a avaliações do comportamento do complexo sob condições de regime permanente, já que esta é a propriedade principal almejada no escopo dos trabalhos.

Uma vez estabelecido o modelo computacional, através de um arranjo elétrico radial típico, foram conduzidas as investigações de desempenho que ratificaram, diante de uma grande gama de variações de tensão impostas para a fonte de suprimento, a eficácia da proposta. Também, com base nos casos avaliados, ficou evidenciada a potencialidade do software em determinar, para cada situação prática imposta, os valores para as diversas grandezas envolvidas (tensões, correntes e potências), as quais, certamente, servem como indicativos balizadores para uma análise da adequação do produto aos requisitos impostos durante as ações de regularização das tensões de suprimento.

Com vistas a correlacionar as topologias construtivas original e modificada, foram também realizados estudos que culminaram por evidenciar que a proposta feita nessa dissertação conduz a carregamentos menores para o transformador de acoplamento, fato este decisivo para uma redução de sua potência. De fato, tomando por base as correntes para esta unidade, constatou-se que a concepção alternativa requer uma corrente de aproximadamente 80% daquela da estrutura original.

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISE MAGNÉTICA DO TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO

4.1 Considerações iniciais

Tendo em vista tratar-se de uma configuração distinta das convencionais, os trabalhos foram iniciados através de uma revisão da estrutura física do regulador de tensão, seu princípio operacional, equacionamentos que determinam as correlações entre os parâmetros e grandezas envolvidas no processo. De um modo geral, constatou-se que o equipamento tratado, aqui denominado por regulador eletromagnético de tensão, o qual mereceu, em trabalhos anteriores, a sigla RET, se apresenta constituído por três componentes básicos: um transformador de excitação, um transformador de acoplamento e um sistema de controle/chaveamento de tapes.

No que tange a unidade de excitação, a mesma funciona em consonância com princípios bem estabelecidos pela tecnologia, visto que a mesma se apresenta fundamentada na clássica operação sob condições de uma tensão imposta, enquanto que sua corrente é resultante do suprimento de potência a que se destina. O mesmo se apresenta com uma estrutura construtiva própria de um autotransformador, suprido pela tensão da rede de alimentação da carga e possuindo um conjunto de tapes. Estes se destinam a alimentação de uma outra unidade eletromagnética, aqui tratada por transformador de acoplamento ou série. Este dispositivo, por sua vez, se apresenta com uma operacionalidade distinta dos transformadores convencionais, visto que seu primário opera com uma tensão imposta, advinda de um dos tapes do transformador de excitação, enquanto que seu secundário, em série com o alimentador possui uma corrente imposta e igual àquela que alimenta a carga.

À luz da particularidade do funcionamento do transformador série, surge a questão das condições magnéticas impostas ao seu núcleo. Essa informação, como sabido, é decisiva para o projeto de construção desse componente.

Visando, pois, a conhecer as condições magnéticas manifestadas no núcleo do então transformador de acoplamento, esse capítulo encontra-se centrado na proposição, implementação e utilização de meios que conduzam a uma clara identificação das propriedades operativas ora descritas.

Para o atendimento a tais requisitos, uma das ferramentas de maior difusão no meio científico encontra-se apoiada na utilização de programas que utilizam as técnicas de modelagem por elementos finitos, os quais, como se sabe, uma vez caracterizada a geometria construtiva, os materiais empregados, dentre outros, permitem uma determinação pontual dos níveis de indução impostos e que nortearão futuros projetos. Sem entrar nas particularidades dos diversos programas comerciais hoje disponíveis, pelo fato do software ANSYS ser um recurso disponível nos laboratórios de Qualidade da Energia da UFU, esta foi a ferramenta empregada. Maiores informações sobre este software serão fornecidas na sequência.

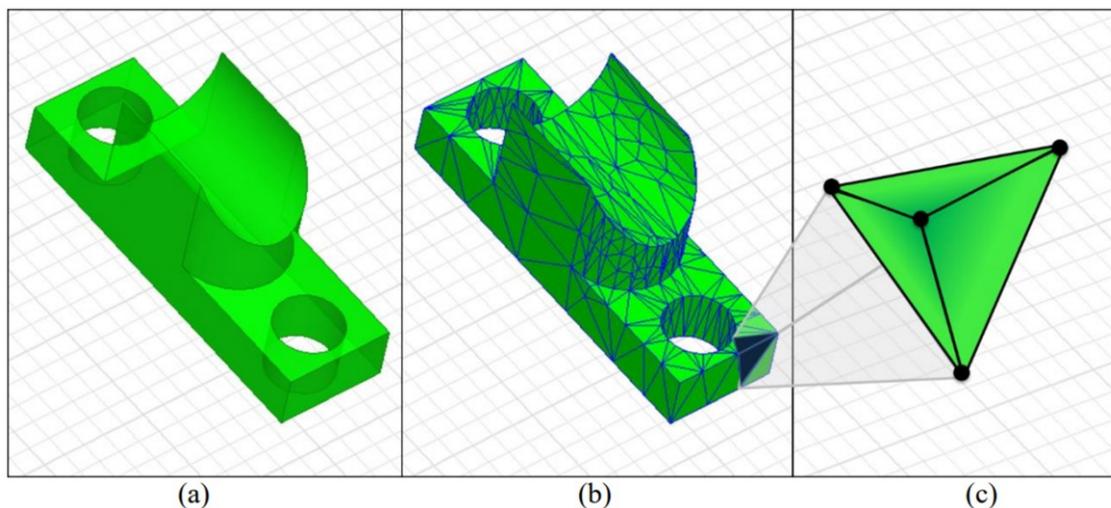
Uma vez feita a modelagem do transformador de acoplamento no programa, várias condições operativas foram investigadas para uma unidade física disponível na forma de um protótipo de produto. Para esse, suas características construtivas e operacionais são, à priori, conhecidas e empregando-se distintas situações quanto ao seu funcionamento, são investigadas as questões magnéticas aqui requeridas.

Assim procedendo, serão obtidas informações para embasar projetos e construção deste componente, com destaque ao seu núcleo magnético.

4.2 Características do simulador ANSYS®

Ferramentas que utilizam o método numérico baseado nas técnicas de elementos finitos (MEF) se apresentam como meios indicados para a solução de fenômenos eletromagnéticos associados a modelos com geometria complexa, haja vista que esse consiste em resolver problemas através da subdivisão da geometria em partículas menores (denominados elementos finitos), conectados por meio de pontos discretos (chamados de nós) [29]. O conjunto de elementos finitos da geometria é intitulado de malha. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de construção geométrica básica do MEF em problemas tridimensionais.

Figura 4.1 – Exemplo de definição do MEF. (a) problema de geometria complexa, (b) discretização do problema, (c) geometria simples (tetraédrico)



Fonte: [30]

Com a obtenção da malha e seus respectivos nós, soluções aproximadas podem ser introduzidas para as variáveis dependentes no interior de cada elemento. Essas variáveis são expressas como funções arbitrárias dos valores que as incógnitas assumem nos nós, e são chamadas de funções de interpolação. Além do mais, são estabelecidas condições para garantir a continuidade da solução nos nós compartilhados por vários elementos. As incógnitas do problema (graus de liberdade) passam a ser os valores das variáveis de campo nos pontos nodais, sendo que o número de grau de liberdade (agora finito) depende da ordem, do número de elementos e variáveis dependentes [31].

Em particular, para a solução de problemas que envolvem campos magnéticos, utiliza-se as conceituadas equações de Maxwell para uma região finita do espaço, estabelecendo as condições de contorno adequadas. Desse modo, com as condições iniciais previamente especificadas pelo usuário, é possível, através do MEF, obter uma solução numérica do problema tratado [32].

Entre os softwares empregados que utilizam a técnica de elementos finitos, foi definida a plataforma ANSYS para realização dos estudos implementados nesse capítulo, mais especificamente, o software ANSYS Maxwell. Entre as considerações para essa escolha, pode-se mencionar o reconhecimento dessa ferramenta na comunidade científica e acadêmica, a simplicidade na interface com o usuário e a possibilidade de estudos multifísicos que permitem avaliar o mesmo modelo perante diferentes aspectos. Tendo em vista os fatores citados, o ANSYS se tornou a ferramenta padrão para estudos relacionados aos MEF nos laboratórios de Qualidade da Energia da UFU.

Para a definição e solução da problemática através do MEF, são necessárias três etapas de desenvolvimento, quais sejam, (a) Pré-processamento; (b) Processamento e (c) Pós-processamento.

- (a) Pré-processamento: nessa primeira etapa é estabelecida a definição da estrutura que será modelada, inserindo os dados geométricos e características físicas de cada material. Ademais, também são determinadas as condições de contorno do problema e indicada a malha dos elementos finitos;
- (b) Processamento: essa etapa se destina a avaliar as informações anteriormente definidas, empregando-se, para tanto, equações diferenciais que envolvem o problema físico em questão;
- (c) Pós-processamento: por fim, os resultados dos estudos realizados são disponibilizados através de valores numéricos e gráficos. Portanto, o usuário poderá analisar a solução do problema, realizar cálculos a partir dos resultados, plotar o comportamento do campo elétrico, magnético, corrente, tensão, entre outros.

Com base no recurso supramencionado, é feita, na sequência, a implementação do transformador série ou de acoplamento no simulador e realizados os estudos requeridos para o conhecimento das condições magnéticas impostas a esse componente do regulador de tensão.

Vale destacar que, uma etapa fundamental para desenvolvimento de trabalhos computacionais consiste na validação do modelo. Dessa forma, optou-se por implementar no software de elementos finitos um protótipo de equipamento disponibilizado pelo laboratório de Qualidade da Energia da UFU, para os quais suas informações de projeto e construção encontram-se também disponibilizadas.

4.3 Modelagem do transformador de acoplamento no software ANSYS

O primeiro passo para a implementação de um produto no software de análise empregado nessa dissertação consiste no conhecimento das suas características geométricas. Para tanto, em substituição a um tratamento genérico da matéria, foi feita a opção pelo direcionamento das diversas etapas do processo de implementação do transformador de acoplamento tendo em vista o protótipo de equipamento disponível no laboratório. Esse é ilustrado na Figura 4.2, o qual corresponde a um dispositivo monofásico, cujas principais características operacionais são apresentadas na Tabela 4.1. Vale destacar que as informações constantes na tabela foram fornecidas pelo fabricante, as quais foram ainda complementadas através de ensaios feitos no laboratório da UFU.

Figura 4.2 – Protótipo do transformador de acoplamento ou série utilizado para as simulações.



Fonte: [33]

Tabela 4.1 – Principais Características Elétricas do transformador

Parâmetro	Primário	Secundário
Potência	1000 VA	
Frequência	60 Hz	
Classe de Isolação	0,6 kV	
Perdas a vazio	39,90 W	
Perdas Curto	33,6 W	
Material	Cobre	
Tensão	220 V	22 V
Corrente	4,55 A	45,55
Resistência	0,517 Ω	0,012 Ω
Quantidade de espiras	150	15
Material do núcleo	Lâminas de aço silício de grão não orientado (GNO)	

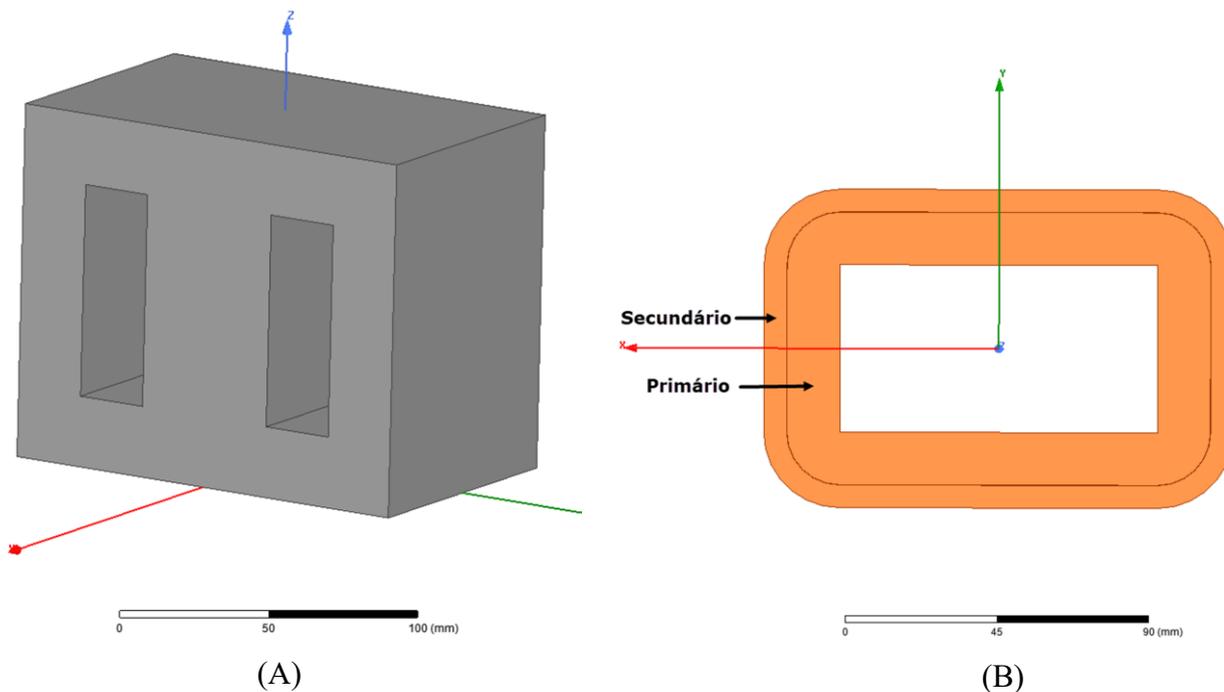
Somado às características elétricas e construtivas supra indicadas, o fabricante também forneceu dados de projeto que conduziram ao pleno conhecimento de suas dimensões físicas

construtivas. Com base nestes dados e outros constantes na tabela 4.1, foram então realizados os trabalhos de implementação do dispositivo por meio da ferramenta gráfica disponibilizada pelo software ANSYS Maxwell.

A Figura 4.3 mostra, de forma genérica, a estrutura física do núcleo e dos enrolamentos que perfazem o transformador. O núcleo é mostrado em seu perfil e os enrolamentos através de uma vista superior. Vale destacar que, muito embora as figuras (A) e (B) se mostrem como um corpo sólido, estes são tratados, no programa, levando-se em conta questões próprias as suas construções, a exemplo da quantidade de espiras, camadas de cada enrolamento e especificidade das chapas metálicas que constituem o núcleo. É importante ressaltar que as imagens utilizadas nesse capítulo referentes à simulação em elementos finitos são cortesia da ANSYS, Inc.

Figura 4.3 – (A) Geometria do núcleo magnético

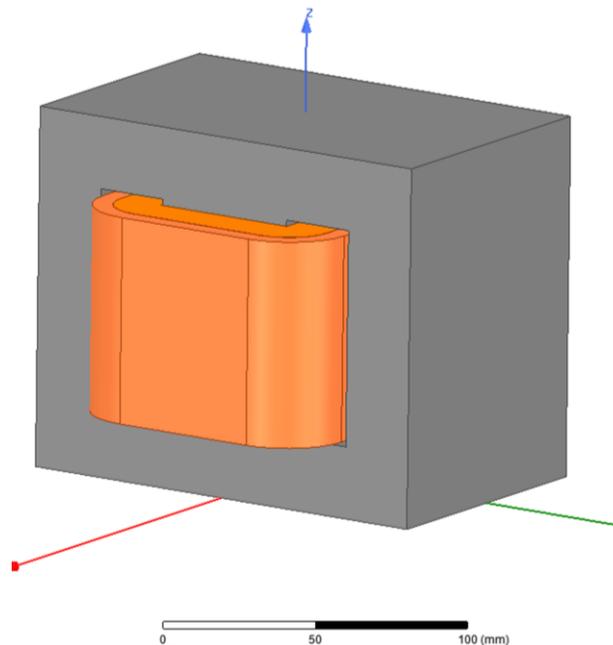
(B) Geometria dos enrolamentos



Fonte: O Autor.

A composição final do transformador é indicada na Figura 4.4, a qual representa a junção das duas partes anteriormente mencionadas. A estrutura então obtida, como se constata, é bastante elucidativa do produto focado na pesquisa.

Figura 4.4 – Estrutura física do transformador objeto da simulação



Fonte: O Autor.

Na sequência, é feita a parametrização dos materiais que formam o transformador. Para tanto são requeridos seus dados elétricos e magnéticos.

Iniciando pelos enrolamentos, esses são formados por fios de cobre, cujas características elétricas estão descritas na Tabela 4.2. Os valores indicados encontram-se disponibilizados na própria biblioteca do software.

Tabela 4.2 – Propriedades do cobre inseridos no ANSYS Maxwell

Parâmetro	Valor
Condutividade	58E6 [S/m]
Permeabilidade Relativa	1,0
Densidade de Massa	8933 [Kg/m ³]

Quanto ao núcleo ferromagnético, que se apresenta como cerne dos estudos, suas propriedades, associadas com o aço silício M530-50 [34], encontram-se destacadas na Tabela 4.3. Como esse componente se apresenta constituído por um conjunto de lâminas justapostas, torna-se necessário o estabelecimento de uma grandeza denominada por fator de empilhamento (*stacking factor*) do núcleo. Esse fator encontra-se relacionado com a montagem das chapas, cujo resultado será

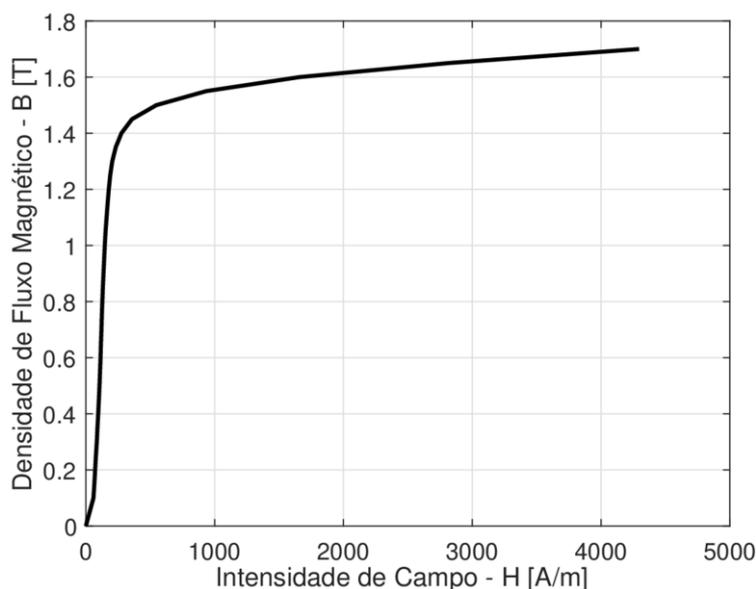
um volume total composto por chapas magnéticas propriamente ditas e os pequenos espaçamentos de isolamento empregados para a montagem do núcleo [35].

Tabela 4.3 – Características do cobre dos enrolamentos

Parâmetro	Valor
Condutividade	1,96E6 [S/m]
Densidade de Massa	7650 [Kg/m ³]
Espessura da laminação	0,4 mm
Fator de Empilhamento	0,958

Uma outra informação de extrema importância para a qualidade dos resultados dos estudos refere-se à relação B-H do material, a qual é indicada na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Relação B-H do aço silício M530-50A [34]



Fonte: O Autor.

Por fim, resta o fornecimento das perdas do transformador. Nesse sentido, foi definido o modelo de Steinmetz para determinação das perdas. É importante ressaltar que seu valor total por unidade de volume (P_v) é definido pela composição de três parcelas: perdas por histerese (P_h), perdas por correntes parasitas (P_c) e perdas adicionais (P_e). Essa relação é apresentada na equação (4.1).

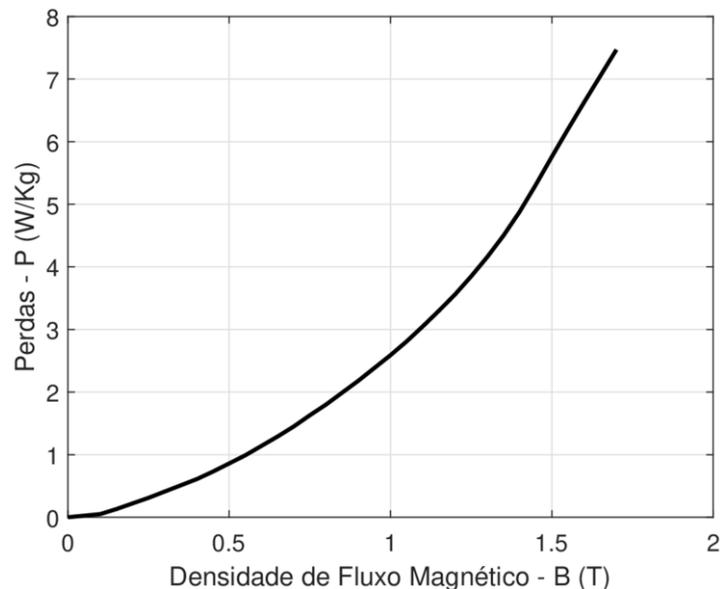
$$P_v = P_h + P_c + P_e = K_h \cdot f \cdot (B_m)^2 + K_c \cdot (f \cdot B_m)^2 + K_e \cdot (f \cdot B_m)^{1,5} \quad (4.1)$$

Onde:

- K_h , K_c e K_e – São os coeficientes de perdas por histerese, correntes parasitas e adicionais, respectivamente.
- f – Frequência;
- B_m – Valor máximo da densidade de fluxo magnético.

Para a definição dos coeficientes de perdas, o software utiliza os dados da curva B-P (indução versus perdas), como mostrado na Figura 4.6. Adicionalmente, deve-se ainda contar com dados relativos a espessura da lâmina (0,4 mm) e a condutividade $1,96E6$ [S/m]. A partir dos dados fornecidos, o software calcula os coeficientes de perdas.

Figura 4.6 – Curva B-P do material M530-50A [34]



Fonte: O Autor.

Quanto ao meio físico onde o transformador se encontra inserido, sendo este construído a seco, o material que representa o meio que envolve o conjunto formado pelo núcleo e enrolamentos corresponde ao ar. Por tal motivo, foi utilizada a permeabilidade relativa unitária do vácuo para a região que o envolve.

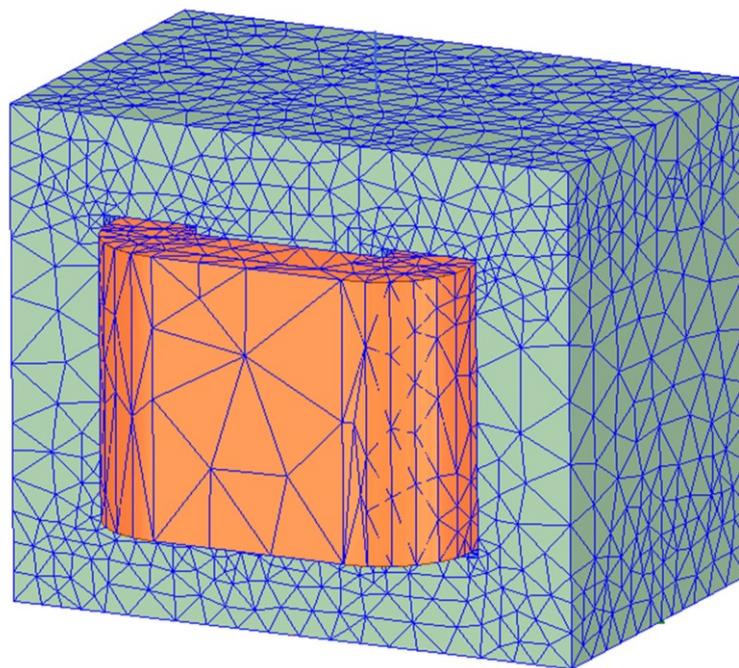
Feita a implementação nos termos acima postos, resta, agora, a definição das grandezas associadas com o que se denomina por condições de contorno. Para tanto, foi definida uma região retangular como o domínio dos estudos, destacando-se que, o arranjo físico que corresponde ao transformador sob investigação, deve, obrigatoriamente, estar inserido dentro dessa área. Portanto, a região definida possui uma dimensão de cinco vezes a do transformador.

Uma outra consideração de grande relevância para a solução numérica do problema corresponde à malha sobre o modelo implementado. Essa destina-se a decomposição do domínio original em vários outros, de onde é derivado o método “elementos finitos”.

Para cada um desses elementos é aplicada, separadamente, uma série de equações de solução que irão compor o resultado final. Esse corresponde, pois, a associação dos desempenhos obtidos para cada elemento [36]. Portanto, uma malha com poucos elementos, ou impropriamente distribuída, poderá acarretar em grandes erros na análise. Por outro lado, um número muito elevado de elementos irá exigir grandes esforços computacionais.

Assim, para gerar a malha, foi utilizada uma ferramenta do software denominada malha auto adaptativa, dessa forma, o programa produz automaticamente uma malha adequada e com um grau de precisão satisfatório para a solução do problema [29]. A malha final está indicada na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Malha de elementos finitos para o transformador



Fonte: O Autor.

Por fim, o modelo irá ainda requerer:

- As excitações de cada enrolamento, ou seja, as tensões e correntes atreladas com o primário e secundário;
- O número de espiras de cada bobina. Para o caso em pauta, 150 espiras para o primário e 15 espiras para o secundário;
- As resistências de cada enrolamento, já indicadas na Tabela 4.1.

4.4 Estudos de casos

Novamente, é importante lembrar que o transformador de acoplamento se apresenta com o seguinte modo operativo:

- Ao seu primário é imposta uma tensão fornecida por um dos tapes do transformador de excitação, enquanto que sua corrente é uma consequência dessa grandeza no seu secundário;
- Ao seu secundário é imposta uma corrente igual à da carga, visto que este enrolamento se encontra conectado em série com o alimentador da carga.

Diante dessas condições, para fins de maior clareza das condições magnéticas a que fica sujeito o núcleo magnético dessa unidade, os estudos foram subdivididos em quatro casos, sendo que aquele que efetivamente representa a situação real de funcionamento corresponde ao caso C. Os demais são apenas investigações intermediárias que venham a esclarecer sobre as condições magnéticas a que o núcleo fica sujeito, assim como também suas respectivas grandezas elétricas (tensão, corrente e perdas).

Em consonância com o acima exposto foram selecionados então os seguintes estudos para apresentação e discussão nessa dissertação:

- Caso A – Apenas tensão imposta no enrolamento primário, com o secundário em circuito aberto;
- Caso B – Apenas corrente imposta no enrolamento secundário, com o primário em curto-circuito;
- Caso C – Tensão imposta no enrolamento primário e corrente imposta no secundário (situação de funcionamento no processo de regulação);
- Caso D – Apenas corrente imposta no enrolamento secundário, com o primário em circuito aberto.

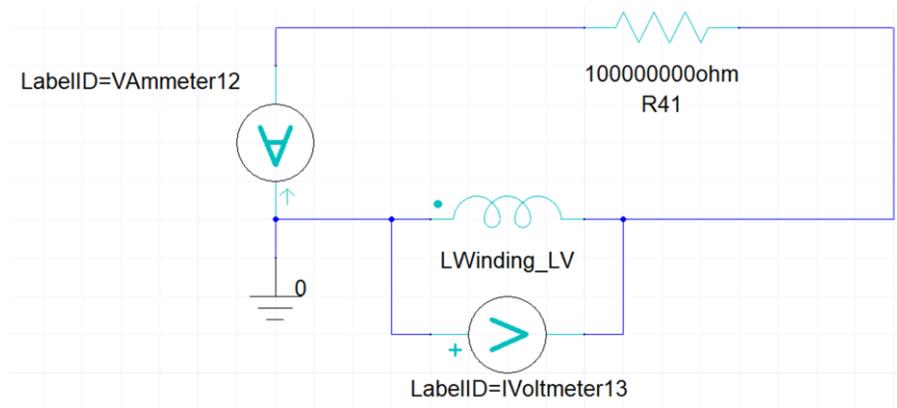
4.4.1 Caso A – Transformador operando com tensão imposta no primário e secundário aberto

Para essa caso foi empregada uma tensão eficaz imposta de 220 V (nominal), fato este que conduz a excitação definida pela equação (4.2). O termo exponencial da equação se apresenta como um artifício para a eliminação do tradicional fenômeno transitório de energização, visto que o interesse dessa pesquisa se restringe à análise em regime permanente.

$$v(t) = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - e^{1-60 \cdot t}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t) \text{ [V]} \quad (4.2)$$

Quanto ao enrolamento secundário, a situação correspondente ao denominado circuito aberto foi representada como indicado na Figura 4.8. A figura mostra que o secundário do transformador, representado pelo elemento *LWinding_LV* possui uma resistência de elevado valor. Os medidores destinam-se, naturalmente, ao registro das tensões e correntes associadas com a condição de funcionamento imposta.

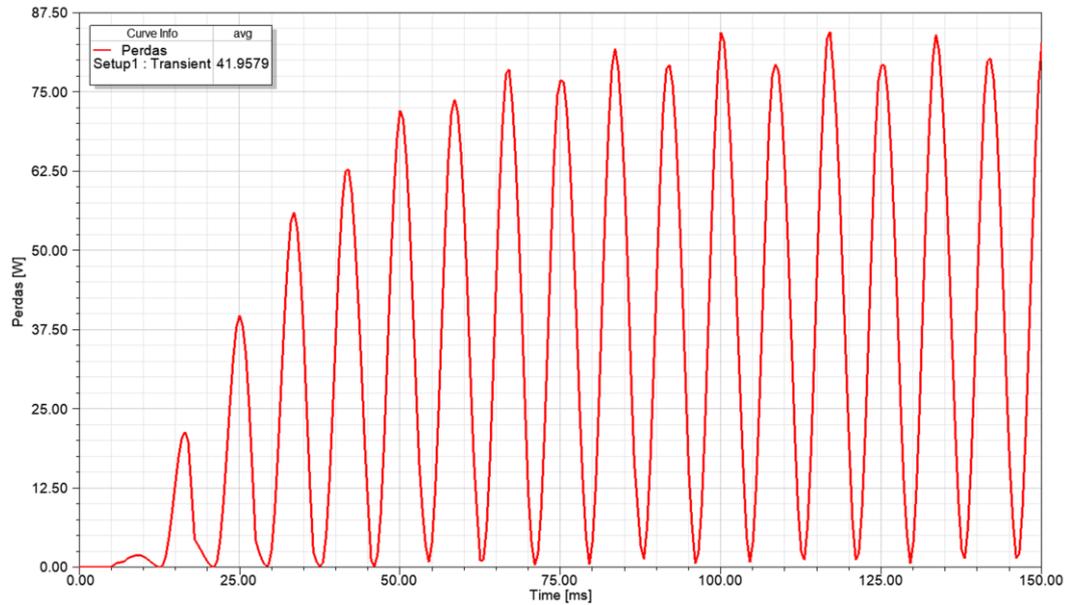
Figura 4.8 – Circuito representativo da conexão no secundário do transformador - Caso A



Fonte: O Autor.

Quanto aos resultados obtidos para os estudos, na Figura 4.9 tem-se as perdas ocorridas no núcleo. Esta figura representa as perdas instantâneas, que permitem conduzir ao valor médio requerido para as análises. Fica também esclarecido que o tempo de estudo compreendeu um intervalo de 150 ms, findo o qual praticamente já se obteve o regime estabilizado. Comparando o valor das perdas fornecidas pelo software (41,96 W) com as da Tabela 4.1 (39,90 W), percebe-se uma boa correlação, visto que o erro ficou nas imediações de 5%. Isso já oferece um primeiro indicativo que o material utilizado para a representação do núcleo se mostra compatível com o núcleo do protótipo.

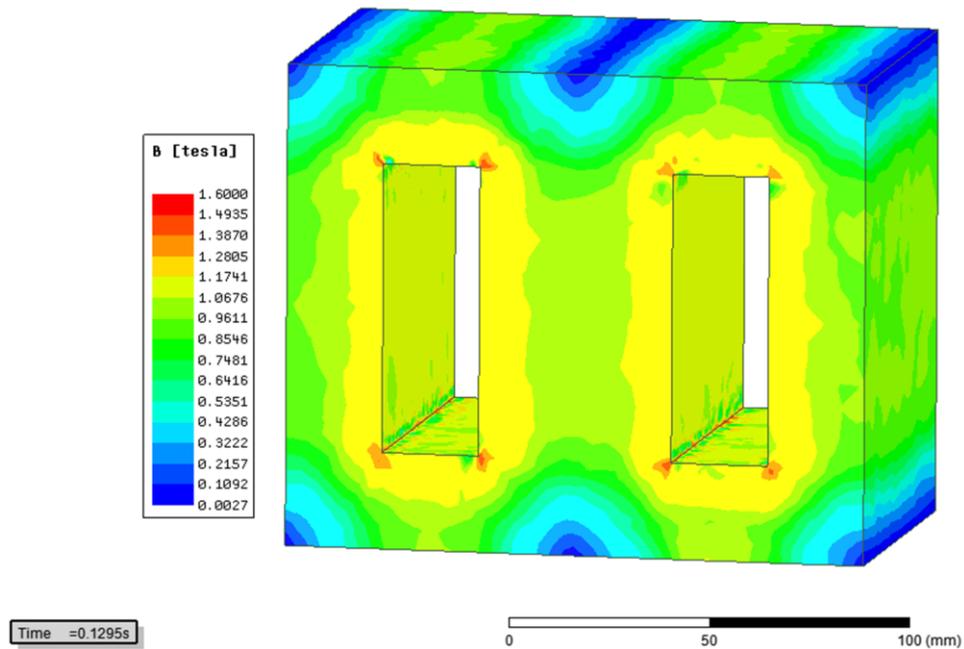
Figura 4.9 – Perdas no núcleo para o caso A



Fonte: O Autor.

A Figura 4.10 mostra, através de um mapeamento didático, os níveis atingidos para as densidades de fluxo magnético para cada região do transformador, já sob condições de regime permanente de funcionamento. Como o estudo é feito ao longo do tempo e as grandezas variam em consonância com as tensões impostas, é importante observar que a figura é indicativa das condições magnéticas associadas com o instante que o fluxo passa pelo seu maior valor. Observando-se os níveis das densidades de fluxo verifica-se que estes se apresentam em proporções típicas esperadas, conforme [37].

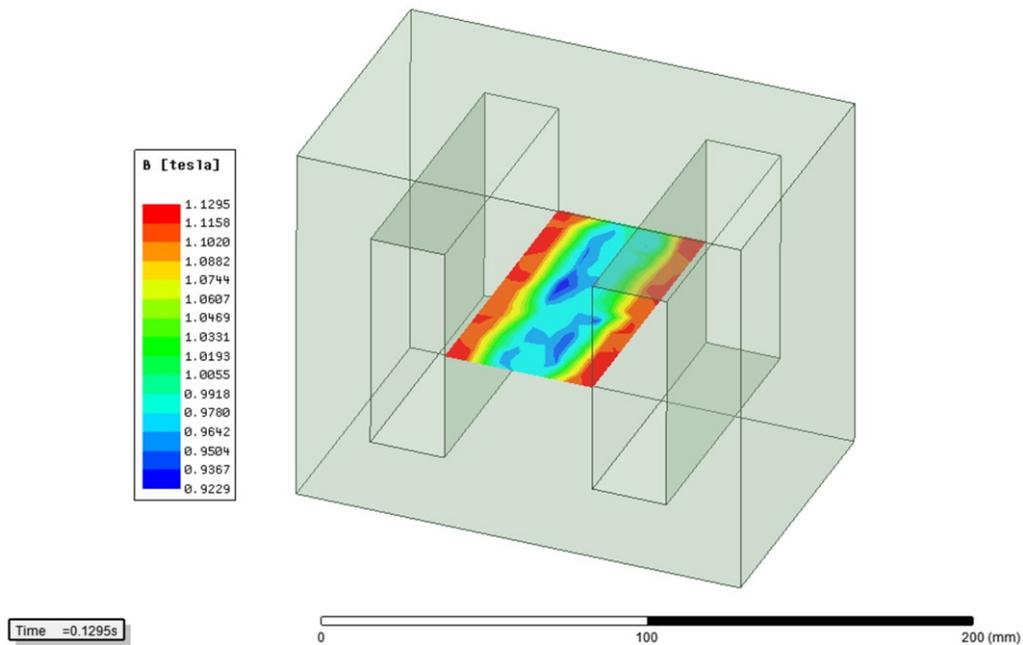
Figura 4.10 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – caso A – instante correspondente ao maior nível de magnetização



Fonte: O Autor.

Para maior clareza sobre os valores atingidos para as densidades de fluxo, foi estabelecida como referência a coluna central da unidade. Através das ferramentas disponibilizadas pelo software, o nível da densidade de fluxo magnético dessa região, indicada na Figura 4.11, mostra um valor máximo de 1,1295 T. Considerando que o valor fornecido pela fabricante foi de 1,22 T, fica, pois, estabelecido um segundo nível de validação do modelo estabelecido.

Figura 4.11 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – caso A



Fonte: O Autor.

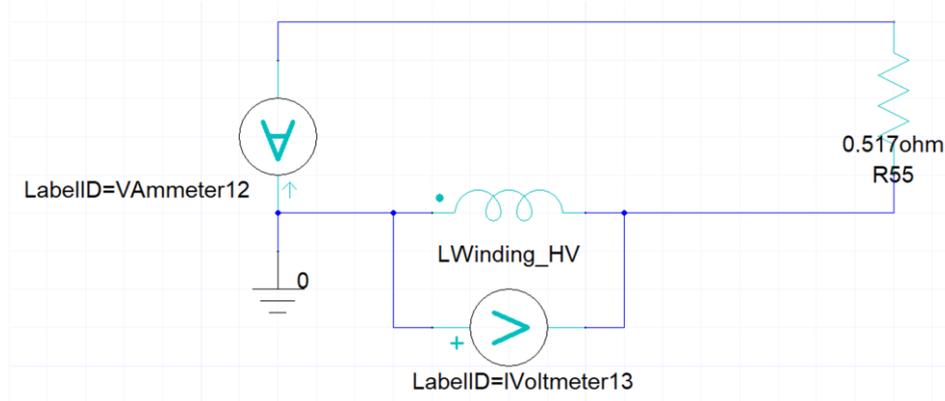
4.4.2 Caso B – Transformador operando com corrente imposta no secundário e primário em curto-circuito

Para os estudos em pauta foi empregada uma corrente de valor eficaz de 45,45 A (nominal), a qual foi imposta ao enrolamento secundário. Assim, na forma instantânea, a referida grandeza corresponde à expressão (4.3).

$$i(t) = 45,45 \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - e^{1-60t}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t) \text{ [A]} \quad (4.3)$$

Quanto ao primário, este enrolamento foi fechado em curto, como mostrado na Figura 4.12. Como indica a figura, o primário foi representado pelo elemento *LWinding_HV* em série com a resistência do enrolamento. Também, observa-se a presença de medidores para fins dos registros das grandezas de interesse.

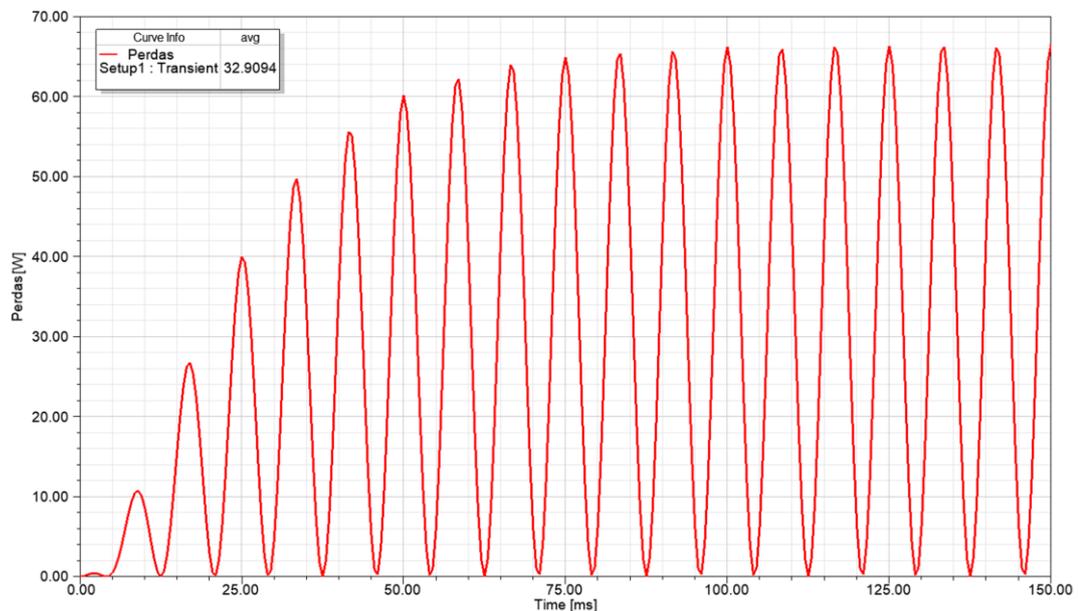
Figura 4.12 – Circuito representativo da conexão do primário do transformador - caso B



Fonte: O Autor.

Tal como anteriormente, a Figura 4.13 mostra o comportamento da potência instantânea dissipada no enrolamento secundário, a qual possui um valor médio de 32,91 W. Tendo em vista que o valor indicado na Tabela 4.1 é de 33,6 W para as perdas em curto circuito, isto evidencia uma boa correlação entre os resultados da simulação e aqueles esperados.

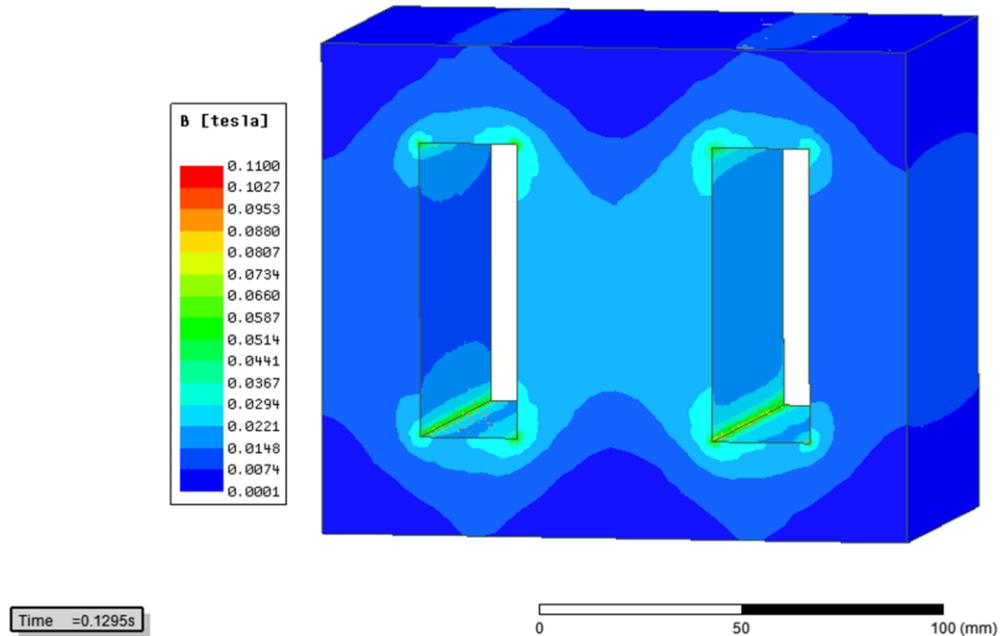
Figura 4.13 – Gráfico das perdas nos enrolamentos para o caso B



Fonte: O Autor.

Já a Figura 4.14 mostra a distribuição da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador. Como se constata, os níveis atingidos para esta grandeza são indicativos de um funcionamento com muito baixo nível de saturação.

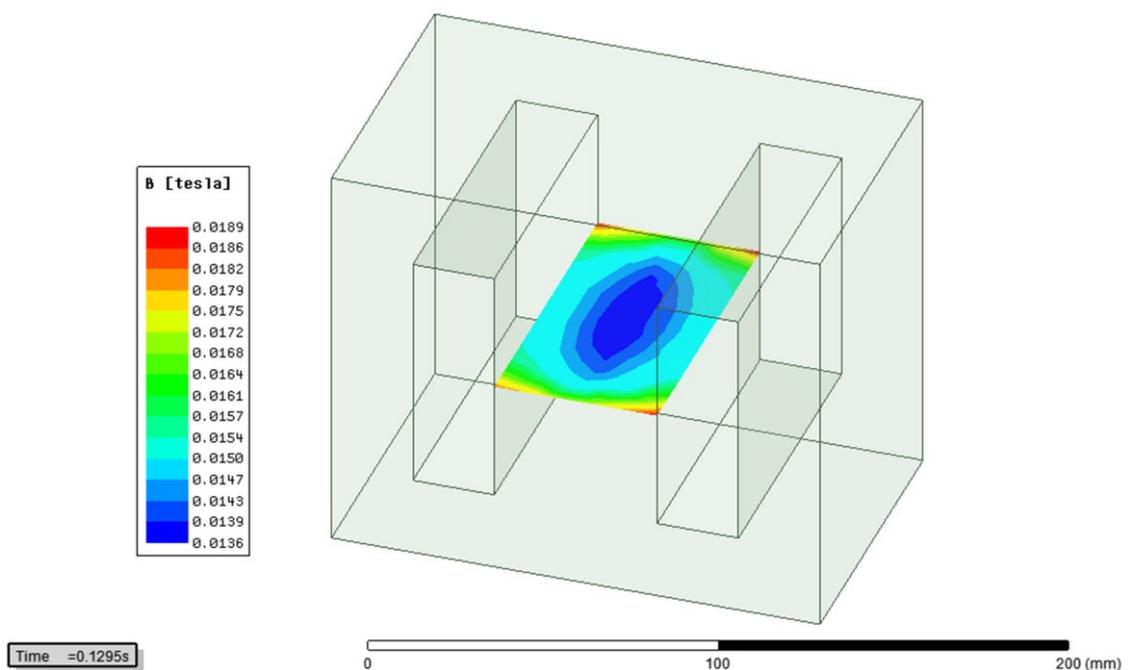
Figura 4.14 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – caso B – instante correspondente ao maior nível de magnetização



Fonte: O Autor.

Complementarmente, a Figura 4.15 evidencia que o valor máximo para a densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador é de 0,0189 T, ratificando, assim, a constatação de uma condição operacional com saturação muito baixa.

Figura 4.15 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – caso B



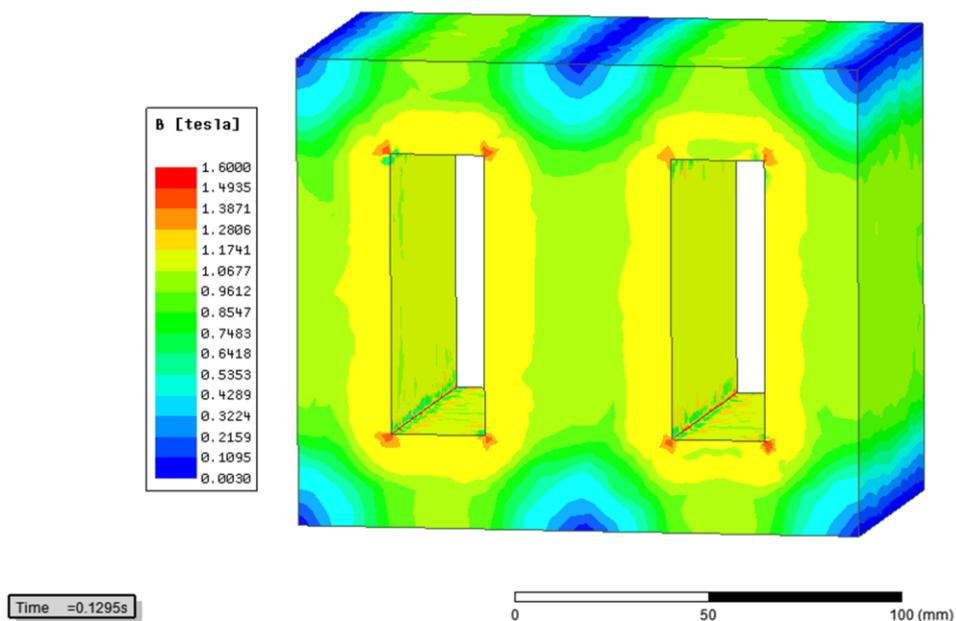
Fonte: O Autor.

4.4.3 Caso C – Transformador operando com tensão imposta no enrolamento primário e corrente imposta no secundário

A situação operacional identificada como Caso C, por sua vez, já expressa uma condição de funcionamento compatível com o compensador em atuação dentro dos padrões normais. De fato, essa investigação se apresenta revestida do objetivo de analisar o desempenho do transformador de acoplamento com tensão imposta no primário e, concomitantemente, uma corrente imposta no seu secundário, nos termos explicitados pelas equações (4.2) e (4.3).

A Figura 4.16 ilustra os níveis de densidade de fluxo magnético a que fica sujeito o núcleo do transformador. Através de uma mera inspeção visual fica transparente uma boa correlação com as condições de magnetização obtidas para o caso A.

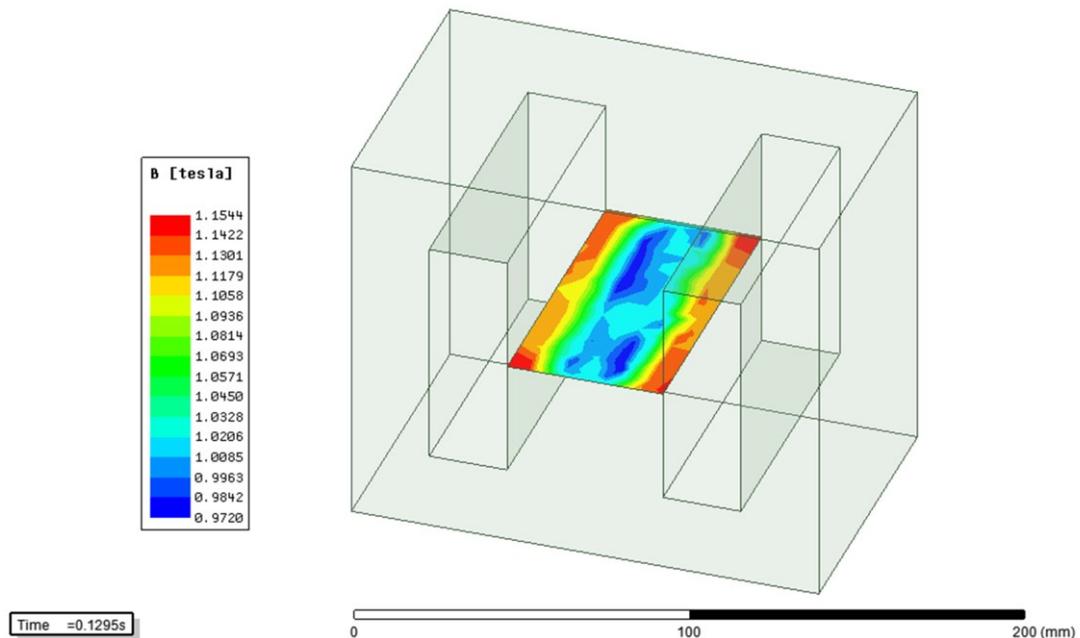
Figura 4.16 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – Caso C – instante correspondente ao maior nível de magnetização



Fonte: O Autor.

Através da mesma estratégia utilizada para os casos precedentes, na Figura 4.17 tem-se uma identificação detalhada do fluxo na coluna central do transformador.

Figura 4. 17 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – Caso C



Fonte: O Autor.

Os resultados supra apresentados evidenciam que a densidade de fluxo magnético máxima presente no núcleo do transformador, para o caso em análise, é de 1,1544 T, portanto, muito próxima do valor encontrado para o Caso A, de 1,1295 T. Observando a mesma grandeza para o Caso B, sob tal condição operativa chegou-se a um valor extremamente reduzido, de 0,0189 T.

Esses resultados indicam, pois, que o nível de saturação imposto ao núcleo magnético do transformador de acoplamento é definido apenas pela tensão advinda dos tapes do transformador de excitação. Portanto, a presença de uma corrente imposta no seu secundário não influencia o estado de magnetização do dispositivo.

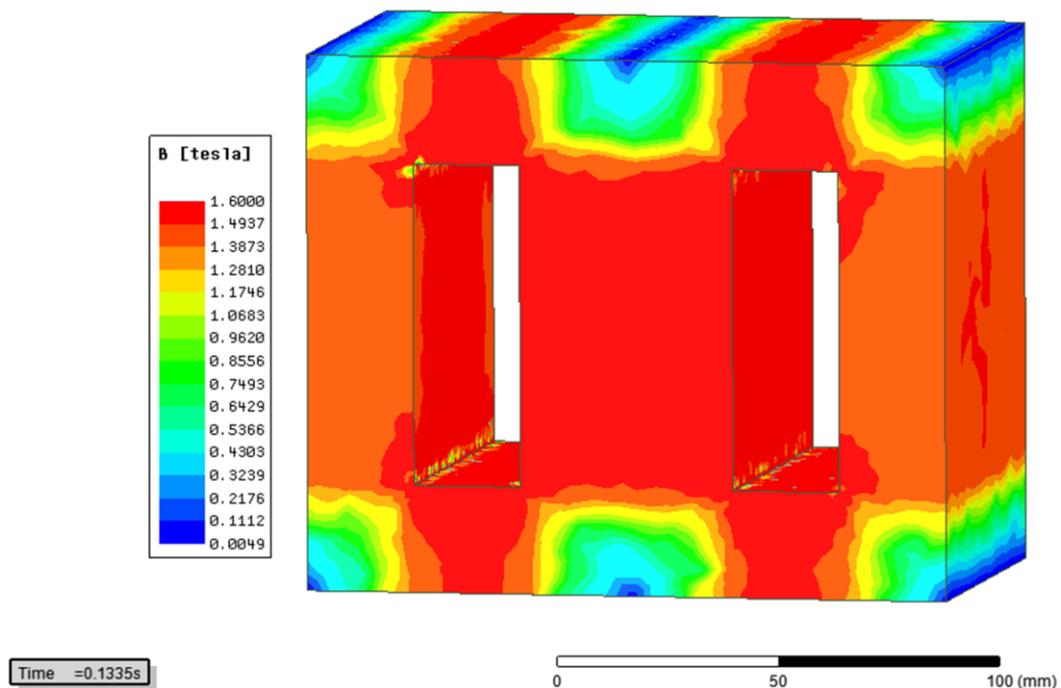
4.4.4 Caso D – Transformador operando com corrente imposta no enrolamento secundário e primário em aberto

Para o caso em pauta, o enrolamento secundário é alimentado por corrente nominal imposta, nos termos já definidos pela equação (4.3), e, ao mesmo tempo, o primário está em circuito aberto. A situação ora posta se apresenta como uma condição anormal e já explorada quando do emprego dos transformadores de corrente utilizados em medição ou proteção. Para estes, como se sabe, o funcionamento com circuito aberto no seu secundário estabelece níveis perigosos, na forma de sobretensões elevadíssimas, que podem implicar em riscos de vida para os operadores e danos físicos em equipamentos. Assim, a análise aqui feita visa, sobremaneira, a evidenciar estes fenômenos e

indicar que, a exemplo da prática utilizada para os TCs, a qual determina que, estando um enrolamento sujeito a uma corrente imposta, o outro deverá estar obrigatoriamente em curto-circuito, para o transformador de acoplamento também deve obedecer a essa condição.

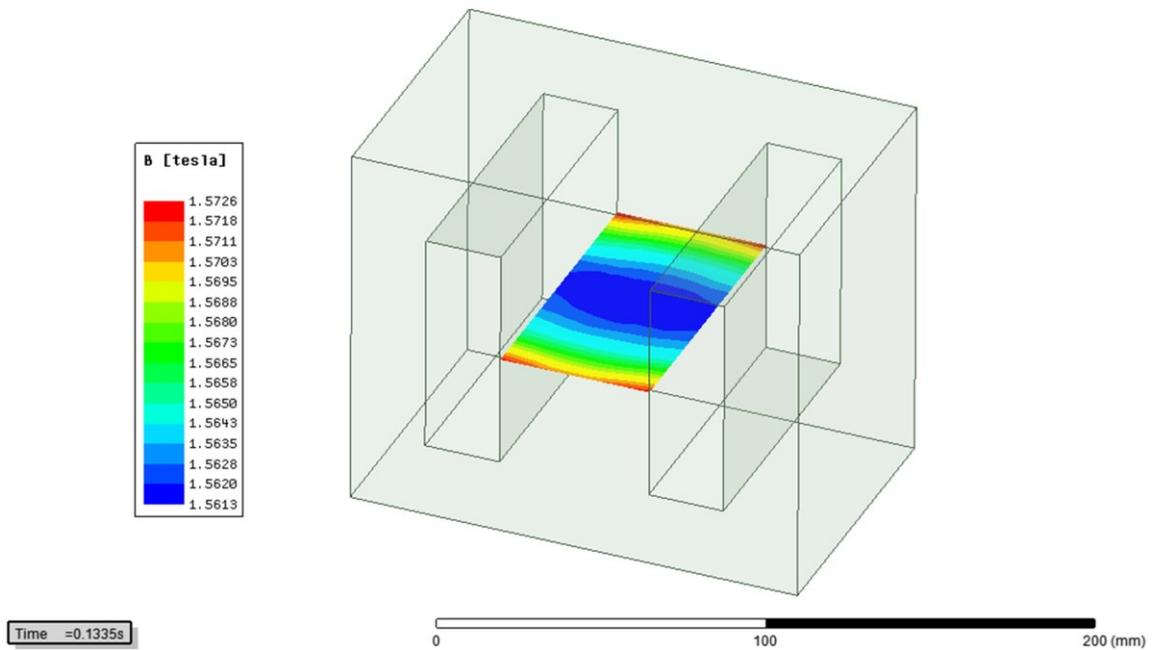
Aplicando-se, pois, a corrente já utilizada para os casos anteriores e analisando as condições de magnetização impostas ao núcleo magnético, as Figura 4.18 e 4.19 ratificam o exposto. Nessas verifica-se que os níveis de indução magnética se apresentam em proporções muito elevadas, induzindo, com conseguinte, as já citadas sobretensões no enrolamento em aberto.

Figura 4.18 – Mapa da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador – caso D – instante correspondente ao maior nível de magnetização



Fonte: O Autor.

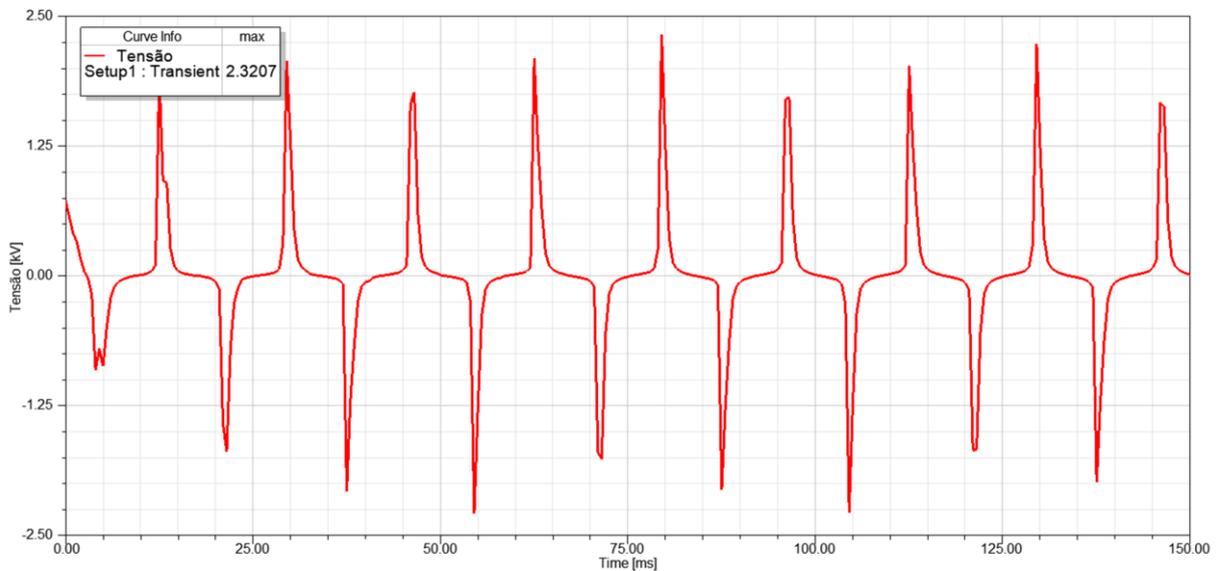
Figura 4.19 – Densidade de fluxo magnético na coluna central do transformador – caso D



Fonte: O Autor.

Nos termos postos, as tensões nos terminais do primário do transformador de acoplamento chegam a alcançar uma magnitude 7,5 vezes superior ao valor nominal, atingindo, para o caso em estudo, um pico de tensão de 2,32 kV. Este fenômeno é indicado na Figura 4.20, a qual corresponde ao comportamento instantâneo da tensão induzida no primário do transformador.

Figura 4.20 – Tensão no primário do transformador



Fonte: O Autor.

4.5 Considerações finais

A motivação para os trabalhos conduzidos nesse capítulo focou, de forma pontual, o conhecimento das condições magnéticas impostas ao núcleo do transformador de acoplamento, haja vista que essa unidade, como explicado, opera de forma atípica quando comparado com os transformadores convencionais.

Para tanto, dentre as opções passíveis e que poderiam oferecer as respostas aos questionamentos feitos, a ferramenta de análise escolhida recaiu sobre o emprego de uma das mais apropriadas técnicas para o tratamento da matéria, a saber, a plataforma ANSYS, a qual utiliza o método de elementos finitos para as mais distintas aplicações, das quais se destaca o mapeamento dos níveis de indução magnética manifestados e outras características de desempenho. Tendo em vista que o software empregado se constitui num produto comercial de amplo uso nos mais diversos campos da engenharia, o mesmo foi resumidamente apresentado, com destaque às suas propriedades voltadas para as investigações dos fenômenos eletromagnéticos.

Com base no recurso estabelecido, foram então desenvolvidos e esclarecidos os procedimentos voltados para a modelagem do transformador de acoplamento nos termos requeridos pelo programa. Para tanto, as primeiras ações envolveram a caracterização das configurações físicas, geométricas e outros parâmetros de entrada para uma plena representação da unidade eletromagnética em questão. Esta correspondeu a um protótipo de transformador de acoplamento disponível no laboratório de Qualidade de Energia, cujas informações atreladas com o seu projeto e construção foram disponibilizadas pelo fabricante.

Uma vez representado o transformador no software de análise, a próxima etapa foi direcionada para a caracterização das condições de excitação a serem impostas ao equipamento. Em função de sua especificidade funcional, foram selecionadas quatro condições de excitação.

O primeiro caso analisado foi simulado através da imposição de uma tensão igual ao valor nominal do equipamento. Esta foi aplicada nos terminais do enrolamento primário, com o secundário mantido em circuito aberto. Portanto, esta avaliação se assemelha a operação normal dos transformadores convencionais operando a vazio. Os resultados indicaram que o comportamento da densidade de fluxo magnético no núcleo se apresentou consistente com as expectativas, assim como também as perdas no ferro. De fato, comparando as grandezas de desempenho obtidas computacionalmente, com aquelas fornecidas pelo fabricante, chegou-se a uma boa correlação entre os valores, ratificando, assim, a adequação do modelo.

A condição subsequente consistiu numa imposição de uma corrente, cujo valor eficaz corresponde ao da carga suprida, mantendo-se o enrolamento primário em curto-circuito. Tal

investigação foi realizada com o objetivo de se conhecer os níveis de indução magnética advindos de uma excitação promovida tão somente pela corrente injetadas. Para este caso concluiu-se que os valores das densidades de fluxo se mostraram bastante reduzidas, levando o núcleo magnético a um ponto de operação bastante aquém do nível de saturação.

A terceira condição se apresentou de forma consonante com a operação típica a que o transformador de acoplamento seria submetido. Desta feita, impondo-se no seu primário uma tensão nominal e no secundário a corrente da carga suprida, constatou-se que os níveis de indução presentes se mostraram compatíveis com aqueles obtidos para os estudos com apenas a tensão aplicada. Essa constatação trouxe, pois, uma informação de extrema relevância, a qual pode ser compreendida na forma que as premissas para o estabelecimento das bases de projeto e construção da unidade eletromagnética de acoplamento devem ser as mesmas de um transformador convencional à base apenas de uma tensão aplicada. De fato, fisicamente pôde-se constatar que a força magneto motriz manifestada no enrolamento secundário é contrabalançada por um valor equivalente quando a corrente é transferida para o primário do transformador.

Por fim, com vistas a tão apenas evidenciar os perigos passíveis de ocorrência caso o secundário esteja funcionando com a sua corrente de carga, estando o primário em circuito aberto, certamente ocorrerão sobretensões que colocarão operadores e equipamentos em risco. Dessa constatação fica, pois, reconhecido que esta situação não pode ocorrer em campo e, caso haja necessidade do funcionamento nos termos postos, que medidas sejam implementadas para mitigar os fenômenos. Esta condição, como se sabe, também se apresenta típica para o funcionamento dos clássicos transformadores de corrente empregados para medições e proteção de sistemas elétricos.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

O capítulo inicial dessa dissertação ofereceu uma síntese didática dos conceitos e problemas relativos à qualidade da energia elétrica, em particular, no que diz respeito ao fenômeno de variação de tensão em regime permanente. Esse distúrbio na rede elétrica, embora objeto de estudos de diversas pesquisas, ainda é um problema frequente no sistema elétrico, sobretudo em longos alimentadores de distribuição. Nesse contexto, diversos equipamentos foram desenvolvidos imbuídos do propósito de mitigar as variações de tensão de longa duração e estabelecer um padrão adequado de fornecimento da energia elétrica. Dentre esses dispositivos, destaca-se um equipamento denominado por regulador eletromagnético de tensão, para o qual foi utilizado a sigla RET. Este compensador foi proposto inicialmente por trabalhos de mestrado e doutorado na Universidade Federal de Uberlândia [19]. O arranjo concebido se apresenta com características construtivas e operativas que se mostram promissoras para uso como uma filosofia alternativa para fins da restauração das tensões de longa duração aos patamares definidos pela legislação que rege a matéria.

Prosseguindo, no capítulo 2 foram detalhados os principais aspectos estruturais e operacionais, indicando o modo de funcionamento, os componentes que perfazem o equipamento, assim como a lógica requerida para o seu controle. Resumidamente, a estrutura física determina a necessidade de duas unidades eletromagnéticas de transformação. Uma delas corresponde ao denominado transformador de acoplamento, com um de seus enrolamentos conectado em série com o alimentador principal, o qual foi designado por secundário dessa unidade de acoplamento. O seu primário, por sua vez, é alimentado por tapes derivados de uma outra unidade eletromagnética de potência, a saber, o transformador de excitação.

Na versão originalmente desenvolvida pelos pesquisadores precedentes a essa dissertação, a topologia construtiva foi composta pela unidade de excitação a jusante do transformador de acoplamento. Os resultados dessa proposta se mostraram bastante eficazes para o cumprimento dos objetivos do regulador assim concebido. Não obstante a isso, com o objetivo de otimizar a potência

da unidade de acoplamento, nessa pesquisa foi considerada uma inversão de instalação da mesma. Para tal o transformador série foi inserido a jusante do de excitação. Devido a isso, as formulações matemáticas descritivas do comportamento elétrico do complexo foram refeitas, produzindo-se, assim, um conjunto de equações que correlacionam os parâmetros da rede de alimentação, os fenômenos associados com as variações de tensão e, as grandezas elétricas requeridas dos dois dispositivos eletromagnéticos que perfazem o regulador. A formulação apresentada, baseada nas equações de malha de circuitos elétricos no domínio da frequência, foi realizada para dois modos de operação, com o equipamento atuando como elevador e em seguida como redutor, visando a manter a carga suprida com um valor adequado para a sua tensão.

O capítulo 3, através de um exemplo de aplicação típico, forneceu as diretrizes para a determinação das principais variáveis elétricas das unidades eletromagnéticas, fato este de extrema importância para fins do dimensionamento, projeto e construção do compensador ora tratado. Ademais, com o propósito de ratificar o modelo matemático anteriormente estabelecido e avaliar o desempenho do regulador frente a distúrbios na rede, foram realizados trabalhos destinados a implementação, no software MATLAB/Simulink, um arranjo elétrico radial típico, o qual foi submetido a um conjunto de variações de tensão. Com a presença do compensador focado na pesquisa, foram então realizados estudos investigativos que ratificaram o desempenho do equipamento para condições impostas na forma de subtensões e sobretensões.

Ainda com base no mesmo recurso anteriormente empregado, foram também feitas avaliações de desempenho comparativas entre as duas topologias para o regulador, isto é, a original e a modificada. Os resultados obtidos evidenciaram que a nova concepção, de fato, além da sua efetividade quanto ao processo da restauração da tensão aos patamares adequados, ainda requer menores potências do transformador de acoplamento.

Por fim, no capítulo 4 foi dedicado a uma avaliação do transformador de acoplamento quanto aos níveis de magnetização impostos diante da sua particularidade de funcionamento com tensão primária e corrente secundária impostas. Uma vez feita a implementação de um protótipo de equipamento no software de elementos finitos ANSYS, quatro situações operacionais foram aplicadas e as distribuições dos fluxos segundo suas densidades foram avaliadas. Os resultados apresentados e discutidos permitiram constatar que, muito embora a condição de funcionamento especial a que fica sujeito, o referido transformador, sob o ponto de vista magnético, determina que seu núcleo opera tal como se fosse uma unidade convencional com tensão imposta. Esta conclusão indicou, pois, que as diretrizes para os projetos deste componente devem ser embasadas em princípios convencionais. Outras observações importantes foram também extraídas das simulações, a exemplo dos riscos associados com o funcionamento com corrente secundária imposta e o primário em circuito aberto.

Não obstante os resultados positivos quanto ao desempenho e melhorias do regulador eletromagnético de tensão na versão modificada, certamente, para uma consolidação da proposta, estudos adicionais ainda se fazem necessários para assegurar que o produto ofereça a confiabilidade, segurança e seja comercialmente atrativo.

Dentre alguns pontos ainda merecedores de estudos ressaltam-se:

- Implementação de um protótipo do dispositivo com a topologia alternativa proposta nesta dissertação;
- Investigações sobre os fenômenos transitórios associados com a troca das chaves de polaridade, energizações, mudança dos tapes, entre outros;
- Avaliação do desempenho do regulador diante alimentadores com significativa presença de geração distribuída;
- Estudo de desempenho do regulador com a presença de cargas de características distintas e mais próximas de um arranjo industrial, como motores, retificadores, inversores de frequência, entre outros.
- Proposição de mecanismos eletrônicos para o controle das tensões de compensação injetadas na rede de conexão, e respectivos impactos na qualidade da energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional”, nº Módulo 3-Acesso ao Sistema de Distribuição, p. 74, 2017.
- [2] A. Sharma, B. S. Rajpurohit, e S. N. Singh, “A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, nº September 2017, p. 363–372, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.011>
- [3] J. V. Milanovic *et al.*, “International industry practice on power-quality monitoring”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, nº 2, p. 934–941, 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2283143>
- [4] I. N. Santos, “Apresentação da Disciplina de Qualidade da Energia Elétrica: Variações de Tensão de Longa Duração - VTLD's”. p. 39, 2020.
- [5] C. de S. Chaves, “Projeto, Modelagem e Avaliação da Eficácia dos Reatores a Núcleo Saturado ao Processo da Regulação de Tensão”, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [6] P. R. P. Sarathy, “Analysis and Optimization of Medium Voltage Line Voltage Regulator”, Norwegian University of Science and Technology Department, 2018.
- [7] N. Mahmud e A. Zahedi, “Review of control strategies for voltage regulation of the smart distribution network with high penetration of renewable distributed generation”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, p. 582–595, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.030>
- [8] M. S. dos Reis, “Implementação de um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de TAP”, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [9] S. Haffner, L. A. Pereira, L. V. Gasperin, e L. Barreto, “Alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia visando eliminar violações de tensão”, *Control. Automação*,

- vol. 20, n° 4, p. 546–563, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-17592009000400008>
- [10] F. O. Igbinovia, G. Fandi, Z. Muller, J. Svec, e J. Tlustý, “Optimal location of the synchronous condenser in electric-power system networks”, *7th Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng. (EPE)*, 2016, doi: 10.1109/EPE.2016.7521731. <https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7521731>
- [11] K. R. Padiyar, *FACTS controllers in power transmission and distribution*. New Delhi: New age International Ltd. Publishers, 2009.
- [12] E. A. Belati, C. F. Nascimento, H. de Faria, E. H. Watanabe, e A. Padilha-Feltrin, “Allocation of Static Var Compensator in Electric Power Systems Considering Different Load Levels”, *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 30, n° 1, p. 1–8, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40313-018-00421-2>
- [13] F. O. Igbinovia, G. Fandi, J. Svec, Z. Muller, e J. Tlustý, “Comparative review of reactive power compensation technologies”, *16th Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng. EPE 2015*, n° July 2018, p. 2–7, 2015. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7161066>
- [14] R. Chaturvedi e A. Thakur, “A Review D-STATCOM Voltage Regulation Systems”, *Int. J. Electr. Electron. Comput. Eng.*, vol. 2, n° 7, p. 31–34, 2018.
- [15] H. Zhou, X. Yan, e G. Liu, “A review on voltage control using on-load voltage transformer for the power grid”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 252, n° 3, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/252/3/032144>
- [16] L. A. Kojovic, “Modern techniques to study voltage regulator - DG interactions in distribution systems”, *2008 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo.*, p. 1–6, 2008. <https://doi.org/10.1109/TDC.2008.4517240>
- [17] V. K. Remya, P. Parthiban, V. Ansal, e B. Chitti Babu, “Dynamic voltage restorer (DVR) – A review”, *J. Green Eng.*, vol. 8, n° 4, p. 519–572, 2018, doi: 10.13052/jge1904-4720.844.
- [18] S. A. Taher, H. T. Fard, e E. B. Kashani, “New switching approach for DVR using one cycle control method”, *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, n° 4, p. 2227–2254, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.03.003>

- [19] 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, 2013.
- [20] 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, 2014.
- [21] F. P. Santilio, T. V. Da Silva, L. E. Vasconcelos, e J. C. De Oliveira, “Modeling and validation of a single-phase electromagnetic voltage restorer proposal”, *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 25, nº 1, p. 112–125, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40313-013-0083-5>
- [22] F. P. Santilio, T. V. da Silva, J. C. de Oliveira, e J. A. F. Barbosa, “A computational and experimental performance analysis of an electromagnetic voltage regulator proposal throughout controlled series voltage injection”, *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, nº 10, p. 767–772, 2012. <https://doi.org/10.24084/repqj10.465>
- [23] F. P. Santilio, J. C. Oliveira, T. V. Silva, e A. Oliveira, “An electromagnetic voltage regulator proposal throughout the injection of series compensation: Physical conception and computational analysis”, *Int. Conf. Electr. Power Qual. Util.*, p. 267–272, 2011. <https://doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128947>
- [24] F. P. Santilio, T. V. Silva, J. C. De Oliveira, e J. A. F. B. Jr, “Proposta de Topologia e Validação Operacional de um Dispositivo Eletromagnético Baseado na Injeção Série de Tensão para o Processo da Regulação”, in *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2012, p. 6.
- [25] T. V. Silva, F. P. Santilio, L. E. Vasconcelos, e J. C. Oliveira, “Análise Computacional de Desempenho de duas Propostas de Controle e Chaveamento para o Compensador Eletromagnético de Tensão”, in *X Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, 2012, p. 1–6.
- [26] G. Ram, V. Prasanth, P. Bauer, e E. M. Barthlein, “Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies”, *2014 16th Int. Power Electron. Motion Control Conf. Expo.*, p. 918–923, 2014. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980624>

- [27] M. Carlen *et al.*, “Line voltage regulator for voltage adjustment in MV-Grids”, *CIGRE 23rd Int. Conf. Electr. Distrib.*, 2015.
- [28] G. Leci, F. Cornelius, e A. Slupinski, “Increasing grid capacity to connect renewable energies”, *CIGRE*, p. 1–9, 2016.
- [29] D. de S. Lima, “Análise Magnética e Mecânica em Transformadores sob Correntes de Energização e Energização Solidária”, Tese de doutorado, Universidade Federal do Pará, 2019.
- [30] A. R. M. de Sousa, “Análises Multifísica via Método de Elementos Finitos para o Auxílio à Manutenção Preditiva em Transformadores de Potência”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, 2018.
- [31] T. & F. Group, Org., *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements: Basic Principles of Finite Element Methods*. Nova York, EUA, 2005.
- [32] A. M. Sobrinho, J. A. Malagoli, J. R. Camacho, P. P. P. dos Santos, e Y. J. S. Cruz, “Projeto das dimensões e análise da densidade de fluxo magnético de um transformador de potência a”, *XII Simpósio Bras. Automação Intel.*, p. 1–6, 2015.
- [33] “Telba Transformadores - Média e Baixa Tensão | Fabricação Própria”. [Online]. Disponível em <https://telbatransformadores.com.br/transformador-monofasico-universal.php>. [Acessado: 09-ago-2020].
- [34] V. S. Division, “Data sheet isovac 530-50 A”. p. 1–7, 2018.
- [35] W. V. Calil, “Determinação de fator de correção para cálculo de perdas magnéticas em núcleos de transformadores de potência pelo método de elementos finitos”, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- [36] L. H. Medeiros, D. L. P. Feil, e T. B. Marchesan, “Desenvolvimento de Transformadores de Distribuição de Elevada Eficiência Empregando Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante”, *Rev. Bras. Iniciação Científica*, vol. 3, nº 6, p. 125–139, 2016.

- [37] İ. H. Teke, Y. Özüpak, M. S. Mamiş, E. E. B. Thermal, e P. Plant, “Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method”, *Int. J. Eng. Comput. Sci.*, vol. 8, n° 1, p. 24451–24460, 2018, doi: 10.18535/ijecs/v8i1.01.