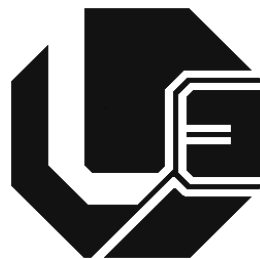


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



MODELAGEM NO DOMÍNIO DA
FREQUÊNCIA DE UM REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO BASEADO NA
COMPENSAÇÃO SÉRIE

Lucas Eduardo Vasconcelos

Uberlândia
2014

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

MODELAGEM NO DOMÍNIO DA
FREQUÊNCIA DE UM REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO BASEADO NA
COMPENSAÇÃO SÉRIE

Dissertação apresentada por Lucas Eduardo Vasconcelos ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira, PhD. (Orientador) – UFU

Anésio de Leles Ferreira Filho, Dr. – UnB

Milton Itsuo Samesima, Dr. – UFU

Ivan Nunes Santos, Dr. – UFU

Carlos Eduardo Tavares, Dr. – UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

V331L Vasconcelos, Lucas Eduardo, 1988-
2014 Modelagem no domínio da frequência de um regulador
eletromagnético de tensão baseado na compensação série / Lucas
Eduardo Vasconcelos. - 2014.
85 f. : il.

Orientador: José Carlos de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Controle de
qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de. II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

CDU: 621.3

MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA DE UM REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO BASEADO NA COMPENSAÇÃO SÉRIE

Lucas Eduardo Vasconcelos

Dissertação apresentada por Lucas Eduardo Vasconcelos à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D.
(Orientador) – UFU

Prof. Edgard A. Lamounier Júnior, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço do fundo do meu coração ao meu pai, minha mãe e meu irmão, por terem sempre me proporcionado tamanha tranquilidade e estabilidade dentro de casa durante todos esses anos, o que eu acredito muito que tenha mais contribuído para a minha formação pessoal, acadêmica e profissional. Tenho plena certeza que a serenidade e a sensatez que têm me acompanhado durante toda a minha vida são frutos de um lar e de uma família tão unida, santa e lutadora.

Em segundo lugar, agradeço à minha família como um todo, à qual incluo os meus amigos, de tantos lugares e épocas diferentes, mas que continuam sempre no meu coração, independente da distância, do tempo ou da convivência. Agradeço pela contribuição de cada pessoa que passou pela minha vida e que contribuiu para a formação do que eu sou hoje. De forma especial, agradeço à minha namorada, por ter sido tão paciente e pelo precioso apoio nesses tempos difíceis de conciliação entre estudo e trabalho.

Agradeço aos professores do Núcleo de Qualidade da Energia pelas contribuições feitas para esta dissertação, de formas tão diversas, e aos funcionários da Pós-graduação pela presteza, paciência e boa vontade com que sempre me atenderam.

Em especial, agradeço ao Prof. José Carlos de Oliveira. Fica aqui a minha admiração, pelo seu trabalho, pela condução do Núcleo de Qualidade e orientação neste trabalho, mas, sobretudo, pela grandeza humana. Obrigado por ter me guiado com tamanha sabedoria, paciência e contribuído tanto para o meu aprendizado profissional e espiritual.

Obrigado a todos os amigos do Laboratório de Qualidade da Energia: Afonso, Alex, Arnaldo, Arthur, Cadu, Camila, Fabricio, Fernanda, Isaque, Ivan, João, José Rubens, Loana, Paulo Henrique e Thiago, pelo convívio tão agradável no trabalho, fora dele, e por terem contribuído para o meu crescimento e deste trabalho de maneiras tão distintas nesses três anos de iniciação científica e mestrado.

Agradeço, de forma especial, ao Fabricio e ao Thiago, pela amizade, pelos conselhos e contribuição inestimável na realização deste trabalho, que é tanto meu, quanto de vocês.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro na viabilização deste trabalho.

Por fim, obrigado, Deus, por ter me dado tanto pelo que agradecer.

RESUMO

A busca por soluções para os distintos problemas de qualidade da energia elétrica, em especial a regulação dinâmica das tensões de suprimento, tem fomentado o desenvolvimento de estratégias inovadoras e adequadas às legislações em vigor. Nesse particular, muito embora se reconheça a vasta gama de produtos existentes no mercado, a concepção de dispositivos fundamentados em princípios e controle simples, custos competitivos, menores requisitos de manutenção, dentre outros aspectos, ainda se apresenta como grande desafio para as pesquisas e o desenvolvimento de novos produtos. Nesse contexto, o presente trabalho dá continuidade a uma das linhas de desenvolvimentos conduzidas por pesquisadores da UFU, a qual se encontra centrada na proposição, modelagem e desenvolvimento de uma nova concepção de dispositivo regulador. Avançando nos trabalhos, as investigações realizadas no âmbito da presente dissertação encontram-se direcionadas para a modelagem desse equipamento no domínio da frequência, estratégia esta que complementa os estudos anteriores, os quais foram alicerçados em representações no domínio do tempo, através do simulador ATP. O emprego da estratégia de modelagem aqui feita apresenta-se mais simples e eficaz para a obtenção dos parâmetros básicos do equipamento regulador e avaliação da eficácia do processo de restauração das tensões aos patamares regulamentados. Para o atendimento a tais metas, a dissertação ressalta a concepção e estrutura física do equipamento, apresenta um protótipo de dispositivo já desenvolvido, realiza estudos experimentais de desempenho e, por fim, estabelece termos comparativos entre os desempenhos do regulador em pauta através dos recursos computacionais originalmente disponibilizados e a nova formulação aqui proposta.

Palavras-Chave: Qualidade da Energia Elétrica, Regulação da Tensão, Dispositivos Reguladores, Modelagem no Domínio da Frequência.

ABSTRACT

The search for solutions to the different problems associated with power quality, in particular the regulation of the supply voltage, has motivated the development of many innovative proposals, which fit satisfactorily within the legislation presently practiced. In particular, although recognizing the wide range of products on the market, the design of devices based on principles and control which are simple in concept and still able to provide competitive costs, lower maintenance requirements, among other things, still present challenges to the research and development of new products. In this context, this paper continues a line of developments conducted by researchers at the Federal University of Uberlândia (UFU), which is focused on the proposition, modeling and development of a new conception of regulating device. The investigations conducted in this dissertation are directed to the mathematical model of the equipment in the frequency domain, as a complement to previous studies which aimed at the time domain representations through the ATP simulator. The use of this modeling strategy presents itself in a simpler and more effective way for obtaining the basic parameters of the regulator equipment and evaluating the effectiveness of the voltage regulation process. To meet such goals, this dissertation highlights the design and physical structure of the machine, presents a prototype already developed of the device, conducts experimental studies of performance and finally establishes comparative terms between the regulator performances through the computational resources originally available and the new formulation proposed here.

Words-Key: Power Quality, Voltage Regulation, Electromagnetic Device, Mathematical Modelling in the Frequency Domain.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CCT	Capacitor Chaveado a Tiristor
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
DySC	<i>Dynamic Sag Correctors</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmissions Systems</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
RCT	Reator Controlado a Tiristor
RET	Regulador Eletromagnético de Tensão
Sipcon S	<i>Siemens Power Conditioner – Series</i>
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
TSSC	<i>Thyristor Switched Series Capacitor</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>
UPQC	<i>Unified Power-quality Conditioner</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\pm\Delta V$	Parcela de tensão injetada no sistema
V_a	Tensão eficaz na fase a
V_b	Tensão eficaz na fase b
V_c	Tensão eficaz na fase c
ΔV_a	Parcela de tensão eficaz injetada na fase a
ΔV_b	Parcela de tensão eficaz injetada na fase b
ΔV_c	Parcela de tensão eficaz injetada na fase c
$V_a \text{ Reg}$	Tensão eficaz na fase a com regulação
$V_b \text{ Reg}$	Tensão eficaz na fase b com regulação
$V_c \text{ Reg}$	Tensão eficaz na fase c com regulação
\dot{V}_s	Tensão na barra do supridor
\dot{V}_c	Tensão na barra do consumidor
$\Delta \dot{V}_s$	Tensão de compensação injetada pelo transformador de acoplamento
$\Delta \dot{V}_2$	Parcela de tensão injetada ou absorvida no secundário
TE	Transformador de Excitação
TA	Transformador de Acoplamento
N1	Número de espiras do enrolamento primário do transformador de excitação
N2	Número de espiras do enrolamento secundário do transformador de excitação
CH _{PP}	Chave polaridade positiva (compensação positiva)
CH _{PN}	Chave polaridade negativa (compensação negativa)
CH ₀ a CH ₄	Chaves dos tapes do transformador de acoplamento
\dot{Z}_{CC}	Impedância de curto-circuito do sistema
\dot{I}_C	Corrente da carga (consumidor)
\dot{Z}_C	Impedância da carga
\dot{I}_F	Corrente da fonte (supridor)
\dot{I}_{AT}	Corrente no primário do autotransformador (transformador de excitação)
\dot{I}_N	Corrente no neutro do transformador de excitação
V_n	Tensão nominal do sistema

$\Delta V_{\%}$	Percentual da tensão extraída pelo tape do transformador de excitação
S_{TELE}	Potência aparente do transformador de excitação atuando como elevador
S_{TERED}	Potência aparente do transformador de excitação atuando como redutor
S_{TAELE}	Potência aparente do transformador de acoplamento atuando como elevador
S_{TARED}	Potência aparente do transformador de acoplamento atuando como redutor
S_C	Potência aparente da carga
S_{RET}	Potência aparente do regulador eletromagnético de tensão
ΔS	Diferença percentual entre as potências aparentes da carga e do RET
$V_{TE_{Sec}}$	Tensão no secundário do transformador de excitação
$V_{TA_{Prim}}$	Tensão no primário do transformador de acoplamento
\dot{V}_{TH}	Tensão equivalente de Thévenin
R_{TH}	Resistência de Thévenin equivalente do alimentador
X_{TH}	Reatância de Thévenin equivalente do alimentador
\dot{V}_{TE}	Tensão no secundário do transformador de excitação
\dot{V}_{TA}	Tensão no secundário do transformador de acoplamento
\dot{Z}_{TTE}	Impedância total do transformador de excitação
\dot{Z}_{TTA}	Impedância total do transformador de acoplamento
R_{TTE}	Resistência total do transformador de excitação
X_{TTE}	Reatância de dispersão total do transformador de excitação
R_{TTA}	Resistência total do transformador de acoplamento
X_{TTA}	Reatância de dispersão total do transformador de acoplamento
EXP	Experimental
MDT	Modelagem computacional no domínio do tempo
MDF	Modelagem matemática no domínio da frequência

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Definições de variação de tensão segundo a IEEE Std. 1159-1995	18
Figura 1.2 - Definições dos eventos de variação de tensão segundo o PRODIST	19
Figura 1.3 - Regulador Toshiba TB-R1000.....	24
Figura 1.4 - Regulador Cooper VR-32	25
Figura 1.5 - Regulador ITB RAV-2	26
Figura 1.6 - Conceituação do processo de regulação via injeção série de tensão	27
Figura 1.7 - Arranjo físico típico de um regulador série de tensão	27
Figura 2.1 - Estrutura física do RET com mudança de tapes discretos sob carga.....	33
Figura 2.2 - Diagrama fasorial ilustrativo do funcionamento do regulador	34
Figura 2.3 - Diagrama de blocos para o controle do RET	35
Figura 2.4 - Topologia do RET – modo elevador	38
Figura 2.5 - Fluxos de corrente no transformador de excitação – modo elevador	39
Figura 2.6 - Circuito simplificado do RET – modo elevador.....	41
Figura 2.7 - Circuito equivalente do RET – modo elevador	42
Figura 2.8 - Malha do transformador de excitação – modo elevador.....	43
Figura 2.9 - Malha do transformador de acoplamento – modo elevador	44
Figura 2.10 - Malha principal – modo elevador	45
Figura 2.11 - Topologia do RET – modo redutor.....	45
Figura 2.12 - Fluxos de corrente no transformador de excitação – modo redutor	46
Figura 2.13 - Circuito simplificado do RET – modo redutor	49
Figura 2.14 - Circuito equivalente do RET – modo redutor.....	51
Figura 2.15 - Malha do transformador de excitação – modo redutor	52
Figura 2.16 - Malha do transformador de acoplamento – modo redutor.....	52
Figura 2.17 - Malha principal – modo redutor	53
Figura 3.1 - Protótipo do RET	57
Figura 3.2 - Transformador de excitação do RET	58
Figura 3.3 - Transformador de acoplamento do RET.....	59
Figura 3.4 - Dispositivo de seleção de tape do RET	59
Figura 3.5 - Placa de controle do RET	60

Figura 3.6 – Acessórios complementares do protótipo	60
Figura 3.7 - Esquema simplificado do arranjo utilizado para a análise experimental.....	61
Figura 3.8 - Estrutura laboratorial para estudos de performance do protótipo RET	61
Figura 3.9 - Tensão na Barra 1: Variações adotadas ao longo do período de investigação ...	62
Figura 3.10 - Perfil da tensão na Barra 2 – Experimental	63
Figura 3.11 - Perfil da tensão V_{TE} – Experimental.....	64
Figura 3.12 - Correntes nos diversos trechos do arranjo em estudo – Experimental	65
Figura 3.13 - Perfil das potências aparentes – Experimental	66
Figura 3.14 - Modelo completo do RET no ATP.....	68
Figura 3.15 - Modelos das unidades eletromagnéticas do RET no ATP.....	69
Figura 3.16 - Modelo do controle no ATP	70
Figura 3.17 - Diagrama unifilar do sistema utilizado para os estudos computacionais	70
Figura 3.18 - Tensão na Barra 1: Variações adotadas para os estudos computacionais	71
Figura 3.19 – Perfil da tensão na Barra 2 – Computacional.....	72
Figura 3.20 - Perfil da tensão V_{TE} – Computacional.....	73
Figura 3.21 - Correntes nos diversos trechos do sistema em estudo – Computacional.....	74
Figura 3.22 - Perfil das potências aparentes – Computacional	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Equipamentos de compensação.....	21
Tabela 2.1 - Correntes circulantes no RET como elevador e redutor	48
Tabela 2.2 - Tensões no regulador de tensão como elevador e redutor	54
Tabela 3.1 - Variações de tensão adotadas para a barra 1	62
Tabela 3.2 - Tensões nas barras 1 e 2 – resultados experimentais	64
Tabela 3.3 - Correntes nos ramos do arranjo experimental.....	66
Tabela 3.4 - Potências aparentes – experimental.....	67
Tabela 3.5 - Parâmetros do sistema elétrico estudado.....	71
Tabela 3.6 - Variações de tensão adotadas para a barra 1	71
Tabela 3.7 - Tensões nas barras 1 e 2 – resultados computacionais.....	72
Tabela 3.8 - Correntes circulando pelos ramos do sistema	74
Tabela 3.9 - Potências aparentes – computacional	75
Tabela 3.10 - Valores para o transformador de excitação	76
Tabela 3.11 - Correntes nos ramos do sistema	77
Tabela 3.12 - Tensões nas barras do sistema.....	78

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL	16
1.1 Considerações Iniciais	17
1.2 Contextualização do Tema	20
1.3 Reguladores Eletromagnéticos Comerciais	23
1.3.1 Regulador Toshiba TB-R1000 [26] e [7]	23
1.3.2 Cooper VR-32 [8].....	24
1.3.3 ITB RAV-2 [9]	25
1.4 Reguladores Eletromagnéticos Especiais	26
1.5 Objetivos e Contribuições Oferecidas por esta Dissertação	28
1.6 Estrutura da Dissertação	29

CAPÍTULO 2

CONCEPÇÃO FÍSICA DO REGULADOR DE TENSÃO E SUA MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	31
2.1 Considerações Iniciais	32
2.2 Estrutura Física do Regulador	32
2.3 O Controle do Regulador.....	34
2.4 Estratégia para a Modelagem do Regulador.....	36
2.5 Modelagem do RET na Condição de Compensação Positiva de Tensão	38
2.5.1 Transformador de Excitação	38
2.5.2 Transformador de Acoplamento.....	40
2.5.3 Modelagem do Regulador	42
2.6 Modelagem do RET na Condição de Compensação Negativa de Tensão	45
2.6.1 Transformador de Excitação	46
2.6.2 Transformador de Acoplamento.....	49
2.6.3 Modelagem do Regulador	50
2.7 Considerações finais	54

CAPÍTULO 3

VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO REGULADOR NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA 55

3.1 Considerações Iniciais	56
3.2 Protótipo do RET.....	56
3.2.1 Transformador de Excitação	58
3.2.2 Transformador de Acoplamento.....	58
3.2.3 Dispositivo de seleção de tapes	59
3.2.4 Placa de controle	59
3.2.5 Acessórios complementares	60
3.3 Estrutura laboratorial	60
3.4 Caracterização do Caso Estudo	62
3.5 Resultados Experimentais	63
3.6 Estudos Computacionais no Domínio do tempo	67
3.6.1 Transformadores de excitação e acoplamento	68
3.6.2 Sistema de Controle	69
3.6.3 Resultados de Desempenho.....	70
3.7 Resultados do Modelo no Domínio da Frequência e Correlações com o Desempenho Experimental e Computacional no ATP.....	76
3.8 Considerações finais.....	78

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES..... 80

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 84

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos principais aspectos associados com o desempenho das redes elétricas de distribuição e transmissão, com destaque às questões da Qualidade da Energia, apoia-se no cumprimento dos padrões estabelecidos para as tensões de suprimento, em que pese o regime permanente ou dinâmico de operação. O tema tem sido considerado nos mais distintos documentos normativos nacionais e internacionais, os quais, de um modo geral, dividem as ocorrências passíveis de manifestação em campo, em fenômenos que podem se apresentar com duração iniciando em alguns ciclos elétricos e prologando até a casa dos minutos. [1].

Em linhas gerais, um evento de variação de tensão é considerado como um desvio significativo da magnitude da tensão nominal por um determinado período e, em consonância com a literatura aplicável, os fenômenos que impactam nas questões aqui focadas são, convencionalmente, denominados por: interrupções, sobretensões e subtensões. Somado a tais conceitos, surge ainda a questão da duração dos fenômenos, visto serem esses relevantes ao processo do suprimento elétrico e respectivos efeitos sobre os consumidores.

No que tange à regulamentação brasileira, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, por meio do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, revisão 4 de 01/02/2012 [2], estabelece os procedimentos relativos à qualidade do produto e do serviço prestado. No tocante à qualidade do produto, o referido módulo define terminologias, caracteriza e parametriza os fenômenos, aponta para valores de referência relativos à conformidade da tensão em regime permanente e às perturbações pertinentes à tensão, estabelecendo, assim, mecanismos que possibilitem definir os padrões de qualidade da energia elétrica através de indicadores específicos.

Quanto à caracterização dos eventos, estes são, normalmente, considerados à luz das magnitudes e durações, fato esse que originou nomenclaturas e limites estabelecidos em documentos próprios para os mais diferentes países. A título de ilustração, a Figura 1.1 expõe as definições usadas pelo documento IEEE *Std.* 1159-1995 [3]. Como se pode observar, este documento apresenta as variações de tensão de regime permanente como eventos cujas durações são superiores a 1 minuto. Nesse contexto, os desvios em relação ao padrão normal de fornecimento (valor nominal ou valor de referência) são identificados por subtensões e sobretensões. Para o caso de manifestações de variações de tensão por um tempo inferior a 1 minuto, o referido texto contempla uma caracterização em dois tipos: as variações momentâneas e aquelas denominadas por variações temporárias. As tidas como momentâneas referem-se aos eventos cujas durações são superiores a meio ciclo e inferiores a 3 segundos; e as temporárias, aquelas cujas durações vão de 3

segundos a 1 minuto. Esse conjunto de terminologias e respectivas interpretações físicas podem ser sintetizadas nos termos indicados na Figura 1.1 a seguir.

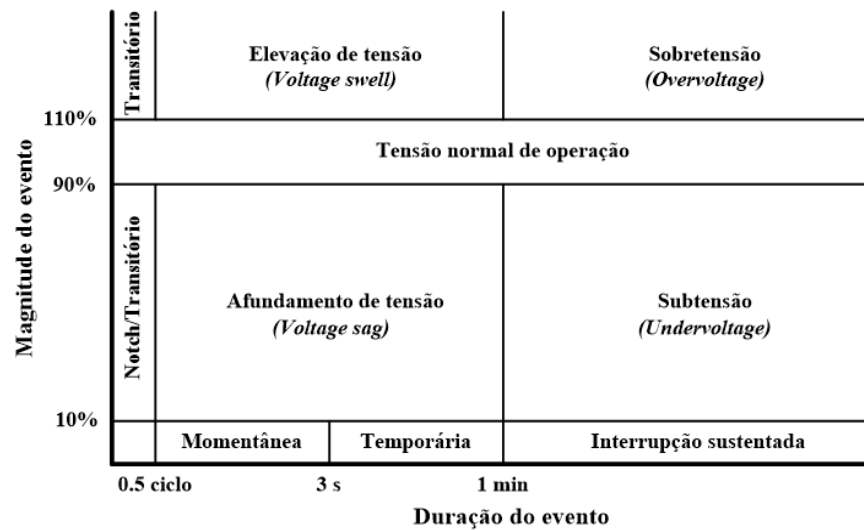


Figura 1.1 - Definições de variação de tensão segundo a IEEE Std. 1159-1995

Neste mesmo cenário, as informações contidas na Figura 1.2 remetem às nomenclaturas e limites estabelecidos pelo PRODIST. É possível perceber uma grande semelhança com relação à supracitada norma norte-americana, principalmente no que se refere aos limites de magnitude das tensões para a determinação dos eventos e nomenclaturas. Todavia, deve-se atentar para o fato de que o limite de tempo utilizado para os dois documentos mencionados diverge na questão da duração, visto que o período de 1 minuto definido pelo IEEE apresenta-se, para a ANEEL, estipulado em um intervalo de 3 minutos.

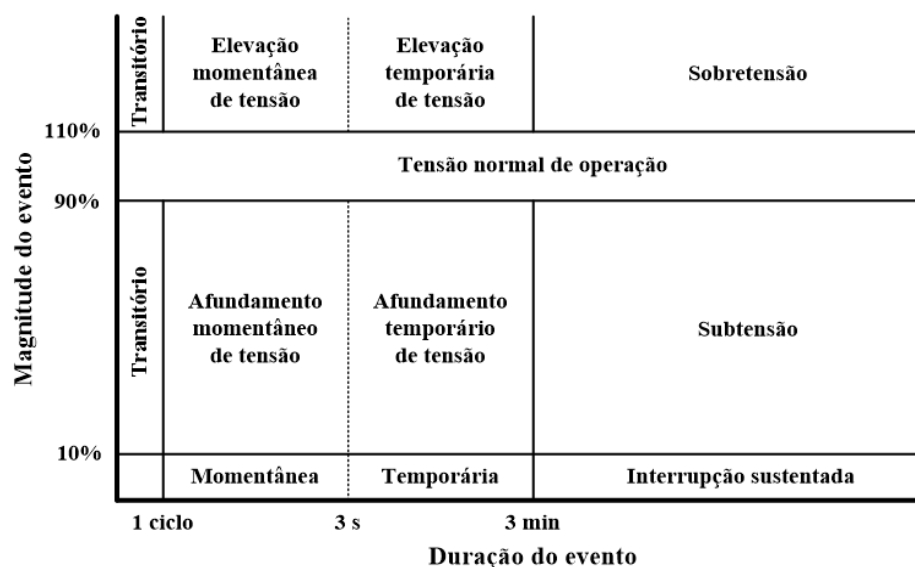


Figura 1.2 - Definições dos eventos de variação de tensão segundo o PRODIST

De um modo geral, em consonância com o PRODIST, eventos de variação da magnitude da tensão com duração inferior a 3 minutos são considerados como de curta duração (VTCD). A determinação de tal valor como limiar entre variações de curta e longa duração vai ao encontro das diretrizes relacionadas à qualidade do serviço nas empresas distribuidoras de energia, uma vez que os indicadores de continuidade contabilizam apenas eventos com duração superior a 3 minutos, sendo esse o período necessário para realizar o religamento manual de linhas cujo religamento automático esteja desligado por solicitação da distribuidora.

Visando mitigar os desvios na tensão de suprimento, tanto no que tange aos eventos de longa duração quanto aos de curta duração, diversos equipamentos encontram-se desenvolvidos e disponibilizados para fins da restauração aos padrões exigidos. Dentro desse universo, há de se reconhecer uma extensa gama de produtos, cada qual com suas propriedades operacionais vinculadas com seus tempos de resposta, tecnologias empregadas, custos de investimento e manutenção, confiabilidade operacional, necessidade de mão de obra qualificada, dentre outros. Muito embora esse cenário tenha sido alvo de inúmeras pesquisas e haja o reconhecimento de uma grande quantidade de produtos no mercado, o assunto ainda se apresenta com desafios importantes no que se refere à busca por soluções que congreguem respostas operacionais compatíveis com as exigências regulamentares, sem negligenciar os demais aspectos associados com custos, confiabilidade e demais atrativos adequados a cada instalação em foco.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Como mencionado, visando mitigar os desvios na tensão de suprimento, tanto no que tange aos efeitos de longa duração como aos de curta duração, diversos equipamentos encontram-se desenvolvidos e disponibilizados na atualidade. Das tecnologias concebidas para tais fins, pode-se distinguir, filosoficamente, duas vias mais comumente utilizadas. A primeira, denominada indireta, fundamenta-se no controle do nível de tensão por meio da variação controlada da potência reativa em determinados pontos da rede. Outra, apoia-se em princípios denominados por compensação direta e encontra-se centrada em equipamentos que agem de forma pontual sobre as tensões, a exemplo daqueles que atuam na forma de comutadores de tapes, injeções de reforços de tensão, etc.

Nesse cenário, utilizando o princípio de compensação aqui denominado indireto, encontram-se os bancos de capacitores e reatores, fixos e automáticos, compensadores síncronos, reatores à núcleo saturado [4], dentre outros. De forma mais atual, acompanhando os desenvolvimentos da eletrônica de potência, apresentam-se os equipamentos que partilham da filosofia FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), a exemplo dos reatores controlados a tiristores - RCTs, capacitores chaveados a tiristores - CCTs [5], compensadores estáticos como o STATCOM [6], dentre outros.

Atuando de forma pontual, ou direta, no sentido de modificar os valores eficazes da tensão, por meio da alteração manual ou automática de tapes ou pela inserção de tensões controladas, aditivas ou subtrativas, àquelas disponibilizadas pela rede supridora, destacam-se os transformadores com mudança de tapes sob carga ou a vazio, os reguladores de tensão fixos e automáticos, e outras possibilidades comercialmente disponibilizadas no mercado.

Inserido nesse contexto, apresentam-se produtos comerciais bastante clássicos, a exemplo dos reguladores eletromagnéticos Toshiba TB-R1000 [7], COOPER VR-32 [8], ITB RAV-2 [9] e, ainda, certos equipamentos originalmente concebidos para oferecer defasagens angulares entre as tensões, a exemplo dos clássicos *phase-shifters* ou defasadores, porém adequados aos objetivos da regulação da tensão.

Numa via alternativa e, dentro do contexto da filosofia indireta supra posta, situam-se as tecnologias que atuam diretamente na tensão a ser compensada a partir da utilização de conversores eletrônicos que têm como premissa básica a produção e injeção de tensões complementares à de suprimento de forma a proporcionarem incrementos ou decrementos de tensão com valores e posicionamentos angulares eletronicamente controláveis. Tais recursos, caso desejado, podem ainda viabilizar a compensação de forma independente por fase, contribuindo, concomitantemente, para o equilíbrio do suprimento de energia. Dentro dessa linha de dispositivos, ressaltam-se as tecnologias

comercialmente conhecidas por DVR, SIPCON S, TSSC, SSSC, *Softswitching* DySC, dentre outros [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] e [19].

Por fim, associando ambos os conceitos de compensação acima pautados, tanto a direta como a indireta, e agrupando num único dispositivo os recursos atribuídos às duas estratégias postas, há que se considerar os reguladores denominados por controladores de fluxo de potência unificado (*Unified Power-flow Controller* – UPFC) ou condicionadores unificados de qualidade da energia (*Unified Power-quality Conditioner* – UPQC), os quais possuem unidades tanto em paralelo quanto em série para o controle da potência reativa e injeção das tensões de compensação, utilizando de conversores de tensão imposta compostos por GTO ou IGBT [20], [21] e [22].

Diante da grande diversidade de produtos, cada qual com sua concepção física e operacional, há de se reconhecer atributos que podem se materializar na forma de vantagens e desvantagens técnicas, econômicas e operacionais. Para facilitar uma análise comparativa entre os mesmos, complementando informações extraídas de [23], foi elaborada a Tabela 1.1 a seguir, a qual ilustra, de forma sucinta, os principais aspectos atrelados com uma ou outra tecnologia e produto.

TABELA 1.1 - EQUIPAMENTOS DE COMPENSAÇÃO

Equipamento de Compensação	Principais características operacionais
Reator chaveado mecanicamente	<ul style="list-style-type: none"> • Princípio e construção simples. • Valores fixos.
Banco de capacitores chaveado mecanicamente	<ul style="list-style-type: none"> • Princípio e construção simples. • Valores fixos. • Transitórios de chaveamento.
Compensador síncrono	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de sobrecarga. • Totalmente controlável. • Tempo de resposta lento (500ms). • Contribuição de curto circuito na faixa capacitiva. • Perdas elevadas. • Maiores requisitos de manutenção.
Reator à núcleo saturado	<ul style="list-style-type: none"> • Princípio e construção simples. • Menores requisitos de manutenção. • Controle natural da absorção de reativos. • Rápido tempo de resposta. • Não produzido em escala industrial. • Produção de componentes harmônicas.

Reator controlado a tiristores - RCT	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido tempo de resposta (5ms). • Totalmente controlável. • Controle contínuo de potência reativa. • Nenhum efeito sobre o nível de faltas. • Perdas médias. • Menores requisitos de manutenção. • Geração de harmônicos durante transitórios e regime permanente.
Banco de capacitores chaveado a tiristores – CCT	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo rápido de resposta (10ms). • Perdas baixas. • Menores requisitos de manutenção. • Harmônicos durante transitórios. • Controle da potência reativa somente por estágios. • Barramentos e controle complexos.
Reguladores eletromagnéticos comerciais	<ul style="list-style-type: none"> • Princípio e construção simples. • Baixo custo. • Elevado tempo de resposta. • Maiores requisitos de manutenção. • Valores preestabelecidos para regulação da tensão.
<i>Static Synchronous Compensator - STATCOM</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido tempo de resposta (8ms). • Fornecimento ou absorção de potência reativa. • Total controle do montante de potência a ser absorvida/injetada. • Alto custo de implementação. • Maiores requisitos de manutenção (necessidade de mão de obra qualificada). • Complexo sistema de controle.
<i>Dymanic Voltage Restorer - DVR</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido tempo de resposta (8ms). • Injeção de tensões controladas em módulo e ângulo de fase. • Alto custo de implementação. • Maiores requisitos de manutenção (necessidade de mão de obra qualificada). • Complexo sistema de controle.

Não obstante o reconhecimento da importância e espaço ocupados pelos reguladores mencionados e suas funcionalidades, para fins da constituição deste capítulo da dissertação, apresenta-se na sequência, em maiores detalhes, alguns equipamentos mais comumente encontrados no mercado cujos fundamentos físicos, construtivos e operacionais assemelham-se à proposta de regulador eletromagnético contemplado nesta pesquisa.

1.3 REGULADORES ELETROMAGNÉTICOS COMERCIAIS

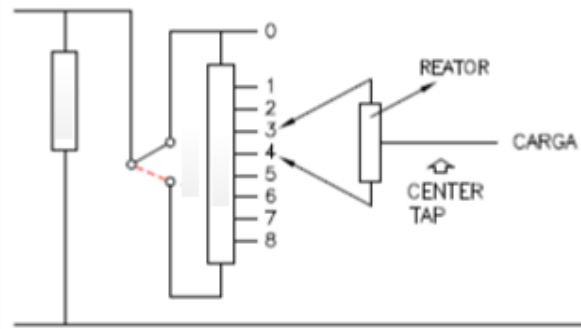
De um modo geral, a estrutura física desses compensadores baseia-se em princípios clássicos dos transformadores providos de dispositivos comutadores de tapes, os quais operam com comandos manuais sob situação a vazio ou, ainda, automaticamente, sob carga, em conjunto com recursos voltados para a medição e controle das tensões nas barras [24]. Tais equipamentos são compostos, fundamentalmente, por um autotransformador formado por uma bobina provida de vários tapes, fato este que possibilita a derivação de diferentes níveis de tensão voltadas para a compensação almejada.

A estrutura dos comutadores sob carga é mais complexa e apresenta dois critérios básicos compartilhados visando, sobretudo, que os tapes nunca devem ser curto-circuitados durante os estágios de comutação e que a carga nunca deve ser desconectada durante o processo de chaveamento. A primeira condição implica na utilização de uma impedância para fins de evitar o curto-circuito, seja ela uma resistência ou um reator. Para satisfazer a segunda condição, existe tipicamente um circuito de dois elementos no comutador o qual viabiliza a circulação de corrente em um dos elementos quando o outro está em estado de comutação [25].

No contexto dos equipamentos com comutação de tapes sob carga, no Brasil, pode-se relacionar os produtos abaixo identificados:

1.3.1 REGULADOR TOSHIBA TB-R1000 [26] E [7]

O princípio de funcionamento do regulador TB-R1000, ilustrado na Figura 1.3, é similar ao de um autotransformador eletromagnético, podendo funcionar como elevador ou abaixador de tensão em função da presença de uma chave inversora de polaridade no circuito, além de dispor de tapes que permitem a regulação em degraus de tensão.



(a) Diagrama elétrico simplificado



(b) Foto do equipamento

Figura 1.3 - Regulador Toshiba TB-R1000

O equipamento ainda apresenta um reator no circuito de comutação, visando a não interrupção do circuito durante o chaveamento entre taps e, consequentemente, a desenergização do regulador, como ilustrado na Figura 1.3.a. Esse componente limita a corrente circulante entre dois taps no momento da comutação evitando o desgaste excessivo dos contatos do comutador e preservando a vida útil dos mesmos.

Para fins de regulação da tensão, o equipamento disponibiliza, tipicamente, 8 taps de variação de 2,85%, sendo um deles o central. Com potência passante até 25 MVA, o regulador TB-R1000 possui diversos níveis de potências reais e níveis de tensão. Cabe ressaltar que, para uma maior confiabilidade, o sistema conta com o acionamento da chave *by-pass* para desligamento total do sistema e estabelecimento de conexão direta entre a carga e a fonte.

1.3.2 COOPER VR-32 [8]

Assim como exposto anteriormente, os reguladores de tensão McGraw-Edison VR-32, da Cooper Power Systems, são autotransformadores reguladores e têm a capacidade de oferecer níveis de compensação em até 10%, acima ou abaixo da tensão de operação, em 35 passos de 0,625%. Esse equipamento é disponibilizado com tensões nominais de 2400 a 34500 volts.

O dispositivo encontra-se também equipado com um sistema de automação para o controle das tensões; um reator no dispositivo de comutação, possibilitando o chaveamento sem abertura do circuito; e a chave reversora, possibilitando o funcionamento do regulador como elevador e

abaixador. A Figura 1.4 ilustra o diagrama elétrico simplificado do equipamento regulador, assim como uma foto do mesmo.

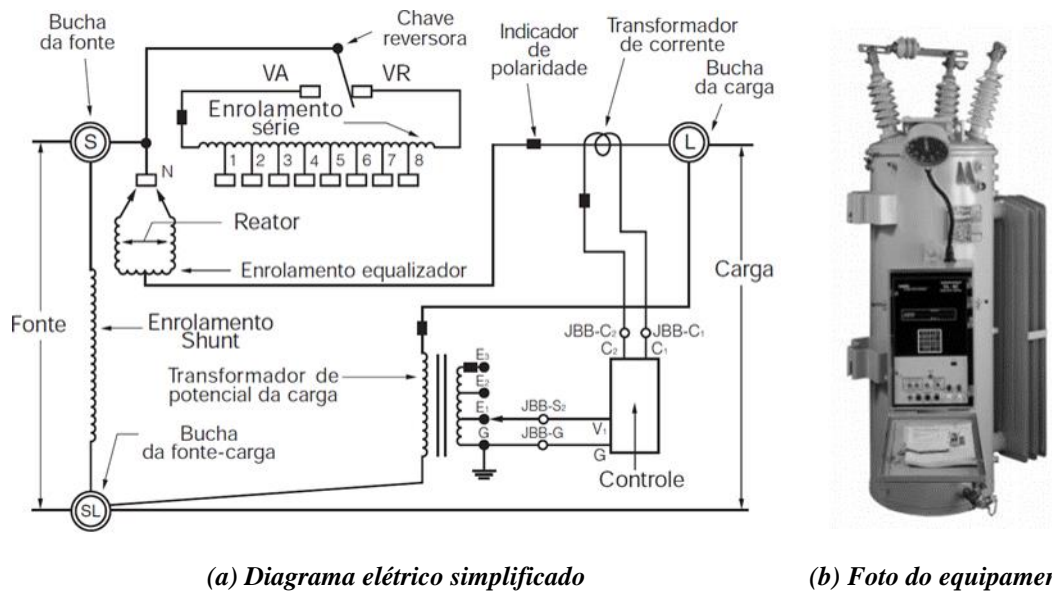
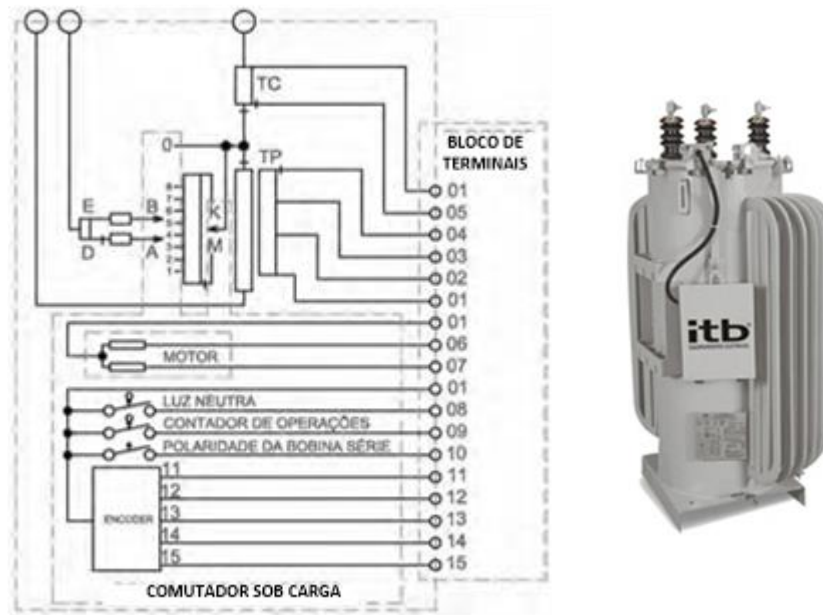


Figura 1.4 - Regulador Cooper VR-32

1.3.3 ITB RAV-2 [9]

Produzido nacionalmente pela empresa ITB Equipamentos Elétricos LTDA, o RAV-2 é um regulador de tensão monofásico automático a óleo constituído por tapes que totalizam 33 derivações, sendo capaz de regular a tensão da rede em até 10% com passos de 0,625% da tensão nominal. As medidas e análises dos valores de linha são feitos por um microprocessador controlado por um dispositivo eletrônico que coordena de forma automática o funcionamento do comutador de derivações sob carga. A Figura 1.5 mostra a foto do equipamento supracitado.



(a) Diagrama simplificado

(b) Foto do equipamento

Figura 1.5 - Regulador ITB RAV-2

1.4 REGULADORES ELETROMAGNÉTICOS ESPECIAIS

Os reguladores de ângulo de fase mecânicos (*Mechanical phase angle regulators*) ou transformadores defasadores (*phase-shifting transformers*) foram introduzidos na década de 30 visando ao aumento da eficiência na utilização de linhas de transmissão. Esses, originalmente voltados ao controle do fluxo de potência ativa a partir da variação do ângulo delta (δ), são também capazes de proporcionar a regulação de tensão apenas no tangente à sua amplitude. Para atingir esse objetivo, o sistema utiliza-se de transformadores trifásicos, em série e paralelo, os quais somam vetorialmente tensões defasadas, com módulos e ângulos distintos.

O conceito básico da regulação de tensão e ângulo de fase pauta-se na adição de um componente de tensão em fase ou em quadratura com a tensão em um determinado ponto da rede em vias de elevar ou abaixar a magnitude ou ângulo da tensão final para um valor especificado. Dessa forma, a regulação da tensão poderia ser obtida pela adição de uma fonte de tensão, de magnitude controlada, em série com a tensão do sistema e a tensão no ponto a ser regulado, como representado na Figura 1.6. Esses arranjos são designados por “reguladores de magnitude e fase” ou, do inglês, “*phase-shift regulators*” [20], [27] e se apresentam como a base motivadora dos trabalhos conduzidos nesta proposta de dissertação.

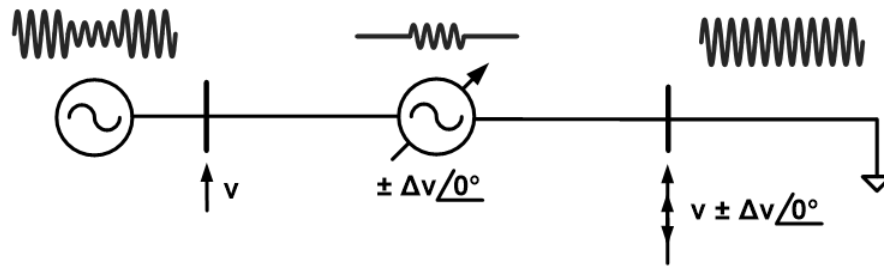


Figura 1.6 - Conceituação do processo de regulação via injeção série de tensão

Um exemplo de implementação desse conceito é exposto na Figura 1.7, na qual se pode observar que a tensão controlável é obtida a partir de tapes extraídos de um autotransformador trifásico e transferida para o primário de um transformador conectado em série e responsável por injetar tal tensão, promovendo a regulação necessária à jusante. A unidade eletromagnética conectada em paralelo é comumente referida como transformador de excitação, enquanto a unidade série é denominada por transformador de acoplamento. Assim, fica evidenciado que as tensões injetadas estão em fase com as tensões nas três fases, respectivamente, como ilustrado no diagrama fasorial da figura abaixo. Em consonância com tais premissas, esses reguladores podem alterar o valor do módulo e ângulo das tensões injetadas a partir da utilização de arranjos de bobinas que são alternadas através de contatores eletromagnéticos ou outro meio mecânico.

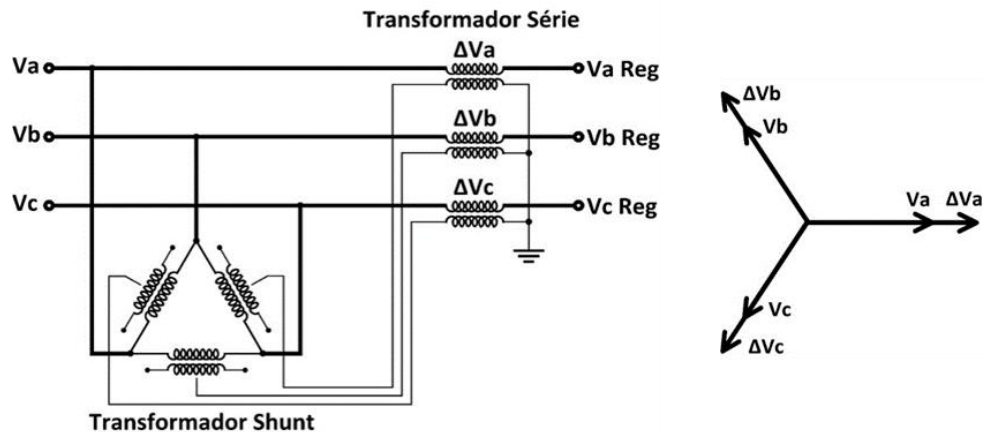


Figura 1.7 - Arranjo físico típico de um regulador série de tensão

À luz do exposto, fica, pois, evidenciado que, muito embora se reconheça a existência de inúmeros produtos disponíveis para o atendimento das questões aqui postas, o tema ainda tem motivado muitos pesquisadores na busca de novas concepções visando, dentre outros aspectos: simplicidade operacional, robustez, valores de investimento competitivos, instalações físicas menores, custos de manutenção reduzidos, maior índice de nacionalização e propriedades

operativas compatíveis com os requisitos impostos. A procura por tecnologias com tais propriedades apresenta-se, assim, como o grande motivador para a pesquisa aqui desenvolvida.

1.5 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

Empregando arranjos físicos totalmente eletromagnéticos no que tange às suas partes de potência, surge a proposta contemplada nesta dissertação de mestrado, a qual foi designada por Regulador Eletromagnético de Tensão – RET. O arranjo, em sua essência, é formado por duas unidades eletromagnéticas fundamentais. Uma primeira destina-se à extração de energia da rede, materializada na forma de um transformador de excitação conectado em paralelo com a mesma; e uma segunda, responsável pela inserção, em série com o alimentador principal, de uma tensão compatível ao enquadramento das tensões de suprimento nos termos requeridos pela legislação, representada por um transformador de acoplamento.

O dispositivo focado nesta dissertação teve sua concepção inicialmente concebida nas pesquisas materializadas em [28], onde se deu a definição da sua estrutura física, estratégia de controle, modelagem e implementação computacional no simulador ATP. Adicionalmente, foram também contemplados os primeiros testes laboratoriais utilizando um protótipo do regulador de tensão em escala reduzida, proporcionando resultados preliminares de desempenho promissores para a ratificação do produto.

Visando avançar no processo de controle, em [23] encontram-se relatadas as pesquisas conduzidas no sentido de se estabelecer uma estratégia alternativa para o controle eletrônico da tensão de compensação baseada na utilização de dispositivos eletrônicos com controle de seus ângulos de chaveamento, em detrimento do uso de tapes discretos presentes na concepção inicial, em vias de se controlar com maior precisão o valor da tensão de compensação e diminuir os tempos de resposta do equipamento. Nesse trabalho, apresentou-se ainda a modelagem computacional do equipamento regulador e de sua nova concepção de controle e chaveamento.

Diante do exposto, fica então registrado o reconhecimento de que os desenvolvimentos que se apresentam como cerne desta dissertação são contribuições adicionais ao processo do domínio da tecnologia dos compensadores aqui denominados por RET, tendo em vista o fato de que todas as pesquisas até então feitas foram realizadas no contexto de modelos de dispositivos contidos na biblioteca de recursos do simulador ATP, com as devidas adequações que se fizeram necessárias à obtenção da representação no domínio do tempo.

Avançando no contexto das técnicas para representação e análise do equipamento em questão e também nas avaliações de desempenho do produto, surge a necessidade de mecanismos

que conduzam, de forma efetiva, sistematizada e simples, aos estudos aqui considerados. Neste âmbito, aparece a clássica técnica de análise fundamentada no domínio da frequência, a qual se apresenta como ponto focal desta dissertação. Assim procedendo, torna-se factível o estabelecimento de uma estratégia de modelagem e análise inovadora em relação aos desenvolvimentos até então feitos. A utilização de modelos no domínio da frequência permite avaliar qualitativamente o comportamento dos sistemas, além de proporcionar uma visualização mais direta do tema e da operacionalidade dos dispositivos no que tange ao funcionamento dos mesmos e interação com as redes elétricas. A obtenção de tal modelo é de grande utilidade para a tomada de decisões associadas com a parametrização e dimensionamento das unidades de potência, análise de desempenho e definições das técnicas de controle, além de ser mais rápidas e necessitarem de menor esforço computacional.

Isto posto, segue que o trabalho em pauta apoia-se, fundamentalmente, no atendimento aos desafios sintetizados a seguir:

- Definição de um modelo matemático no domínio da frequência para o regulador e estudos de desempenho frente a variações na tensão de suprimento;
- Análise comparativa entre as respostas do modelo nos domínios da frequência, tempo e de um protótipo do regulador de tensão eletromagnético em escala reduzida.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do presente capítulo introdutório, esta pesquisa apresenta-se desenvolvida e documentada dentro da seguinte estrutura organizacional:

Capítulo 2: Concepção Física do Regulador de Tensão e sua Modelagem no Domínio da Frequência

Em consonância com trabalhos anteriores, essa unidade da dissertação tem como objetivo a apresentação dos principais conceitos relacionados ao dispositivo regulador de tensão – RET, abordando sua concepção física, características operacionais e estratégia de controle. Na sequência, é apresentada a proposta de modelagem do dispositivo e sua atuação utilizando, para tanto, recursos da técnica de representação no domínio da frequência. Tendo em vista as particularidades associadas com o funcionamento quando da regulação de tensões inferiores e superiores à requerida, tratamentos distintos

são conduzidos para contemplar tais situações operacionais.

Capítulo 3: Validação da Modelagem do Regulador no Domínio da Frequência

Visando à obtenção de uma base de dados destinada ao processo avaliativo e validação da proposta de modelagem, a estratégia utilizada apresenta-se, num primeiro plano, fundamentada na realização de experimentos laboratoriais, utilizando-se, para tanto, de um protótipo de regulador já concebido. Uma vez definido o estudo de caso a ser utilizado para os trabalhos, os respectivos desempenhos práticos são, então, correlacionados com resultados de estudos computacionais conduzidos através do simulador ATP, já disponibilizado, e, sequencialmente, utilizando os recursos atrelados com a modelagem no domínio da frequência focada na dissertação. A avaliação da aderência do modelo proposto é estabelecida através da análise comparativa entre as três estratégias mencionadas.

Capítulo 4: Conclusões

Por fim, é apresentada uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados ao trabalho como um todo.

CAPÍTULO 2

CONCEPÇÃO FÍSICA DO REGULADOR DE TENSÃO E SUA MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Empregando arranjos físicos totalmente eletromagnéticos no que tange às suas partes de potência e, em sintonia com outros trabalhos que contemplaram o tema ora em desenvolvimento, [28] e [23], surge a proposta explorada nesta pesquisa, a qual foi designada por Regulador Eletromagnético de Tensão (RET). Esta última terminologia será empregada para muitas citações utilizadas na identificação do dispositivo em pauta.

Muito embora em [28] tenham sido apresentados detalhes do dispositivo ora mencionado, consideram-se essenciais, nesta unidade da dissertação, as discussões que venham a elucidar os princípios físicos, principais componentes, lógica operacional e outros aspectos próprios à concepção do regulador focado no trabalho.

Uma vez apresentados os principais conceitos, procede-se, sequencialmente, a uma análise da estratégia de controle do regulador e também do estabelecimento do seu modelo no domínio da frequência, o qual se destina à representação do dispositivo visando meios para a determinação dos parâmetros essenciais ao seu dimensionamento básico, assim como a definição de um procedimento que permita, no contexto operativo, a avaliação de desempenho do regulador aos fins aqui estabelecidos.

2.2 ESTRUTURA FÍSICA DO REGULADOR

O arranjo físico para o regulador focado nesta pesquisa, como explicitado em [28], apresenta-se constituído por duas unidades eletromagnéticas: uma destinada à extração de energia da rede, materializada na forma de um autotransformador conectado em paralelo com o circuito (transformador de excitação); e uma segunda, sob a forma de um transformador em série com o alimentador principal, direcionada à inserção de uma tensão compatível ao enquadramento do suprimento nos termos requeridos pela legislação (transformador de acoplamento). O complexo em pauta encontra-se indicado na Figura 2.1, na qual se observa que o transformador de excitação é instalado a jusante do transformador de acoplamento. Isto resulta no fato de que o processo de regulação compreende a compensação da variação da tensão advinda da rede de suprimento e também das quedas atreladas com a unidade série.

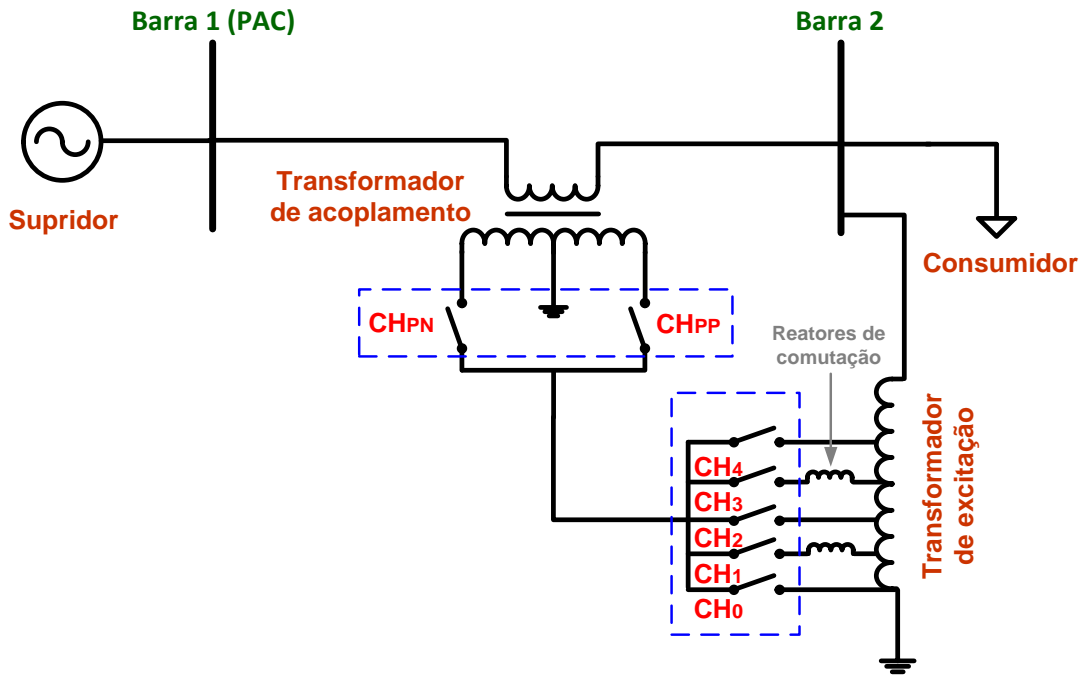


Figura 2.1 - Estrutura física do RET com mudança de tapetes discretos sob carga

Além das unidades de potência propriamente ditas, a figura evidencia ainda as seguintes chaves:

- CH_{PN} – a chave de polaridade negativa destina-se a prover meios para uma regulação de sobretensões através da compensação negativa de tensão;
- CH_{PP} – a chave de polaridade positiva destina-se a prover meios para uma regulação de subtensões por meio da compensação positiva de tensão;
- CH_0 a CH_4 – chaves ou tapetes responsáveis pela definição do nível de tensão de compensação almejado.

Portanto, as chaves de polaridade (CH_{PN} e CH_{PP}) destinam-se à definição do sentido de compensação, enquanto aquelas conectadas aos tapetes do transformador de excitação têm como função determinar a magnitude da tensão de compensação.

Dentre as propriedades que nortearam a opção pelo arranjo ora apresentado, ressaltam-se:

- 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 chaveamentos mecânicos em níveis de tensão inferiores à nominal ou de operação;
- Processo de compensação de tensões sem interrupções da corrente de 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.

Por fim, visando a uma maior compreensão a respeito dos objetivos traçados, têm-se simplificadamente, na Figura 2.2, a ação esperada para o compensador em pauta. Nesta se pode observar que a polaridade da compensação de tensão, se positiva ou negativa, é determinada a partir da escolha entre as chaves CH_{PP} ou CH_{PN} , que conectam o autotransformador às extremidades do enrolamento secundário do transformador série, permitindo, assim, a compensação de elevações ou reduções da tensão a jusante do ponto de instalação do equipamento, enquanto a escolha entre as chaves conectadas aos diversos tapes do autotransformador permite determinar a magnitude da tensão de compensação a ser inserida.

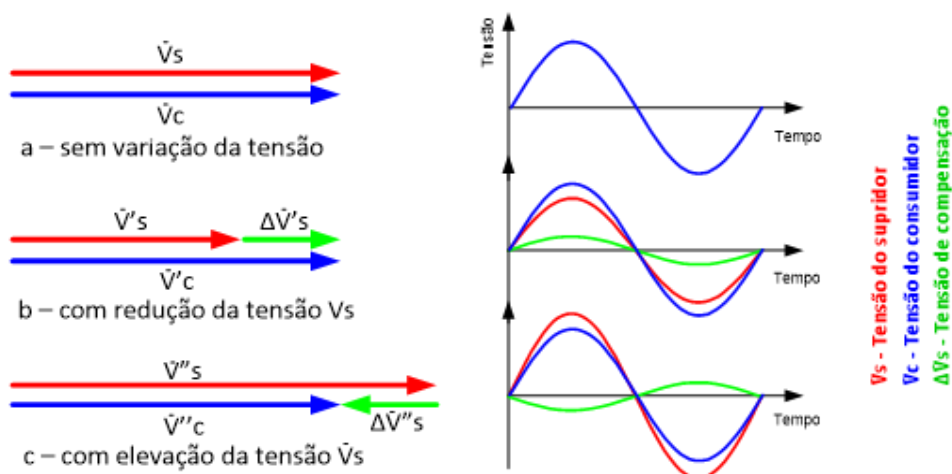


Figura 2.2 - Diagrama fasorial ilustrativo do funcionamento do regulador

2.3 O CONTROLE DO REGULADOR

No que se refere à estratégia do controle do RET, a qual deve ser direcionada à seleção do tape e respectiva polaridade da tensão de compensação, essa se encontra sintetizada no diagrama de

- Através de mudanças sequenciais dos tapes, em degraus definidos pelo regulador, faz-se a busca do tape considerado mais adequado ao processo de restauração da tensão;
- Tomada a decisão de regulação (troca do tape, acima ou abaixo do atual), as informações sobre o tape selecionado são repassadas ao módulo decisório;
- Na sequência, procede-se à identificação do comando enviado pelo módulo de leitura da tensão eficaz e do tape a ser acionado;
- Identificado o comando, o controle passa então a buscar um zero de tensão para o acionamento do tape regulador;
- Caso não tenha sido requerida nenhuma correção, ou seja, a tensão na carga encontrar-se dentro da faixa permitida, trava-se a comutação e a condição anterior permanece ativada, reiniciando assim o processo;
- Por outro lado, uma vez manifestada alteração da tensão da rede e definida a necessidade de mudança de tapes para a regulação dessa grandeza, o tape é prontamente acionado, observando-se, todavia, que o *firmware* seja dotado de recursos que promovam um atraso programado no tempo de resposta do regulador visando contornar possíveis oscilações atreladas com respostas imediatas quanto à definição do tape;
- Por fim, tendo-se acionado o tape escolhido, o processo é repetido como um todo.

2.4 ESTRATÉGIA PARA A MODELAGEM DO REGULADOR

Em consonância com procedimentos clássicos, os trabalhos de modelagem de dispositivos e complexos elétricos apresentam-se embasados em duas técnicas de representação. Uma fundamentada nos princípios da representação no domínio do tempo, com suas particularidades e propriedades, e outra, baseada no domínio da frequência. Esta última, conforme previamente exposto, possui atributos que a tornam bastante atrativa para muitas aplicações na medida em que proporciona uma visualização mais direta da operacionalidade dos dispositivos e a interação dos mesmos com a rede elétrica, além de contribuir para simplificação e rapidez de cálculos e melhor performance computacional.

Para fins desta pesquisa, muito embora se reconheça o fato de que modelos no domínio do tempo já tenham sido implementados com sucesso no simulador ATP, fato este que proporcionou recursos para estudos de desempenho transitório, dinâmico e de regime permanente, e cujos

detalhes podem ser encontrados em [28], vale ressaltar que o cerne do processo de representação utilizado nesta dissertação encontra-se alicerçado na modelagem que utiliza os princípios do domínio da frequência.

Dentre os motivos que justificaram tais buscas ressaltam-se os seguintes aspectos:

- Esta estratégia conduz a modelos que permitem uma visualização mais direta do tema e da operacionalidade do equipamento no que tange ao funcionamento da rede elétrica com a presença do RET;
- Oferecimento de uma nova proposta de parametrização e dimensionamento do regulador.

Visando, pois, ao atendimento das premissas supracitadas, o modelo proposto apresenta-se com a seguinte fundamentação:

- A fonte de suprimento é tratada na forma de um circuito equivalente de *Thévenin*;
- As unidades físicas constituintes do regulador propriamente dito, com destaque aos componentes eletromagnéticos compostos pelo transformador de excitação e transformador de acoplamento, são modeladas de forma compatível com as técnicas empregadas para a representação de transformadores e reatores no domínio da frequência;
- A carga suprida é tratada na forma de uma impedância constante;
- Os equacionamentos são realizados para uma posição de chaves e tapes definida pelo controle e responsável pela injeção de uma determinada tensão de compensação fixa.

Também, tendo em mente que o equipamento regulador deverá atuar no sentido de compensar tensões inferiores e superiores à desejada ou de referência, os trabalhos de equacionamento serão realizados para duas condições operativas distintas: uma associada com a compensação de reduções de tensão, outra, para os casos de elevações dessa grandeza.

Em atenção a esses dois modos operacionais, procede-se, a seguir, à representação do arranjo físico com seu respectivo circuito equivalente e, por fim, à modelagem matemática propriamente dita.

2.5 MODELAGEM DO RET NA CONDIÇÃO DE COMPENSAÇÃO POSITIVA DE TENSÃO

A Figura 2.4 ilustra a topologia simplificada do regulador quando trabalhando em compensação positivo de tensão. O transformador de excitação foi apresentado contendo apenas um tape conectado ao secundário e o transformador de acoplamento, com apenas dois de seus três enrolamentos.

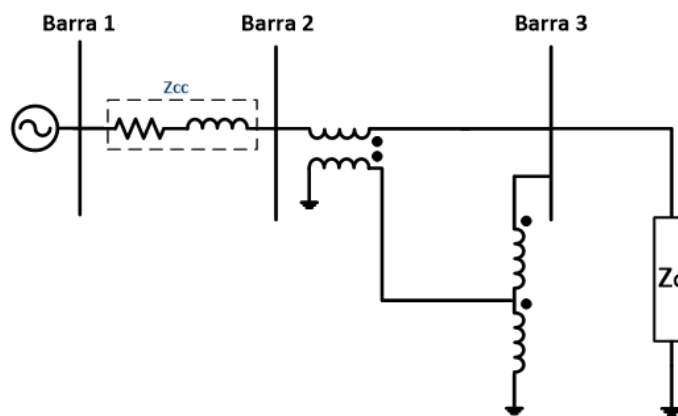


Figura 2.4 - Topologia do RET – modo elevador

2.5.1 TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO

A Figura 2.5 elucida os fluxos de corrente em ambas as unidades eletromagnéticas do RET. No que tange ao transformador de acoplamento, por se tratar de um transformador convencional com mesma relação de espiras entre o primário e secundário, as correntes que circulam por ambos os enrolamentos devem ser iguais [29]. Portanto, a corrente no secundário do transformador de acoplamento é igual à corrente fornecida pela rede (I_F).

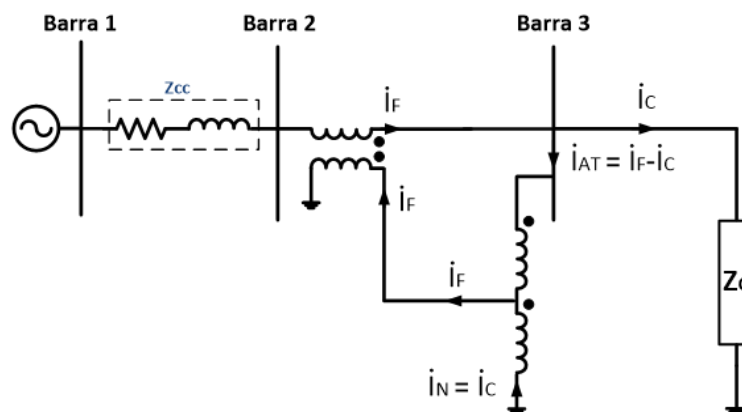


Figura 2.5 - Fluxos de corrente no transformador de excitação – modo elevador

Sabe-se que a corrente no primário do autotransformador é dada pela diferença entre as correntes da fonte (\dot{I}_F) e da carga (\dot{I}_C). Portanto:

$$\dot{I}_{AT} = \dot{I}_F - \dot{I}_C \quad (2.1)$$

Ainda, por se tratar de um autotransformador abaixador, a corrente no secundário (\dot{I}_F) é maior que aquela do primário (\dot{I}_{AT}). Em outras palavras, a corrente que se estabelece no neutro (\dot{I}_N) apresenta-se com o sentido indicado na Figura 2.5. Assim:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_F - \dot{I}_{AT} \quad (2.2)$$

Substituindo a equação (2.2) em (2.1), tem-se a corrente do neutro é igual à corrente da carga:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_C$$

Diante disso, a corrente que circula pelo neutro do autotransformador é igual à corrente da carga, afirmativa essa atrelada com a condição do RET atuando como elevador de tensão.

Portanto, a potência do transformador de excitação, tal como ocorre para os reguladores convencionais, pode ser determinada através da relação:

$$S_{TEELE} = I_C \cdot V_{TESec} = I_C \cdot (V_n \cdot \Delta V_{\%})$$

Ou:

$$S_{TEELE} = S_{Carga} \cdot \Delta V_{\%} \quad (2.3)$$

Onde: S_{TEELE} é a potência do transformador de excitação atuando como elevador, V_{TESec} , a tensão no secundário do mesmo, V_n , a tensão nominal do sistema; e $\Delta V_{\%}$, o percentual da tensão extraída pelo tape do transformador de excitação.

A título de ilustração, em se tratando de um autotransformador monofásico com apenas um tape com tensão equivalente a 10% da tensão nominal da carga, responsável por regular uma carga

monofásica de 2 MVA num sistema trifásico em 13,8 kV, tem-se que a potência da unidade paralela será de:

$$I_C = \frac{S_{carga}}{V_{carga}} = \frac{2 \cdot 10^6}{\left(\frac{13,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right)} = 251,02 \text{ A}$$

$$S_{TELE} = I_C \cdot V_{TESec} = 251,02 \cdot \left(\frac{13,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right) = 200 \text{ kVA}$$

Portanto, percebe-se que, para o presente caso, o autotransformador deve possuir uma potência de 10% do total da carga, quando se tratar de um dispositivo destinado ao processo da regulação de 10% da tensão.

2.5.2 TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO

Determinados os parâmetros do transformador de excitação, procede-se à análise do transformador de acoplamento, ou seja, da unidade responsável pela injeção da tensão de compensação em série com o alimentador.

Haja visto que os dois enrolamentos primários (inferiores), conectados às chaves de polaridade positiva e negativa, têm o mesmo número de espiras que o enrolamento secundário (superior e conectado em série com o alimentador) e, ainda, que esses não operam simultaneamente, pode-se afirmar que o transformador de acoplamento sempre possui relação de transformação unitária, como observado na Figura 2.1.

Desprezando inicialmente as quedas de tensão em ambas as unidades de transformação, a tensão extraída pelo tape do transformador de excitação é a mesma imposta sobre o primário do transformador de acoplamento e induzida no seu secundário.

A Figura 2.6 ilustra o circuito simplificado do RET atuando como elevador de tensão e as correntes que se estabelecem entre as partes.

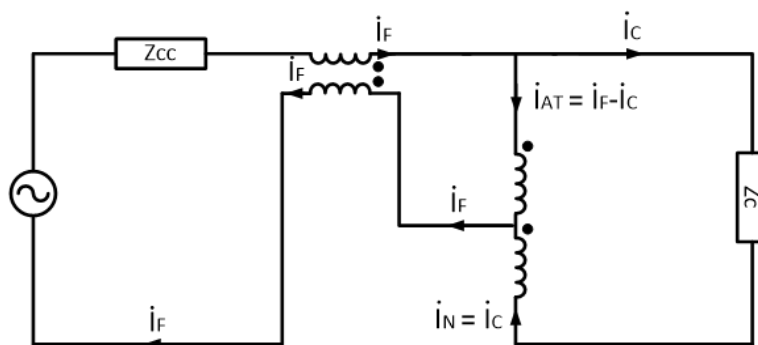


Figura 2.6 - Circuito simplificado do RET – modo elevador

Conforme discutido, a corrente da rede (\dot{I}_F) circula pelo enrolamento superior do transformador de acoplamento e é igual à corrente fornecida pelo secundário do transformador de excitação, como apresentado na Figura 2.6. Ademais, essa mesma corrente é igual à soma das correntes da carga (\dot{I}_C) e do autotransformador (\dot{I}_{AT}). Portanto:

$$\dot{I}_{AT} = \dot{I}_C \frac{N_2}{N_1}$$

Por conseguinte, a corrente \dot{I}_F pode ser calculada por:

$$\dot{I}_F = \dot{I}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \quad (2.4)$$

Diante do exposto, segue que a potência do transformador de acoplamento é dada por:

$$S_{TAELE} = I_F \cdot V_{TAprim} = I_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \Delta V_{\%} \cdot V_C$$

Ou:

$$S_{TAELE} = S_{Carga} \cdot \Delta V_{\%} \cdot \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \quad (2.5)$$

Complementarmente, pode-se ainda estabelecer uma relação matemática entre as potências das duas unidades transformadoras em foco, a saber, o transformador de excitação e o de acoplamento. Essa se apresenta como:

$$S_{TAELE} = S_{TEELE} \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \quad (2.6)$$

Dessa forma, a potência do transformador de acoplamento depende da potência total da carga suprida, do grau de compensação de tensão que se almeja e da relação de transformação do transformador de excitação.

De forma ilustrativa, para atender à mesma carga de 2 MVA suprida em 13,8 kV acima referida e, também, diante da necessidade da regulação de uma queda de tensão de 10% de seu

valor nominal, tem-se a potência da unidade série do RET. Para tanto, basta lembrar que a relação de transformação da unidade paralela é tal que a tensão derivada no secundário da mesma (N_2) seja igual a 10% da tensão total sobre seus enrolamentos ($N_1 + N_2$). Isto conduz a:

$$S_{TAELE} = 2.10^6.0,1.\left(\frac{90\% + 10\%}{90\%}\right) = 222,22 \text{ kVA}$$

Assim, para cumprir aos objetivos supra postos, quais sejam, a restauração da tensão do consumidor quanto da ocorrência de uma queda de 10% da tensão nominal da carga, constata-se que a potência da unidade série deve ser igual a 11,11% do total da carga suprida.

2.5.3 MODELAGEM DO REGULADOR

Na presente seção é apresentada a modelagem matemática do RET operando como elevador de tensão. Ao contrário dos circuitos previamente apresentados, na Figura 2.7, o transformador de acoplamento é apresentado na posição vertical visando à uma melhor visualização do circuito equivalente das unidades componentes e respectiva descrição matemática.

Como pode ser observado, a fonte é representada pela tensão \dot{V}_{TH} e sua impedância equivalente de Thévenin ($R_{TH} + jX_{TH}$), e, ainda, os transformadores são considerados através de seus circuitos elétricos equivalentes simplificados, tendo suas impedâncias concentradas em apenas um de seus enrolamentos. Nesta seção, desconsidera-se a presença dos ramos de magnetização para ambas as unidades transformadoras, ou seja, as correntes de magnetização são negligenciadas.

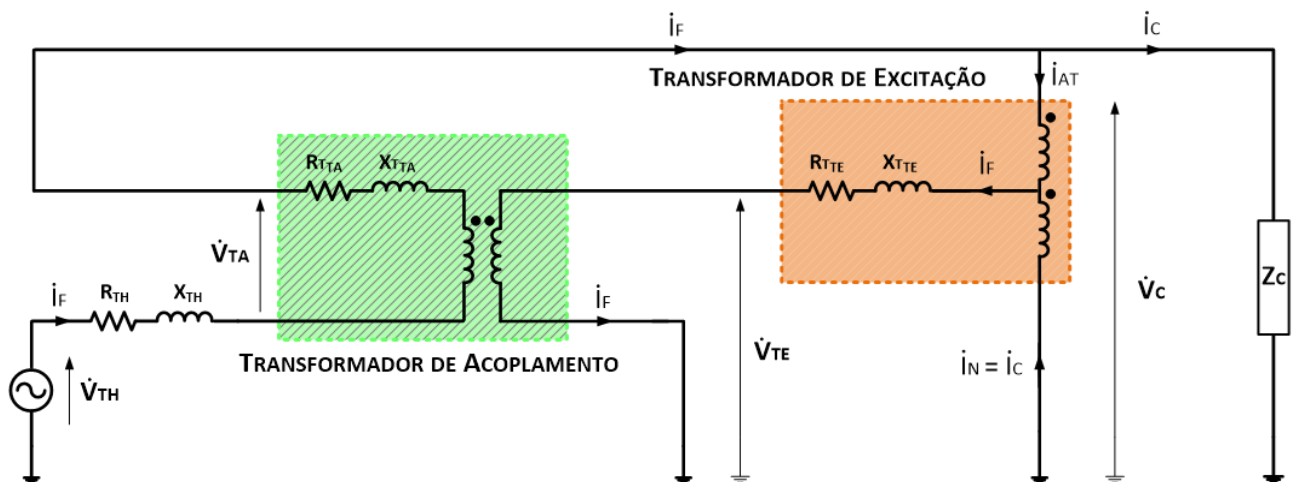


Figura 2.7 - Circuito equivalente do RET – modo elevador

A figura destaca ainda as três tensões abaixo identificadas:

- \dot{V}_C – tensão na carga e associada com o primário do transformador de excitação;
- \dot{V}_{TE} – tensão extraída do secundário do transformador de excitação;
- \dot{V}_{TA} – tensão no secundário do transformador de acoplamento, isto é, a própria tensão de compensação do RET.

Uma vez estabelecida a estrutura física completa e a operacionalidade sob o ponto de vista elétrico, apresenta-se, na sequência, os modelos matemáticos individuais das duas unidades individuais de transformação e o regulador completo.

(a) Modelagem do transformador de excitação

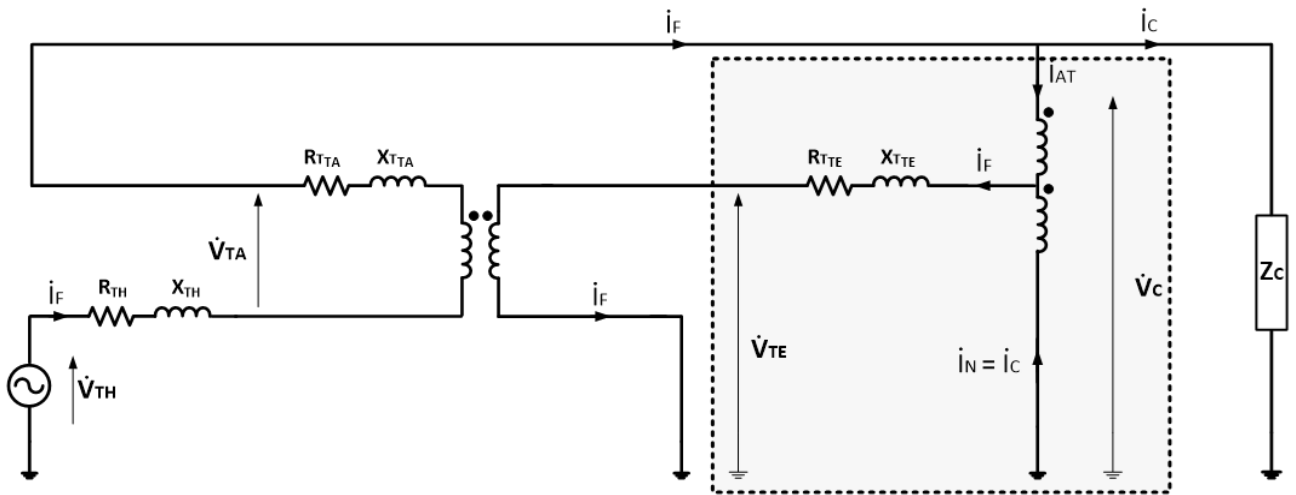
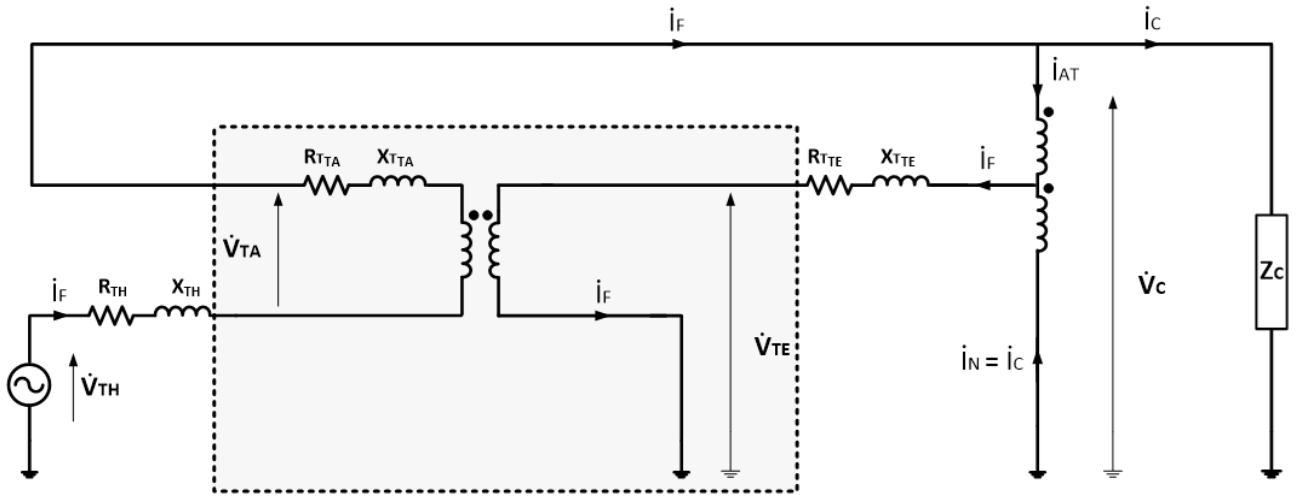


Figura 2.8 - Malha do transformador de excitação – modo elevador

A primeira parte do circuito equivalente do regulador refere-se à operação do transformador de excitação, como destacado na Figura 2.8. Como parâmetros de entrada, tem-se a tensão da carga (\dot{V}_C), as impedâncias do transformador e as correntes que circulam por ambos os enrolamentos. Referindo todos os parâmetros para o lado de baixa de tensão, tem-se:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{TE} &= \dot{V}'_C - \dot{I}_F \cdot \dot{Z}_{TTE} \\ \dot{V}_{TE} &= \dot{V}_C \left(\frac{N_2}{N_1 + N_2} \right) - \dot{I}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \dot{Z}_{TTE}\end{aligned}\quad (2.7)$$

(b) Modelagem do transformador de acoplamento*Figura 2.9 - Malha do transformador de acoplamento – modo elevador*

De acordo com o apresentado na Figura 2.9, a tensão imposta sobre o secundário do transformador de acoplamento é a própria tensão no secundário do autotransformador (\dot{V}_{TE}) calculada na seção precedente. Em se tratando de um transformador com mesmo número de espiras entre os enrolamentos primário e secundário, é possível calcular a compensação de tensão (\dot{V}_{TA}) através de:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{TA} &= \dot{V}'_{TE} - I_F \cdot \dot{Z}_{TTA} = \dot{V}_{TE} - I_F \cdot \dot{Z}_{TTA} \\ \dot{V}_{TA} &= \dot{V}_{TE} - I_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \dot{Z}_{TTA}\end{aligned}\quad (2.8)$$

(c) Modelagem do Regulador – compensação positiva de tensão

Por fim, a Figura 2.10 é indicativa do circuito equivalente do complexo como um todo, incluindo a fonte de suprimento, a rede de alimentação, a carga suprida e o regulador em pauta.

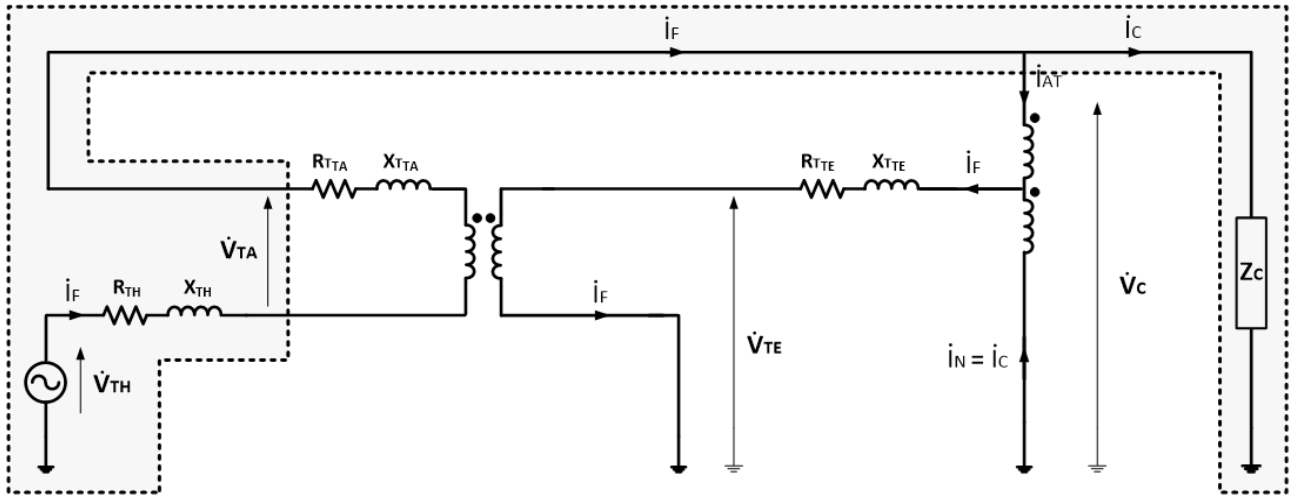


Figura 2.10 - Malha principal – modo elevador

$$\begin{aligned}\dot{V}_{TH} &= \dot{i}_F \cdot \dot{Z}_{TH} - \dot{V}_{TA} + \dot{V}_C = \dot{i}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \cdot \dot{Z}_{TH} - \dot{V}_{TA} + \dot{i}_C \cdot \dot{Z}_C \\ \dot{V}_{TH} &= \dot{i}_C \left[\left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \dot{Z}_{TH} + \dot{Z}_C \right] - \dot{V}_{TA}\end{aligned}\quad (2.9)$$

2.6 MODELAGEM DO RET NA CONDIÇÃO DE COMPENSAÇÃO NEGATIVA DE TENSÃO

Na presente seção, analisa-se a operação do RET atuando a partir da inserção de compensações negativas com fins à mitigação de sobretensões. Mais uma vez, como ilustrado na Figura 2.11, representa-se o transformador de acoplamento com apenas dois de seus enrolamentos. Contudo, na função de redutor, o enrolamento inferior representado é conectado à chave de polaridade negativa, conforme indicado na Figura 2.1.

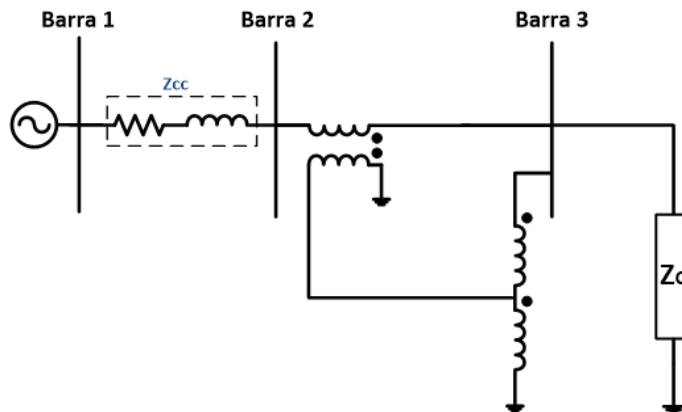


Figura 2.11 - Topologia do RET – modo redutor

2.6.1 TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO

Apesar das diferenças operacionais encontradas pelo regulador ao se trabalhar como elevador ou redutor, as tensões aplicadas sobre os enrolamentos do transformador de excitação são idênticas, para um mesmo tape em funcionamento.

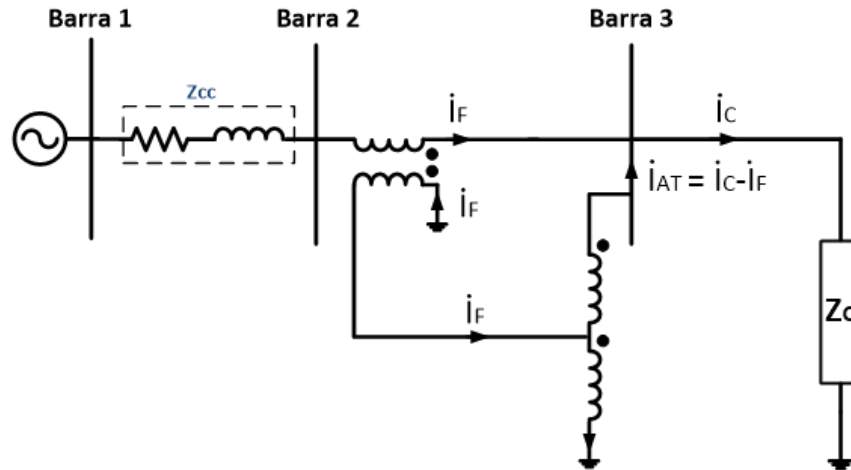


Figura 2.12 - Fluxos de corrente no transformador de excitação – modo redutor

Já no que tange à circulação das correntes, tem-se diferenças importantes entre os dois modos de funcionamento do dispositivo. Como se pode observar pela análise da Figura 2.12, \dot{I}_F vai do ponto neutro do transformador de acoplamento em direção ao de excitação, em sentido contrário ao observado na operação do RET como elevador.

Ainda, a corrente no primário do transformador de excitação (\dot{I}_{TE}) é tal que se soma à corrente da rede (\dot{I}_F) para compor a componente de carga (\dot{I}_C), como se segue:

$$\dot{I}_C = \dot{I}_F + \dot{I}_{AT} \quad (2.10)$$

Por se tratar de um autotransformador abaixador, a corrente que circula pelo seu primário (\dot{I}_{AT}) é proporcionalmente maior que a do secundário (\dot{I}_F) e, assim, a corrente do neutro (\dot{I}_N) deve ter o sentido tal qual indicado na Figura 2.12. Dessa forma:

$$\dot{I}_F = \dot{I}_{AT} + \dot{I}_N \quad (2.11)$$

E, ainda:

$$i_N = i_{AT} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.12)$$

Substituindo (12) em (11), tem-se:

$$i_F = i_{AT} \left(\frac{N_1 + N_2}{N_2} \right) \quad (2.13)$$

E, ainda, substituindo a equação (13) em (10), pode-se calcular a corrente no primário do transformador de excitação em função da corrente de carga:

$$i_{AT} = i_C \left(\frac{N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \quad (2.14)$$

De forma semelhante, substituindo a equação (14) em (10), tem-se a corrente da rede em função dessa mesma corrente:

$$i_F = i_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right)$$

Por fim, no que tange à corrente no neutro do transformador de excitação, expressa-se como se segue:

$$i_N = i_C \left(\frac{N_1}{N_1 + 2N_2} \right) \quad (2.15)$$

Fazendo uma análise comparativa entre os valores das correntes circulantes nos circuitos do RET atuando como elevador e redutor, a Tabela 2.1 resume os desenvolvimentos anteriormente abordados.

TABELA 2.1 - CORRENTES CIRCULANTES NO RET COMO ELEVADOR E REDUTOR

Corrente	Modo Elevador	Modo Redutor
\dot{I}_N	\dot{I}_C	$\dot{I}_C \left(\frac{N_1}{N_1 + 2N_2} \right)$
\dot{I}_{AT}	$\dot{I}_C \frac{N_2}{N_1}$	$\dot{I}_C \left(\frac{N_2}{N_1 + 2N_2} \right)$
\dot{I}_F	$\dot{I}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right)$	$\dot{I}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right)$

Sendo a relação do transformador de excitação sempre maior ou igual a 1, é possível observar que os valores das correntes \dot{I}_N , \dot{I}_C , e \dot{I}_F na condição de redutor serão sempre menores que aqueles relativos ao seu funcionamento como elevador.

De acordo com os desenvolvimentos anteriores, a potência do transformador de excitação é definida por:

$$S_{TERED} = I_N \cdot V_{TESec} = I_C \left(\frac{N_1}{N_1 + 2N_2} \right) \cdot (V_n \cdot \Delta V_{\%})$$

Ou:

$$S_{TERED} = S_{Carga} \cdot \Delta V_{\%} \left(\frac{N_1}{N_1 + 2N_2} \right) \quad (2.16)$$

Onde: S_{TERED} é a potência do transformador de excitação atuando como redutor, e V_{TESec} , a tensão em seu secundário.

Mais uma vez, tomando-se o exemplo de regulação de uma carga de 2 MVA em 13,8 kV, dispondo de um autotransformador com apenas um tape equivalente a 10% da tensão nominal da carga, a potência da unidade paralela será de:

$$S_{TERED} = 2 \cdot 10^6 \cdot 10\% \cdot \left(\frac{90\%}{90\% + 2 \cdot 10\%} \right) = 163,63 \text{ kVA}$$

Observa-se, pois, que, ao trabalhar como redutor de tensão, o transformador de excitação exige uma potência menor quando comparado à sua operação como elevador. Dessa forma, conforme o exemplo, o mesmo deve possuir uma potência equivalente a 8,2% do total da carga, em se tratando de um dispositivo destinado ao processo da regulação de 10% da tensão.

Ainda, em concordância com os valores das correntes em ambos os arranjos do regulador expostos na Tabela 2.1, pode-se fazer uma correlação entre as potências do transformador de excitação diante dos seus dois modos de operação:

$$S_{TERED} = S_{TELE} \left(\frac{N_1}{N_1 + 2N_2} \right) \quad (2.17)$$

É necessário citar que as duas unidades eletromagnéticas do RET devem ser dimensionadas de forma a trabalhar sob a condição operativa mais exigente, isto é, quando o mesmo atua na condição de elevador de tensão.

2.6.2 TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO

Em contrapartida ao observado na operação do regulador como elevador, a tensão imposta sobre o transformador de acoplamento encontra-se em oposição de fase com a tensão da rede, o que caracteriza a compensação negativa.

Analogamente ao raciocínio desenvolvido para o RET no modo elevador, é possível determinar um circuito equivalente simplificado do dispositivo operando como redutor de tensão, como observado na Figura 2.13, com vistas a simplificar a análise da circulação das correntes entre as unidades eletromagnéticas do dispositivo.

É possível perceber que as correntes do neutro (I_N) e da carga (I_C) somam-se na parte inferior do circuito, de forma que:

$$I_C + I_N = I_C + I_C \left(\frac{N_1}{N_1 + 2N_2} \right) = 2I_F \quad (2.18)$$

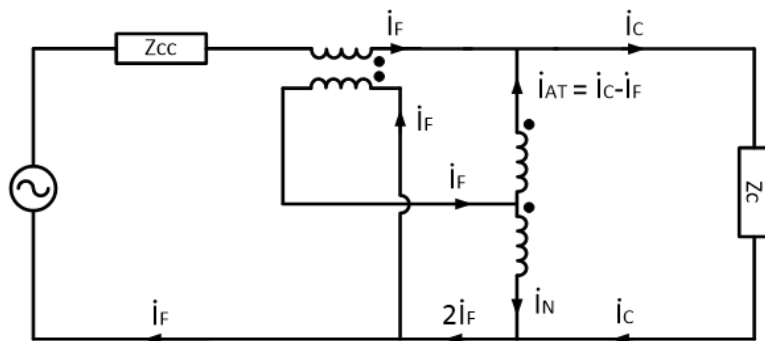


Figura 2.13 - Circuito simplificado do RET – modo redutor

Diante do exposto, segue que a potência do transformador de acoplamento pode também ser calculada a partir da potência total da carga, da porcentagem de regulação a que se almeja e da relação de espiras do transformador de excitação, como se segue:

$$S_{TARED} = I_F \cdot V_{TAPrim} = I_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \Delta V_{\%} \cdot V_C$$

$$S_{TARED} = S_{Carga} \cdot \Delta V_{\%} \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \quad (2.19)$$

E tomando mais uma vez como exemplo uma regulação de 10% da tensão nominal para o sistema apresentado nas análises precedentes, tem-se:

$$S_{TARED} = 2 \cdot 10^6 \cdot 10\% \cdot \left(\frac{0,9 + 0,1}{0,9 + 2,0,1} \right) = 181,82 \text{ kVA}$$

É possível observar que a potência requerida pelo transformador de acoplamento quando o RET trabalha como redutor de tensão é também menor que aquela já apresentada no modo elevador. De forma análoga ao apresentado no modo elevador, relacionando as potências das unidades série e paralela, tem-se:

$$S_{TARED} = S_{TERED} \cdot \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \quad (2.20)$$

Onde S_{TARED} e S_{TERED} representam a potência do transformador de acoplamento e do transformador de excitação, respectivamente, estando o RET a atuar como redutor de tensão. Sendo a relação entre o número de espiras N_1 e N_2 exposta na equação (20) sempre maior que 1, segue que a potência da unidade série é também maior comparada à da paralela.

2.6.3 MODELAGEM DO REGULADOR

No que tange à operação do RET como redutor de tensão, o circuito equivalente do dispositivo e sua modelagem matemática são apresentados a seguir. A Figura 2.14 mostra a rede representada por sua tensão e impedância equivalente de *Thévenin*, ambas as unidades

transformadoras representadas por seus circuitos elétricos simplificados, sendo suas impedâncias concentradas em apenas um de seus enrolamentos, e uma carga de impedância constante.

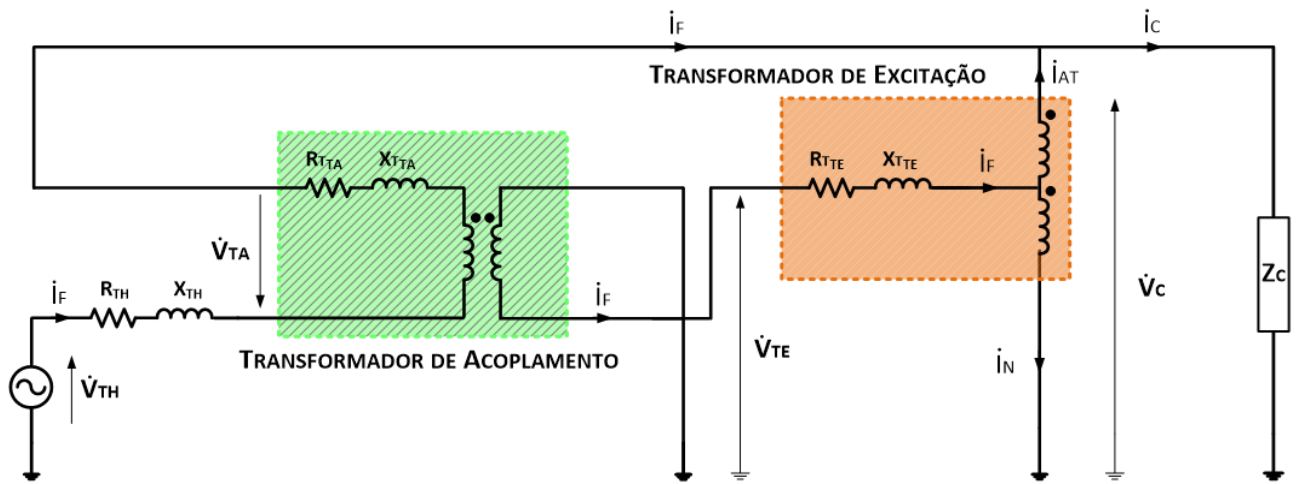
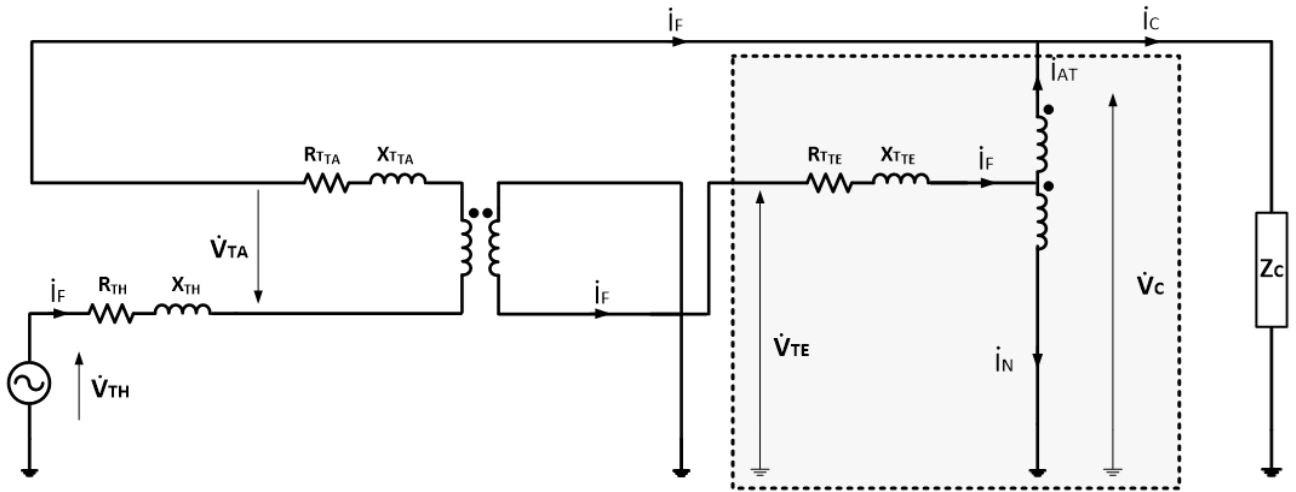


Figura 2.14 - Circuito equivalente do RET – modo redutor

A figura destaca as três tensões abaixo identificadas:

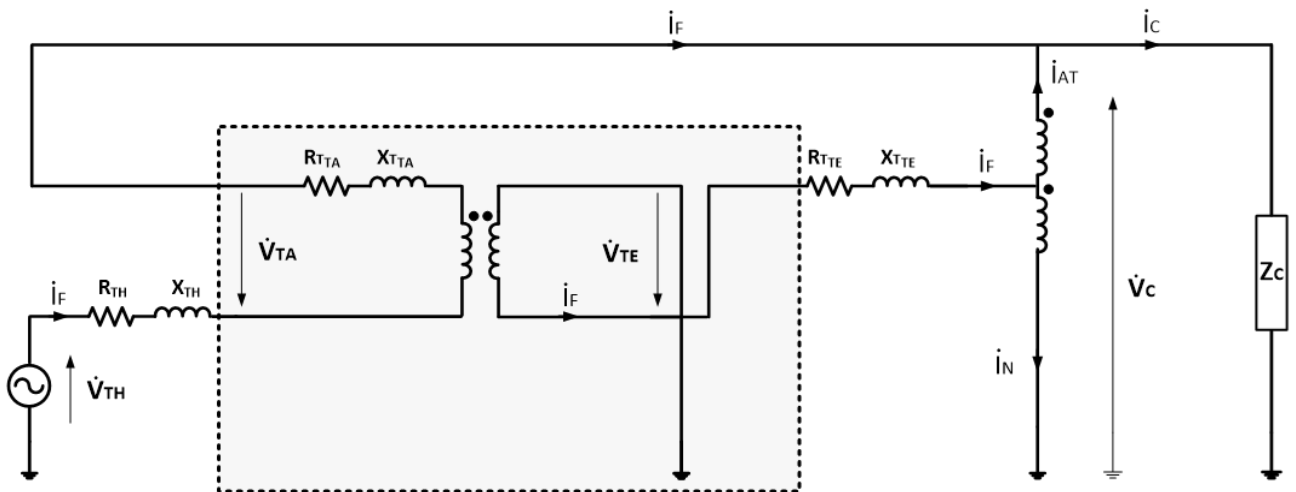
- \dot{V}_C – tensão na carga e associada com o primário do transformador de excitação;
- \dot{V}_{TE} – tensão extraída do secundário do transformador de excitação;
- \dot{V}_{TA} – tensão no secundário do transformador de acoplamento, isto é, a própria tensão de compensação do RET.

Analogamente aos desenvolvimentos estabelecidos na modelagem do regulador no modo elevador, aqui também se apresenta os modelos matemáticos individuais das duas unidades eletromagnéticas de transformação e, por fim, do regulador completo.

(a) Modelagem do transformador de excitação*Figura 2.15 - Malha do transformador de excitação – modo redutor*

A Figura 2.15 destaca a primeira parte do circuito equivalente do regulador, referente à operação do transformador de excitação. Conhecidas a tensão da carga (\dot{V}_C), impedâncias do transformador e as correntes que circulam pelos seus enrolamentos e, ainda, referindo todos os parâmetros para o lado de baixa de tensão, tem-se:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{TE} &= \dot{V}'_C + \dot{I}_F \cdot \dot{Z}_{TTE} \\ \dot{V}_{TE} &= \dot{V}_C \left(\frac{N_2}{N_1 + N_2} \right) + \dot{I}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \dot{Z}_{TTE}\end{aligned}\quad (2.21)$$

(b) Modelagem do transformador de acoplamento*Figura 2.16 - Malha do transformador de acoplamento – modo redutor*

A Figura 2.16 destaca as tensões e correntes no transformador de acoplamento em série com o alimentador principal, sendo que a tensão \dot{V}_{TE} , previamente calculada, é a fonte de tensão imposta ao primário do transformador de acoplamento. Sendo conhecidas a impedância do transformador e as correntes circulantes pelo mesmo e, sendo a relação de transformação da unidade série unitária, conclui-se que:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{TA} &= \dot{V}_{TE} + \dot{I}_F \cdot \dot{Z}_{TTA} \\ \dot{V}_{TA} &= \dot{V}_{TE} + \dot{I}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \dot{Z}_{TTA}\end{aligned}\quad (2.22)$$

(c) Modelagem do Regulador – compensação negativa de tensão

Finalmente, como mostra a Figura 2.17, tem-se o circuito equivalente do complexo como um todo, incluindo a fonte de suprimento, rede de alimentação, o regulador propriamente dito e a carga a ser regulada.

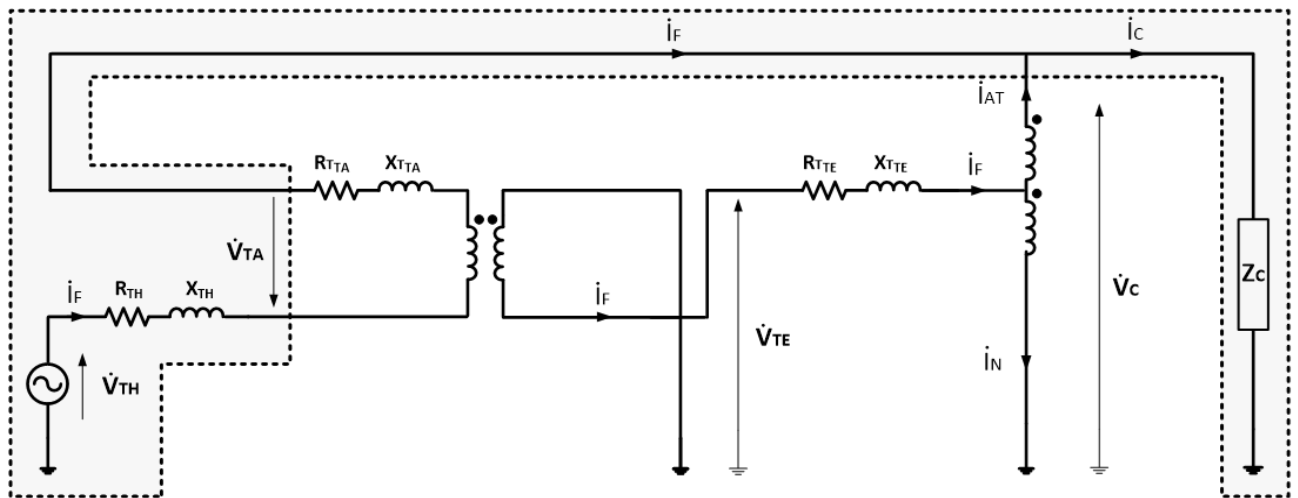


Figura 2.17 - Malha principal – modo redutor

$$\begin{aligned}\dot{V}_{TH} &= \dot{I}_F \cdot \dot{Z}_{TH} + \dot{V}_{TA} + \dot{V}_C = \dot{I}_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \cdot \dot{Z}_{TH} + \dot{V}_{TA} + \dot{I}_C \cdot \dot{Z}_C \\ \dot{V}_{TH} &= \dot{I}_C \left[\left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \dot{Z}_{TH} + \dot{Z}_C \right] + \dot{V}_{TA}\end{aligned}\quad (2.23)$$

Mais uma vez, a análise da operação do RET provido de vários tapes, para diferentes níveis de compensação, é nada mais que uma extensão dos raciocínios desenvolvidos na presente seção.

A Tabela 2.2 resume os resultados obtidos no presente capítulo para as modelagens matemáticas do regulador operando tanto como elevador quanto redutor.

TABELA 2.2 - TENSÕES NO REGULADOR DE TENSÃO COMO ELEVADOR E REDUTOR

Tensão	Modo Elevador	Modo Redutor
\dot{V}_{TE}	$\dot{V}_C \left(\frac{N_2}{N_1 + N_2} \right) - i_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \dot{Z}_{TTE}$	$\dot{V}_C \left(\frac{N_2}{N_1 + N_2} \right) + i_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \dot{Z}_{TTE}$
\dot{V}_{TA}	$\dot{V}_{TE} - i_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \dot{Z}_{TTA}$	$\dot{V}_{TE} + i_C \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \dot{Z}_{TTA}$
\dot{V}_{TH}	$i_C \left[\left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \dot{Z}_{TH} + \dot{Z}_C \right] - \dot{V}_{TA}$	$i_C \left[\left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 + 2N_2} \right) \dot{Z}_{TH} + \dot{Z}_C \right] + \dot{V}_{TA}$

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo o Capítulo 1 proporcionado a apresentação das distintas tecnologias já desenvolvidas até então e comercialmente disponíveis em vias da mitigação de problemas relativos à qualidade da tensão nas redes elétricas, desde estratégias clássicas às mais utilizadas atualmente, o Capítulo 2 teve por fim tanto a apresentação conceitual do dispositivo regulador, denominado RET, quanto o desenvolvimento do seu modelo matemático no domínio da frequência, afim de representar o comportamento do equipamento com maior precisão e no intuito de se proporcionar um dimensionamento mais exato do mesmo

Dessa maneira, apresentou-se a estrutura física do regulador, composto por suas duas unidades eletromagnéticas básicas e seus módulos de chaveamento, assim como sua estratégia de controle visando à troca de tapes e consequente variação da tensão de compensação a ser utilizada para o fim da regulação. Foram desenvolvidos modelos matemáticos no domínio da frequência para os dois modos de operação do RET, um na condição de oferecer uma regulação no sentido de incrementar a tensão de suprimento da carga, e outro, na via contrária.

CAPÍTULO 3

VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO REGULADOR NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez apresentados os conceitos básicos e a estrutura do regulador em foco, assim como uma proposta de modelagem do equipamento no contexto operacional, tomando-se por base o domínio da frequência como estratégia de representação, o presente capítulo encontra-se centrado num processo avaliativo do desempenho da proposta de modelagem do dispositivo, empregando-se, para tanto, a seguinte lógica:

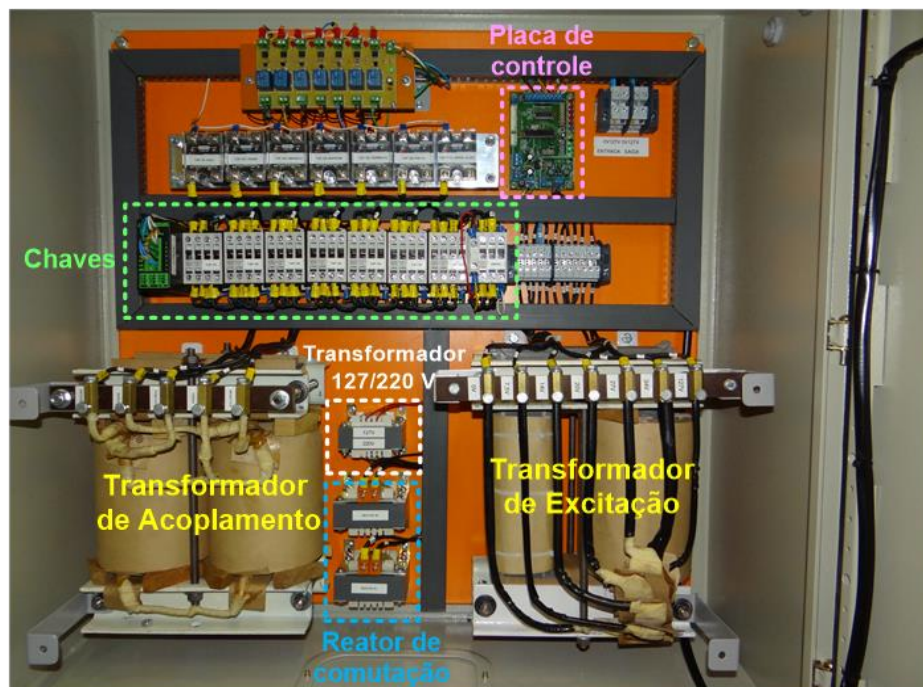
- Num primeiro momento, é apresentado o protótipo de equipamento regulador desenvolvido e disponibilizado para os fins aqui postos, produto este advindo da tese de doutorado identificada como referência [28], com destaque às suas características físicas construtivas e principais parâmetros;
- Visando ao processo de validação do modelo matemático proposto, procede-se, na sequência, à caracterização do estudo de caso considerado como base para os estudos comparativos. Isso posto, são apresentados os resultados obtidos quanto à eficácia da regulação oferecida pelo compensador ora referido;
- Em consonância com os recursos desenvolvidos e aplicados em [28], os quais culminaram num programa computacional baseado em técnicas de modelagem no domínio do tempo – plataforma ATP, apresenta-se uma síntese desse recurso, o qual se constituiu num dos principais produtos daquela tese de doutorado. Através deste *software*, é feita uma avaliação computacional da performance do regulador, diante das mesmas condições operativas impostas experimentalmente. Estes se apresentam, pois, como uma segunda base de resultados para o processo de avaliação da estratégia de representação proposta por esta dissertação;
- Por fim, alicerçada na proposta de modelagem no domínio da frequência aqui feita, é realizada uma avaliação do desempenho do regulador, fato este que conduz a resultados que são prontamente correlacionados com os estudos experimentais e computacionais no domínio do tempo.

3.2 PROTÓTIPO DO RET

A Figura 3.1 apresenta o produto final associado com o protótipo do regulador de tensão, nos termos estabelecidos pela proposta desta dissertação. Nessa figura pode-se identificar, com clareza, as principais partes componentes do dispositivo, incluindo suas unidades de potência e controle.



(a) Painel frontal



(b) Parte interna do regulador

Figura 3.1 - Protótipo do RET

3.2.1 TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO

Esta unidade, conforme discutido, apresenta-se com o objetivo de extrair as tensões de compensação da barra na qual a carga está conectada e as fornecer para o transformador de acoplamento. Sua constituição mostra-se na forma de degraus sucessivos de tapes, cada qual responsável pela disponibilização de um nível de tensão de compensação, para reduções ou elevações de tensão, nos termos estabelecidos no projeto. A Figura 3.2 mostra o referido componente e seus principais parâmetros.



- ✓ Potência aparente – 1,5 kVA;
- ✓ Isolação – 1,2 kV;
- ✓ Número de tapes – 6;
- ✓ Tensão nominal – 127 V;
- ✓ Tensão dos tapes – 0 - 7,5 – 14 – 20 – 27 e 34 V;
- ✓ Corrente nominal – 44,12 A;
- ✓ Impedância percentual – 2,5 %;
- ✓ Corrente a vazio – 4,1 %;
- ✓ Resistência de curto-circuito – 2,27 %.

Figura 3.2 - Transformador de excitação do RET

3.2.2 TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO

O presente componente encontra-se ilustrado na Figura 3.3, a qual revela uma estrutura extremamente similar à de um transformador monofásico convencional, apresentando suas principais características indicadas. Maiores informações sobre o projeto dessa unidade podem ser encontradas em [28].



- ✓ Potência aparente – 1,5 kVA;
- ✓ Isolação – 1,2 kV;
- ✓ Tensão nominal – 50 V;
- ✓ Corrente nominal – 30 A;
- ✓ Relação de transformação – 1:1;
- ✓ Impedância percentual – 2 %;
- ✓ Corrente a vazio – 4,1 %;
- ✓ Resistência de curto-circuito – 1,73 %.

Figura 3.3 - Transformador de acoplamento do RET

3.2.3 DISPOSITIVO DE SELEÇÃO DE TAPES

Como esclarecido, para cada nível de compensação almejado, haverá necessidade da seleção do tape mais adequado para o suprimento da tensão de restauração. A opção implementada foi feita por meio do emprego de um produto comercial, na forma de contadores mecânicos, como mostra a Figura 3.4.



- ✓ Contator WEG CWM12 10E;
- ✓ Ligação – três fases em paralelo;
- ✓ Capacidade por fase – 12 A (capacidade total – 36 A);
- ✓ Alimentação - 220 V;
- ✓ Placa dedicada ao acionamento das bobinas dos contadores.

Figura 3.4 - Dispositivo de seleção de tape do RET

3.2.4 PLACA DE CONTROLE

Por fim, a Figura 3.5 evidencia a placa de controle empregada, a qual provê o acionamento dos contadores mecânicos supracitados, segundo a lógica implementada. Para tal, utilizou-se um microcontrolador modelo PIC18F2525, da Microchip.



- ✓ Microcontrolador PIC18F2525;
- ✓ Leitura do sinal de tensão da barra da carga;
- ✓ Conversão A/D do sinal de tensão;
- ✓ Cálculo do valor eficaz.

Figura 3.5 - Placa de controle do RET

3.2.5 ACESSÓRIOS COMPLEMENTARES

Somado às partes principais já caracterizadas, o protótipo do regulador de tensão ainda requer alguns acessórios complementares. Esse é o caso dos reatores mostrados na Figura 3.6, os quais se destinam a reduzir os impactos associados às manobras de chaveamento entre os tapes.

Também, visando à adequação dos níveis de tensão disponibilizados pela rede com os padrões requeridos pela placa de controle, torna-se necessário o uso do transformador apresentado na mesma figura.



- Reator de comutação:
 - ✓ Indutância de 265 μH ;
 - ✓ Queda de tensão de 2 V;
 - ✓ Corrente de trabalho de 20 A.
- Transformador para alimentação do controle e das chaves:
 - ✓ Relação 127 / 220 V

Figura 3.6 – Acessórios complementares do protótipo

3.3 ESTRUTURA LABORATORIAL

Quanto ao arranjo físico destinado a representar a operação do regulador, esse é apresentado na Figura 3.7, a qual exibe: a rede de alimentação constituída sob a forma de uma fonte programável de tensão; o protótipo do RET propriamente dito; e cargas conectadas à barra

monitorada para fins da regulação. Os principais parâmetros associados aos componentes do sistema encontram-se indicados na mesma figura.

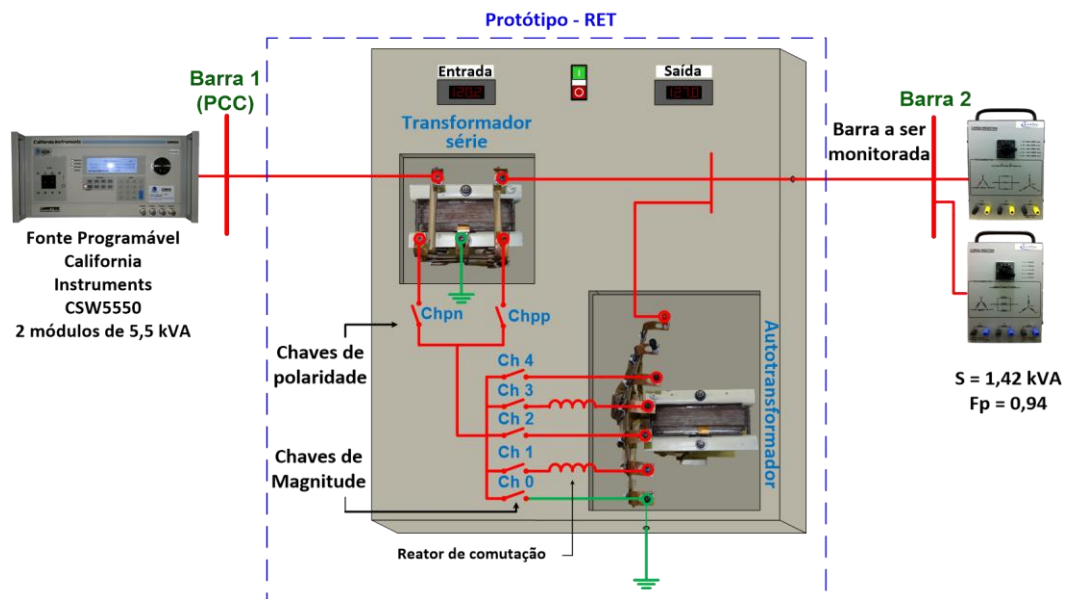


Figura 3.7 - Esquema simplificado do arranjo utilizado para a análise experimental

O arranjo físico correspondente pode ser identificado na Figura 3.8, cujo suprimento é oferecido por duas fontes CSW5550 (California Instruments) e, ainda, observa-se a presença do analisador de energia Elspec G4500, da Kron, para a aquisição dos sinais provenientes da estrutura laboratorial.

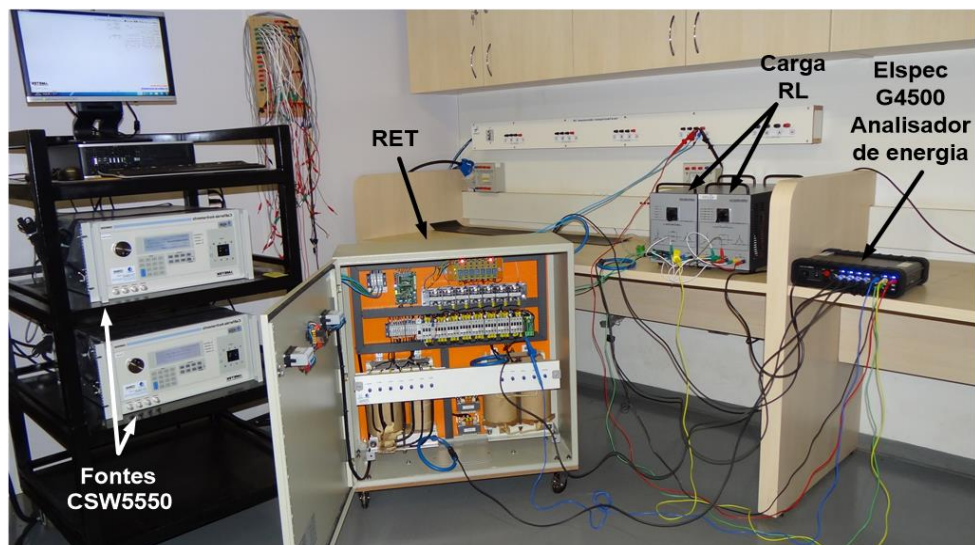


Figura 3.8 - Estrutura laboratorial para estudos de performance do protótipo RET

Assim, os trabalhos aqui reportados referem-se, pois, ao funcionamento do regulador quando da manifestação de variações de tensão estando o mesmo já inserido na rede elétrica.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CASO ESTUDO

Dentre uma diversidade de situações passíveis de investigação e utilizadas nos trabalhos, a opção para apresentação nesta dissertação foi por uma situação caracterizada pela imposição de degraus de variações de tensão envolvendo 5 intervalos de tempo sequenciais, cada qual atrelado a uma dada condição operativa, conforme se observa de forma sintetizada através da Figura 3.9. Essa mostra o perfil imposto pela fonte de tensão junto à barra identificada por 1 na Figura 3.7. O tempo total de estudo foi arbitrado como sendo igual a 50 segundos e os intervalos contendo as distintas situações estudadas correspondem, cada um, a um fenômeno cuja duração equivale a 10 segundos. De forma complementar, os valores correspondentes aos intervalos de estudo são fornecidos pela Tabela 3.1.

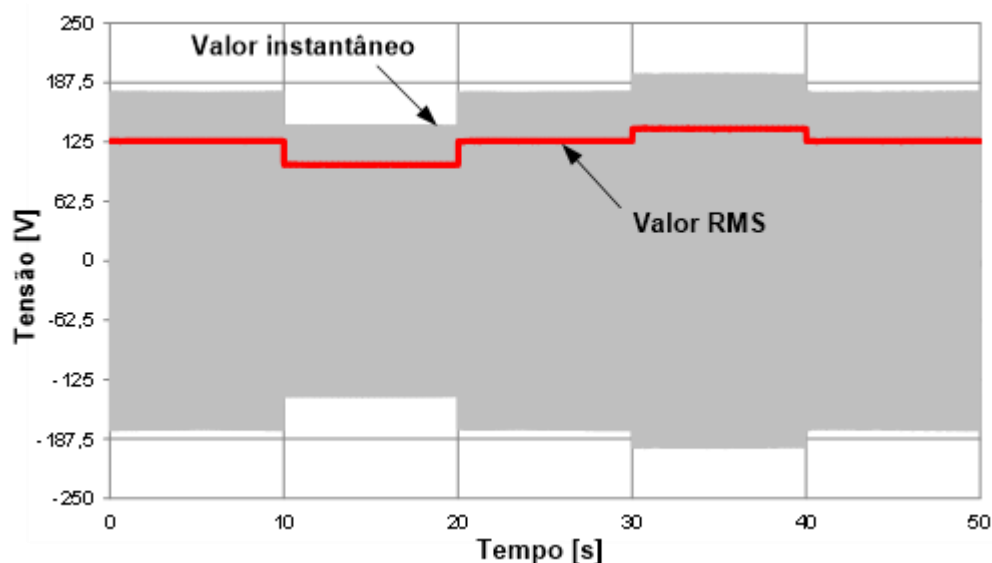


Figura 3.9 - Tensão na Barra 1: Variações adotadas ao longo do período de investigação

TABELA 3.1 - VARIAÇÕES DE TENSÃO ADOTADAS PARA A BARRA 1

Intervalo	Tempo [s]	Tensão [V]	ΔV [pu]
1	0 a 10	127,0	0
2	10 a 20	101,6	0,2
3	20 a 30	127,0	0
4	30 a 40	139,7	0,1
5	40 a 50	127,0	0

Do exposto fica evidenciado que, inicialmente, tem-se o sistema operando em condições normais, com tensão nominal e igual a 1 pu (127 volts). No intervalo entre 10 e 20 segundos, percebe-se uma considerável redução a 0,8 pu na tensão de suprimento. Depois de restaurada a tensão de suprimento ao seu valor nominal no instante de tempo igual a 20 segundos, aplica-se uma sobretensão de 1,1 pu. Por fim, a tensão de suprimento é restaurada mais uma vez ao seu valor nominal até o fim da simulação.

3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma vez mostradas as tensões para a Barra 1, resta agora a apresentação dos resultados obtidos com a inserção do regulador no sistema estudado. A Figura 3.10 indica o sucesso da restauração da tensão aos patamares requeridos, ilustrando as tensões eficazes e os valores instantâneos registrados para a Barra 2, correspondente ao ponto de conexão da carga. Em consonância com [2], entende-se como atingimento aos patamares requeridos pela legislação, a obtenção de tensões compensadas dentro da faixa adequada para as tensões de atendimento em 127 V, ou seja, valores entre 116 e 133 V. Exceções fazem-se notar para os intervalos de tempo imediatamente posteriores à ocorrência dos distúrbios, fato este atribuído à resposta do sistema de controle e efetiva adequação das tensões incrementais de compensação. Maiores detalhes sobre a obtenção deste desempenho podem ser encontrados em [28], todavia, o sucesso da restauração da tensão é evidente junto à Barra 2.

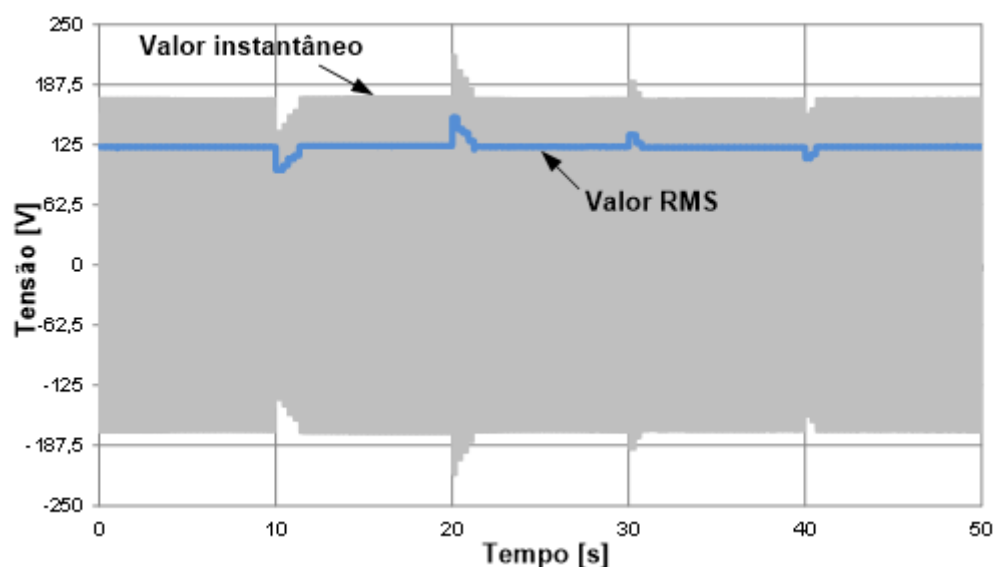


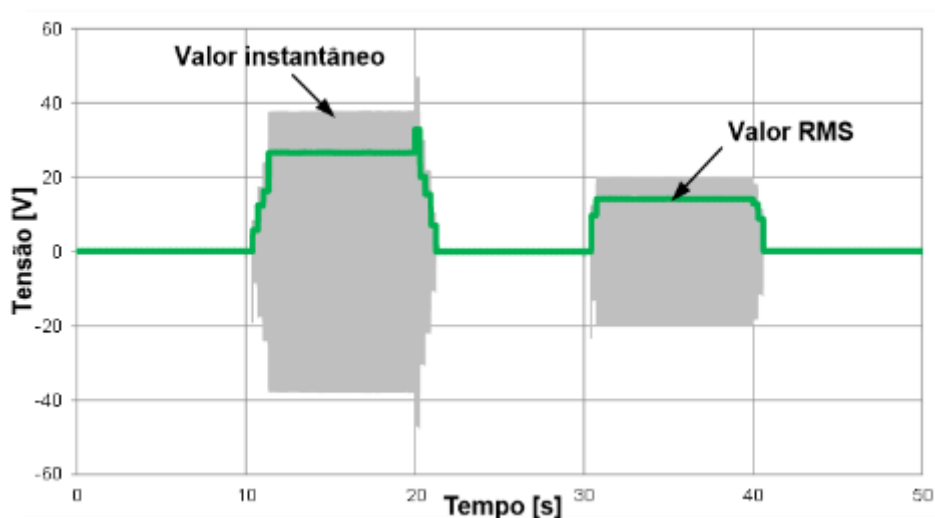
Figura 3.10 - Perfil da tensão na Barra 2 – Experimental

A Tabela 3.2 apresenta, de forma sintetizada, os resultados experimentais obtidos para as tensões em ambas as barras do sistema estudado, em termos de seus valores eficazes e suas respectivas variações percentuais com relação à tensão de referência, após o sistema estabilizar-se ou, ainda, atingir o regime permanente.

TABELA 3.2 - TENSÕES NAS BARRAS 1 E 2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Intervalos	Barra 1 [V]	Barra 2 [V]	Δ [%]
1	127,0	123,5	-2,8
2	101,6	124,2	-2,2
3	127,0	123,5	-2,8
4	139,7	122,8	-3,3
5	127,0	123,5	-2,8

No que tange às tensões extraídas pelo transformador de excitação e impostas sobre o de acoplamento, seus valores instantâneos e eficazes encontram-se fornecidos pela Figura 3.11.

Figura 3.11 - Perfil da tensão V_{TE} – Experimental

Com o objetivo de proporcionar uma visão mais completa do mecanismo de compensação e as grandezas envolvidas para as unidades componentes do dispositivo regulador como um todo, a Figura 3.12 mostra as correntes nos diversos pontos do sistema em estudo, a saber: entre a fonte e a Barra 1; entre a Barra 2 e o primário do transformador de excitação; e entre a Barra 2 e carga.

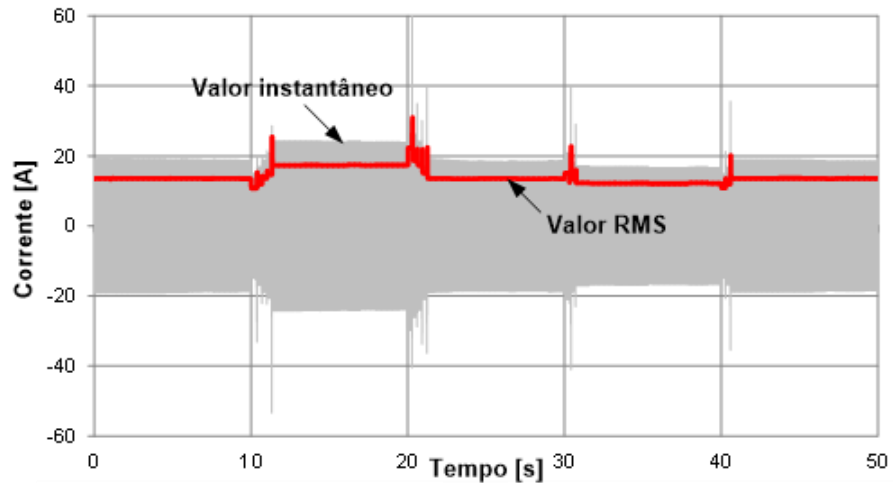
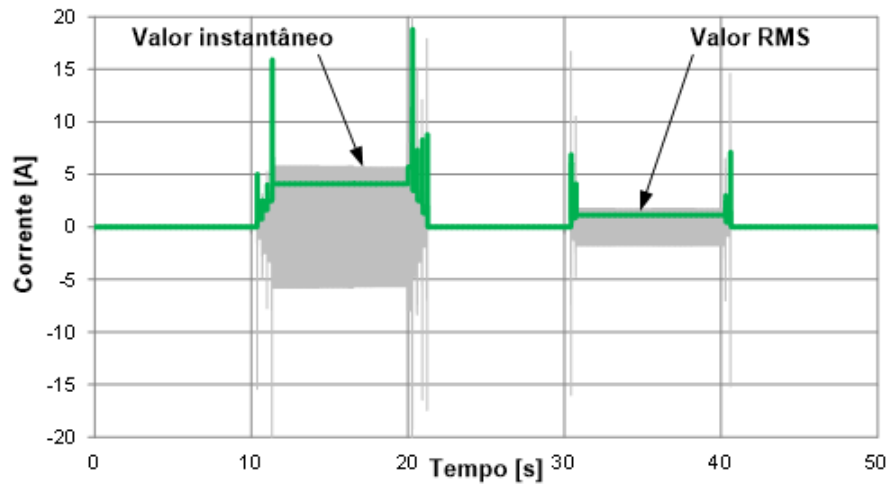
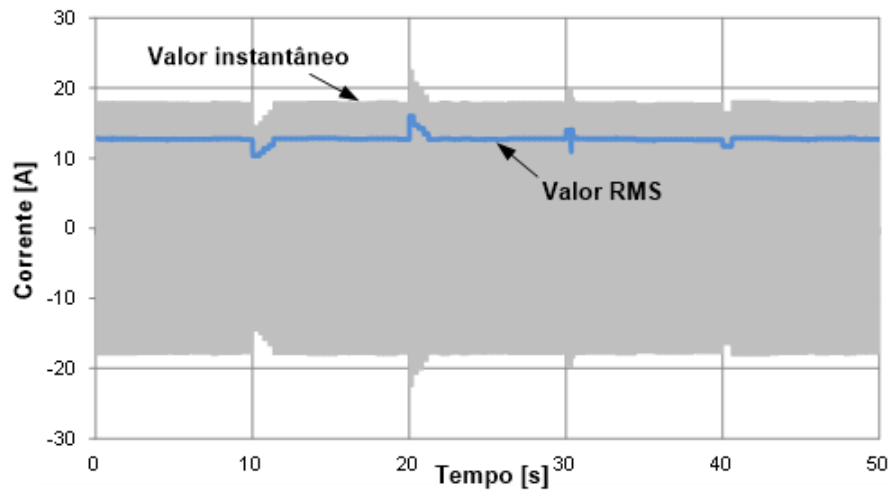
(a) Perfil da corrente I_F (b) Perfil da corrente I_{AT} (c) Perfil da corrente I_C

Figura 3.12 - Correntes nos diversos trechos do arranjo em estudo – Experimental

A Tabela 3.3 resume os principais resultados obtidos para as correntes em termos de seus valores eficazes para cada intervalo de tempo após atingir o regime permanente.

TABELA 3.3 - CORRENTES NOS RAMOS DO ARRANJO EXPERIMENTAL

Intervalos	Fonte - Barra 1 [A]	Barra 2 - Prim. TE [A]	Barra 2 - Carga [A]
1	13,6	0	12,7
2	17,5	4,1	12,7
3	13,6	0	12,7
4	12,1	1,2	12,6
5	13,6	0	12,7

Com base nos dados supra expostos, é possível perceber que as correntes que alimentam a carga permanecem constantes durante todo o período de estudo, como seria esperado,

Finalmente, com relação às potências aparentes envolvidas no processo de compensação, essas são ilustradas na Figura 3.13 e dizem respeito, respectivamente, à potência da fonte de suprimento à Barra 1, do secundário do transformador de excitação ao de acoplamento e, finalmente, da Barra 2 à carga.

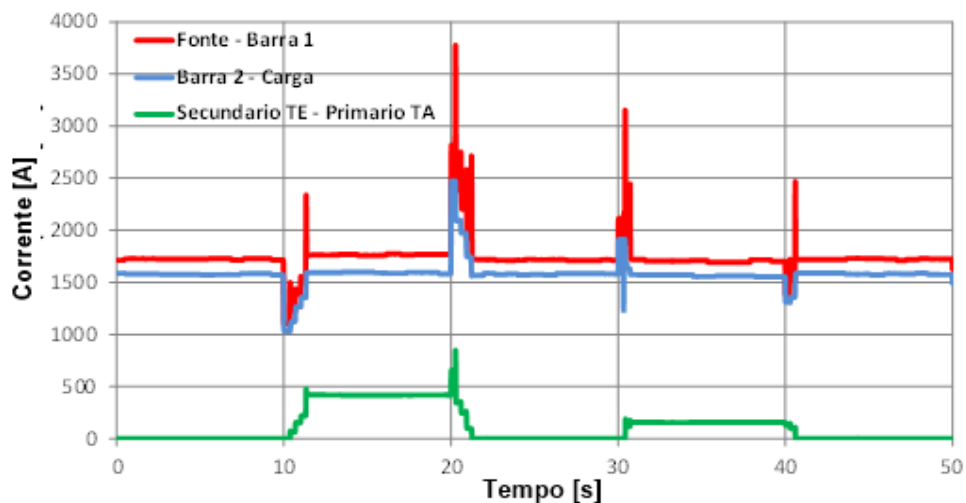


Figura 3.13 - Perfil das potências aparentes – Experimental

A Tabela 3.4 mostra ainda a relação entre as potências aparentes requeridas pelo RET quando comparadas aos valores demandados pela carga, para as diferentes condições operativas da rede, S_C indica a potência aparente entregue à carga; S_{RET} corresponde ao complemento de potência absorvido ou injetado pelo regulador; e $\Delta S[\%]$ expressa a diferença percentual entre essas duas potências. Tal tabela apresenta os valores em regime permanente.

TABELA 3.4 - POTÊNCIAS APARENTES – EXPERIMENTAL

Intervalos	S_C [VA]	S_{RET} [VA]	ΔS [%]
1	1586,0	1,5	0,1
2	1587,6	415,5	26,3
3	1585,5	1,6	0,1
4	1561,5	156,2	10,0
5	1583,7	1,6	0,1

Uma vez apresentados os resultados advindos dos experimentos laboratoriais, o próximo passo apresenta-se com o objetivo de avaliar a consistência do processo de modelagem focado nesta dissertação. Todavia, visando estabelecer uma base comparativa complementar, antes de mostrar os desempenhos da representação no domínio da frequência, entendeu-se ser conveniente a reprodução dos resultados explorados em [28], os quais se encontram diretamente afetos à avaliação operacional empregando-se, para tanto, o software de análise desenvolvido por meio da plataforma ATP, como a seguir.

3.6 ESTUDOS COMPUTACIONAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Mais uma vez, tomando por base os trabalhos realizados e descritos em [28], os quais primaram pelo desenvolvimento de uma estratégia de modelagem do RET no domínio do tempo, empregando-se para tanto a plataforma ATP, considera-se, para fins deste trabalho, dispensável a apresentação de maiores detalhes sobre os fundamentos e resultados lá obtidos. Todavia, através da Figura 3.14, é indicado o resultado final obtido, a partir do qual se torna factível a realização de estudos de desempenho para a avaliação da eficácia da proposta feita naquela tese.

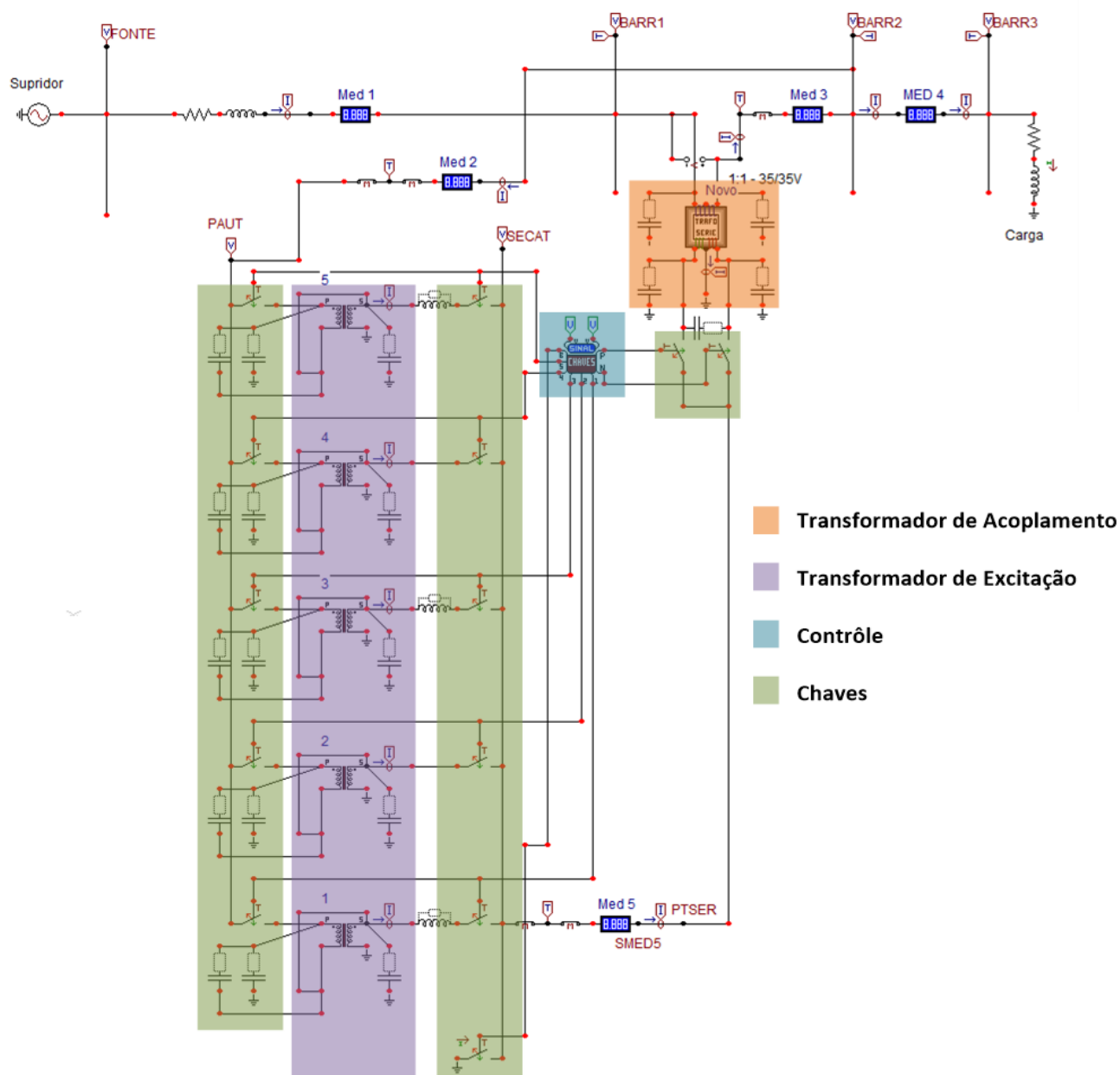


Figura 3.14 - Modelo completo do RET no ATP

3.6.1 TRANSFORMADORES DE EXCITAÇÃO E ACOPLAMENTO

A Figura 3.15 mostra os elementos representativos da modelagem dos transformadores de excitação e acoplamento com suas variáveis de entradas no ATP nas respectivas janelas de parametrização das unidades eletromagnéticas.

A utilização do transformador de excitação identificado faz jus à presença de um autotransformador com apenas um tape. Isto dito, para que se obtenha um dispositivo provido com diversos tapes e características próprias ao controle dinâmico da tensão na saída do mesmo, é

necessário utilizar um conjunto de autotransformadores, cada qual representando um único tape da unidade paralela completa e sendo parametrizado de acordo com a tensão requerida em sua saída.

User specified: CET_SERI

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
IDXXXX	0	PXXXXA	1	
FDXXXX	0	PNXXXX	1	
RMXXXX	100000	SXXXXA	1	
RPXXXX	0.0144	SNXXXX	1	
LPXXXX	0.673	TNXXXX	1	
VPXXXX	50	SATXXX	1	
RSXXXX	0.0144			
LSXXXX	0.673			

Order: 0 Label: Novo

Comment: 1.5kVA - 50V/50V (FN) Z%=3.5 - R%=1.73 - I0=2.67

User specified: C:\ATP\project\usp\tsz35.LI ☒ Send parameters ☐ Internal phase seq. ☐ Hide ☐ Lock

OK Cancel Help



(a) Modelo do transformador de acoplamento

Component: Trafo_s.sup

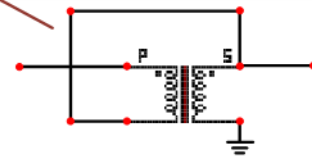
DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Io	0.002115	P1	1	
Fo	0.477	P2	1	
Rmag	2258.408	S1	1	
Rp	0.0961	S2	1	
Lp	0.2992			
Vip	100			
Rs	0.007005			
Ls	0.021808			

Order: 0 Label: 4

Comment: 1.5kVA, Z=3.5%, I0=2.24%, R0cc=2.27% - 127/27V

Output: 0 - No ☐ Hide ☐ Lock

OK Cancel Help



(b) Modelo do transformador de excitação

Figura 3.15 - Modelos das unidades eletromagnéticas do RET no ATP

3.6.2 SISTEMA DE CONTROLE

A Figura 3.16 ilustra a janela do controle implementado. De forma sintetizada, a partir da leitura dos valores de tensão na barra da carga, em consonância com os aspectos previamente discutidos, o programa estabelece a ordem de fechamento das chaves associadas aos tapes do autotransformador e de polaridade visando à regulação desejada da tensão na carga.

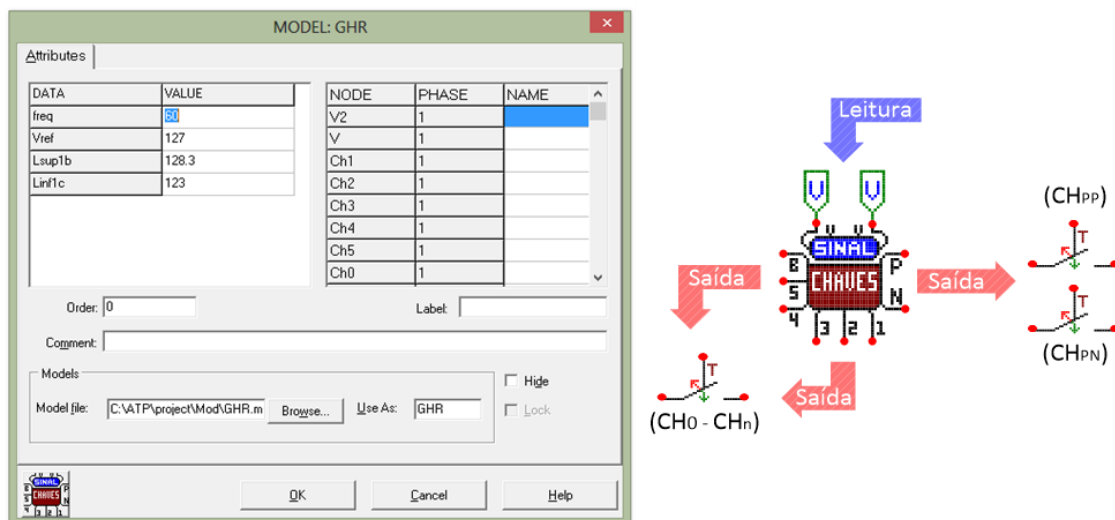


Figura 3.16 - Modelo do controle no ATP

3.6.3 RESULTADOS DE DESEMPENHO

Tal como empregado para os trabalhos laboratoriais, através do arranjo indicado na Figura 3.17, aplicou-se, mais uma vez, as mesmas condições impostas anteriormente, considerando-se, desta feita, a utilização dos recursos da modelagem no domínio do tempo através do simulador ATP [28].

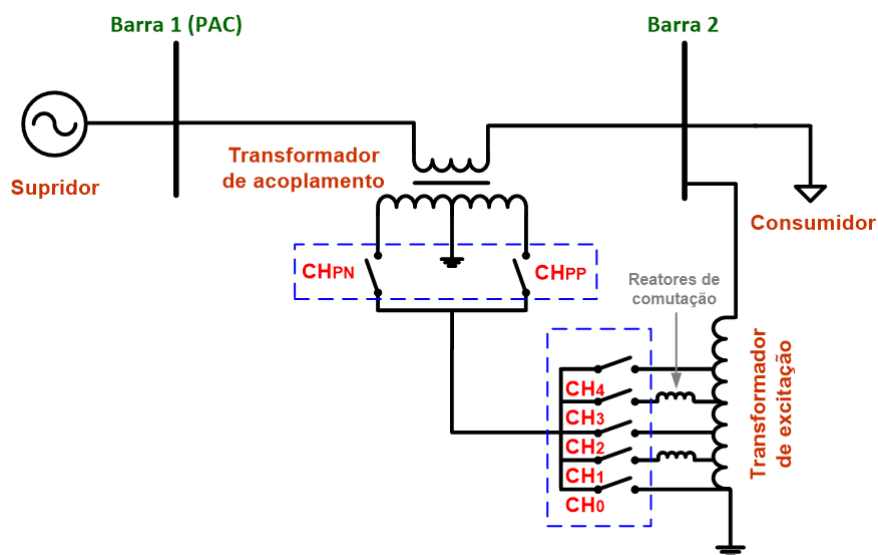


Figura 3.17 - Diagrama unifilar do sistema utilizado para os estudos computacionais

As principais informações atreladas aos parâmetros empregados no estudo encontram-se disponíveis na Tabela 3.5.

TABELA 3.5 - PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO

Dados	Potência [VA]	FP	Tensão [V]	Z_{CC} [%]	R_{CC} [%]
Fonte	-	-	127	-	-
Transformador de Excitação	500	-	127 com Tapes	3,5	2,27
Transformador de Acoplamento	500	-	1:1	3,5	1,73
Carga	1670	0,94	127	-	-

A Figura 3.18 ilustra, mais uma vez, o perfil das tensões impostas pela fonte ideal de tensão para a avaliação dos resultados do modelo, tanto em seus valores instantâneos quanto eficazes. De forma complementar, a Tabela 3.6 apresenta os valores eficazes de tensão adotados para cada condição operativa.

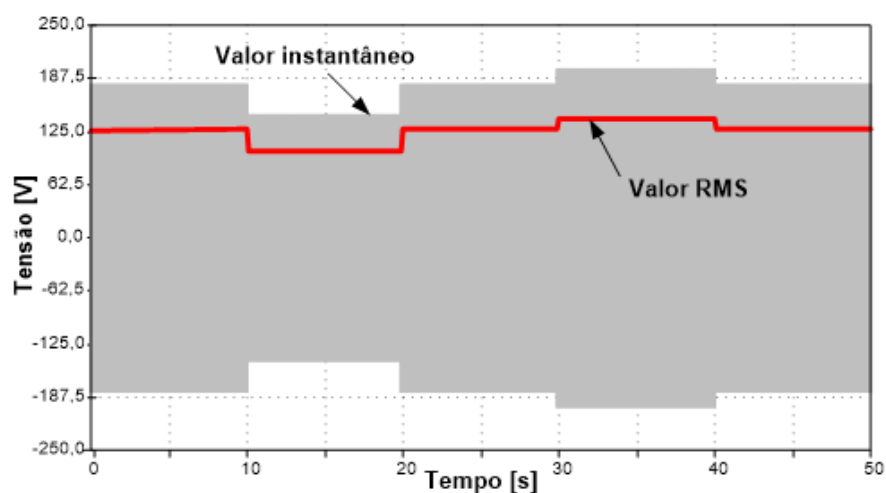


Figura 3.18 - Tensão na Barra 1: Variações adotadas para os estudos computacionais

TABELA 3.6 - VARIAÇÕES DE TENSÃO ADOTADAS PARA A BARRA 1

Intervalo	Tempo [s]	Tensão [V]	ΔV [pu]
1	0 a 10	127,0	0
2	10 a 20	101,6	0,2
3	20 a 30	127,0	0
4	30 a 40	139,7	0,1
5	40 a 50	127,0	0

A Figura 3.19 mostra os valores eficazes das tensões na Barra 2 assim como o perfil de seus valores instantâneos. Os resultados evidenciam que tais comportamentos expressam a operação do arranjo elétrico sob a ação das variações de tensão e com a presença do regulador aqui delineado.

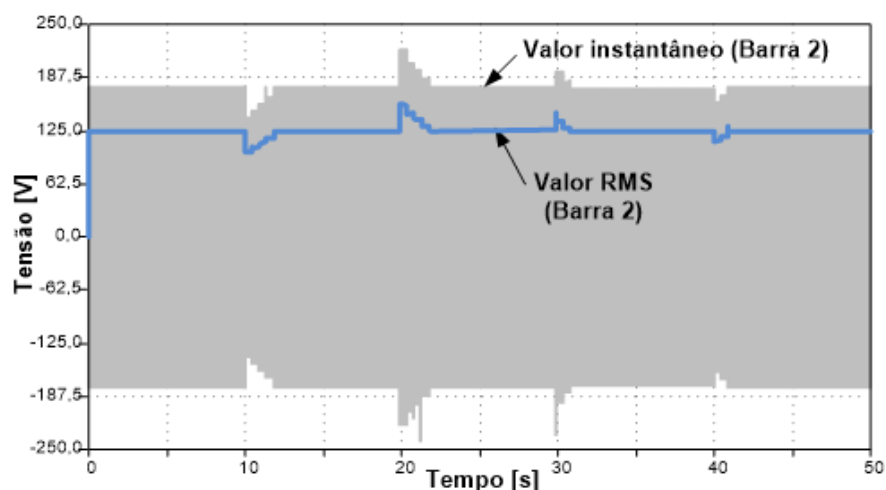


Figura 3.19 – Perfil da tensão na Barra 2 – Computacional

Os valores eficazes das tensões para as barras 1 e 2 são fornecidos, de forma complementar, na Tabela 3.7, juntamente às variações percentuais das tensões finais quando comparadas ao valor de referência em regime permanente. Essas diferenças em relação à tensão nominal de 127 V devem-se à queda de tensão manifestada no transformador de acoplamento para cada situação investigada. Pode-se perceber, com clareza, que mesmo sob condições ideais de alimentação, há a manifestação da mencionada queda na impedância própria deste componente.

TABELA 3.7 - TENSÕES NAS BARRAS 1 E 2 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Intervalos	Barra 1 [V]	Barra 2 [V]	ΔV [%]
1	127,0	124,3	-2,1
2	101,6	124,1	-2,3
3	127,0	124,3	-2,1
4	139,7	123,6	-2,7
5	127,0	124,3	-2,1

Em termos das tensões impostas pelo transformador de excitação ao primário do de acoplamento, a Figura 3.20 mostra o perfil de seus valores instantâneos e eficazes.

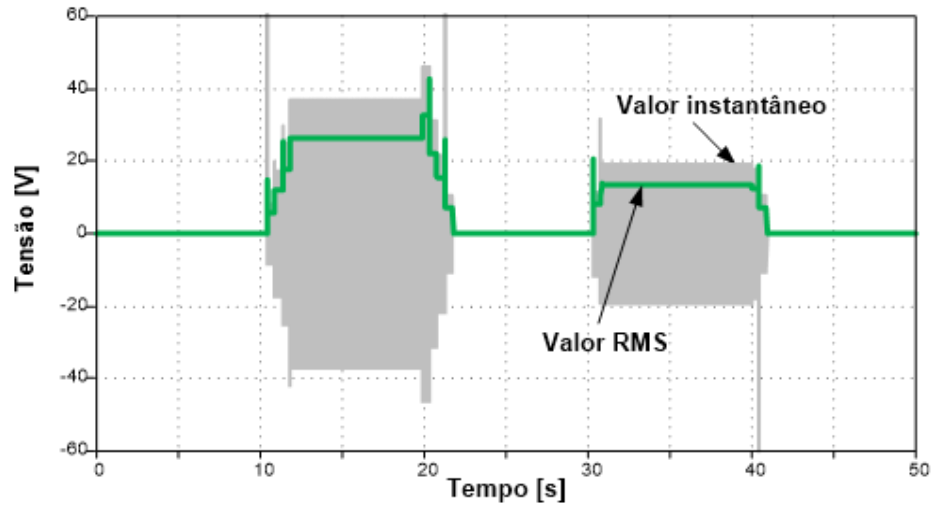
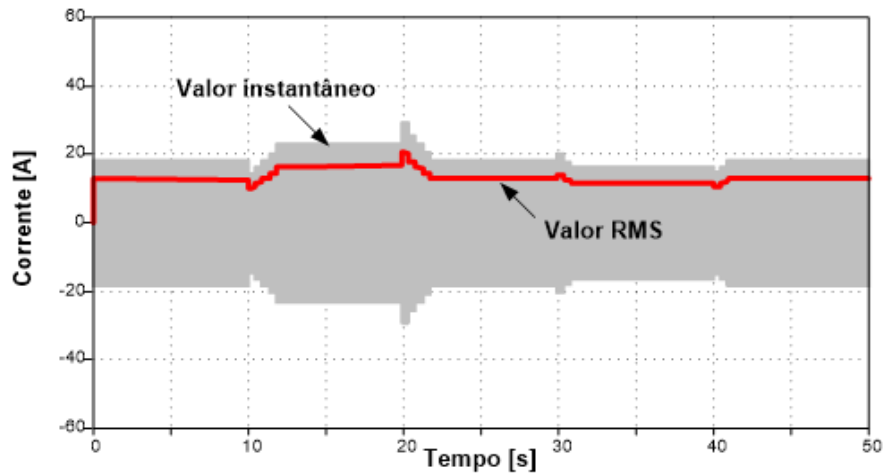


Figura 3.20 - Perfil da tensão V_{TE} – Computacional

Complementarmente às informações supracitadas, a Figura 3.21 ilustra os resultados computacionais das correntes nos diversos ramos do sistema estudado, a saber: entre a fonte e a Barra 1; Barra 2 e o primário do transformador de excitação; e entre a Barra 2 e carga.



(a) Perfil da corrente I_F

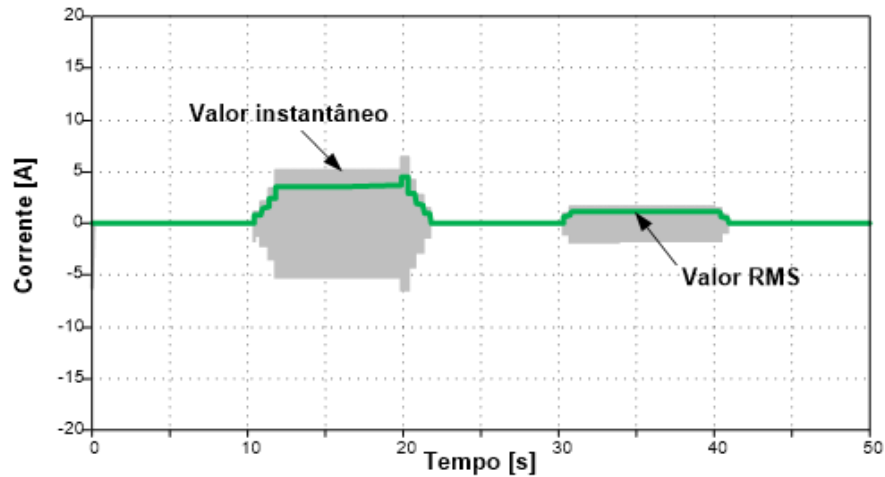
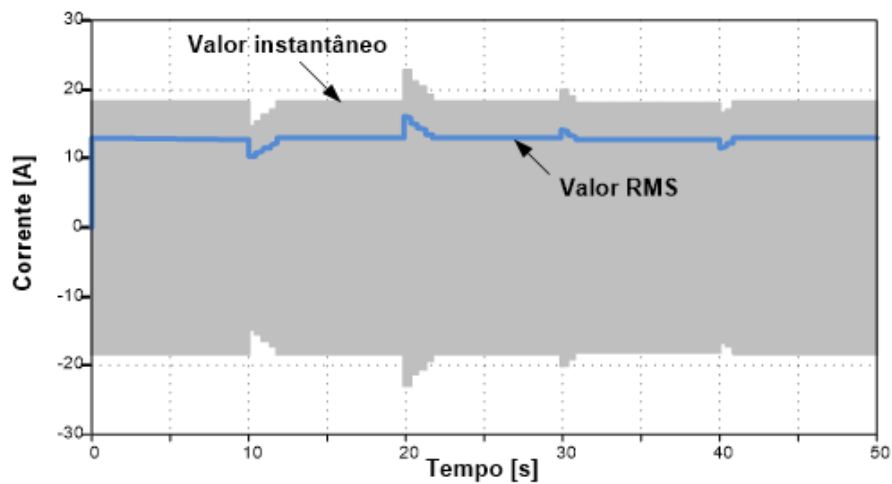
(b) Perfil da corrente I_{AT} (c) Perfil da corrente I_C

Figura 3.21 - Correntes nos diversos trechos do sistema em estudo – Computacional

Os valores das correntes circulantes nos diversos trechos do sistema em estudo são sintetizados na Tabela 3.8, para cada intervalo de tempo das simulações, depois de atingido o regime permanente.

TABELA 3.8 - CORRENTES CIRCULANDO PELOS RAMOS DO SISTEMA

Intervalos	Fonte – Barra 1 [A]	Barra 2 – Prim. TE [A]	Barra 2 – Carga [A]
1	12,9	0	12,9
2	16,4	3,6	12,8
3	12,9	0	12,9
4	11,6	1,2	12,8
5	12,9	0	12,9

De forma idêntica ao apontado na seção referente aos resultados experimentais, as correntes da carga são também constantes durante todo o período de simulação.

No tangente às potências aparentes envolvidas no processo de regulação, a Figura 3.22 evidencia tais grandezas para os seguintes trechos: entre a fonte e a Barra 1; Barra 2 e carga; e, por fim, entre o secundário do transformador de excitação e o primário daquele responsável pela inserção do incremento de tensão.

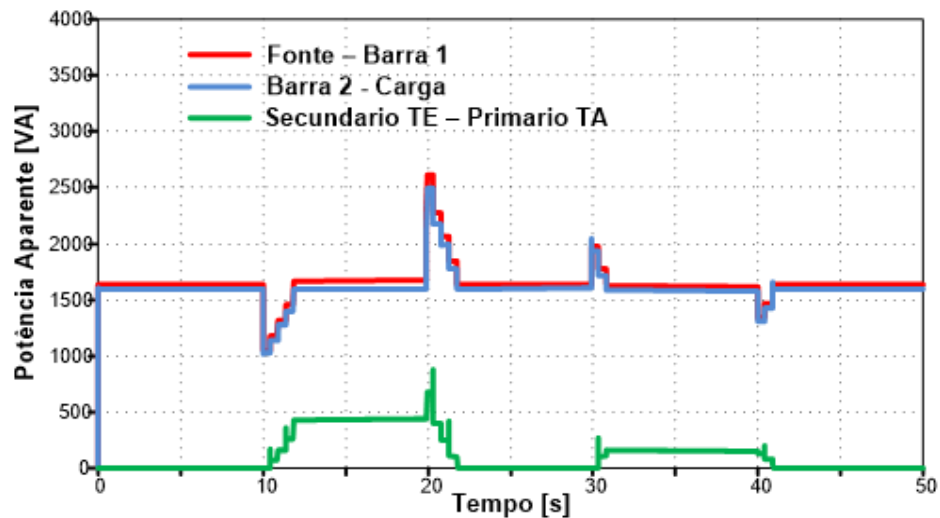


Figura 3.22 - Perfil das potências aparentes – Computacional

De forma complementar, a Tabela 3.9 expõe os valores, em regime permanente, das potências solicitadas pela carga e pelo RET, assim como a relação percentual das mesmas para as condições de variação na tensão da rede, onde: S_C refere-se a potência aparente entregue à carga; S_{RET} indica o complemento de potência absorvido ou injetado pelo regulador; e $\Delta[\%]$ expressa a diferença percentual entre essas duas potências.

TABELA 3.9 - POTÊNCIAS APARENTES – COMPUTACIONAL

Intervalos	S_C [VA]	S_{RET} [VA]	ΔS [%]
1	1599,5	0	0
2	1594,0	433,3	27,2
3	1599,5	0	0
4	1582,1	157,0	9,9
5	1599,5	0	0

3.7 RESULTADOS DO MODELO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E CORRELAÇÕES COM O DESEMPENHO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL NO ATP

Depois de apresentados os resultados de desempenho extraídos do arranjo laboratorial e modelo computacional do RET, procede-se, a seguir, à avaliação comparativa de desempenho do modelo matemático no domínio da frequência, conforme definido pelas premissas do processo de regulação aqui postas.

A Tabela 3.10 expõe os resultados comparativos entre os desempenhos obtidos experimentalmente, através do simulador no domínio do tempo e, por fim, as grandezas operacionais associadas com a modelagem ora proposta. Para fins comparativos, são indicadas as seguintes variáveis: tensão extraída pelo transformador de excitação; corrente fornecida ou absorvida pelo equipamento (primário do transformador de excitação); e a potência fornecida ou absorvida pelo mesmo.

Para as tabelas que se seguem:

- A coluna “EXP” diz respeito aos resultados obtidos com o arranjo experimental;
- Na coluna “MDT”, tem-se aqueles referentes à modelagem computacional na plataforma no domínio do tempo e;
- A coluna “MDF” expressa as correspondentes grandezas determinadas através do modelo matemático no domínio da frequência desenvolvido nesta dissertação.

TABELA 3.10 - VALORES PARA O TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO

Intervalo	Situação da rede	Tensão TE [V]			Corrente TE [A]			Potência [VA]		
		EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF
1	Tensão nominal	0,1	0	0	0	0	0	1,5	0	0
2	Subtensão 0,8 pu	26,5	26,2	26,1	4,1	3,6	3,5	415,5	433,3	425,4
3	Tensão nominal	0,1	0	0	0	0	0	1,6	0	0
4	Sobretensão 1,1	14,1	13,7	13,7	1,2	1,2	1,3	155,5	156,9	157,7
5	Tensão nominal	0,1	0	0	0	0	0	1,6	0	0

A Tabela 3.11 a seguir apresenta o erro calculado para os valores do modelo no domínio da frequência quando comparado aos demais, no que tange às grandezas relacionadas ao transformador de excitação. Para os cálculos feitos a seguir, convencionou-se o cálculo do erro com relação aos valores base de tensão, corrente e potência.

Percebe-se, pela análise da tabela, que os erros calculados ao se comparar o modelo no domínio da frequência com o domínio do tempo e resultados experimentais são bem pequenos, sendo muitas vezes iguais a zero. Isto mostra, mais uma vez, a fidelidade do modelo matemático aqui proposto para com os estudos previamente desenvolvidos.

TABELA 3.11 - TRANSFORMADOR EXCITAÇÃO - ERROS DO MDF

Intervalo	Situação da rede	Tensão TE [V]		Corrente TE [A]		Potência [VA]	
		EXP	MDT	EXP	MDT	EXP	MDT
1	Tensão nominal	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
2	Subtensão 0,8 pu	0,3%	0,1%	4,6%	0,8%	0,6%	0,4%
3	Tensão nominal	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
4	Sobretensão 1,1	0,3%	0,0%	0,8%	0,8%	0,1%	0,0%
5	Tensão nominal	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%

Visando ao oferecimento de maiores informações sobre o desempenho do alimentador e do regulador, a Tabela 3.12 explicita os valores das correntes encontrados para os casos experimental, laboratorial e no domínio da frequência, nos diversos pontos do sistema, a saber: entre a fonte e a Barra 1; entre a Barra 2 e o primário do transformador de excitação; no neutro dessa mesma unidade; e entre a Barra 2 e a carga.

TABELA 3.12 - CORRENTES NOS RAMOS DO SISTEMA

Intervalo	Corrente de carga			Corrente no neutro			Corrente no TE			Corrente da fonte		
	EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF
1	12,7	12,9	12,9	12,7	12,9	12,9	0	0	0	13,6	12,9	12,9
2	12,7	12,9	12,9	12,7	13,0	12,9	4,1	3,6	3,5	17,5	16,4	16,3
3	12,7	12,9	12,9	12,7	12,9	12,9	0	0	0	13,6	12,9	12,9
4	12,6	12,8	12,8	12,6	10,2	10,3	1,2	1,2	1,3	12,1	11,6	11,5
5	12,7	12,9	12,9	12,7	12,9	12,9	0	0	0	13,6	12,9	12,9

No que tange aos valores calculados de corrente para aos três desempenhos, a partir da análise da Tabela 3.13 é possível afirmar que o modelo no domínio da frequência teve uma boa aderência quando comparado aos demais, principalmente no que diz respeito aos valores obtidos para o modelo no domínio do tempo.

TABELA 3.13 - CORRENTES NOS RAMOS - ERRO DO MDF

Intervalo	Corrente de carga		Corrente no neutro		Corrente no TE		Corrente da fonte	
	EXP	MDT	EXP	MDT	EXP	MDT	EXP	MDT
1	1,5%	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	0,0%
2	1,5%	0,0%	1,5%	0,8%	4,6%	0,8%	9,1%	0,8%
3	1,5%	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	0,0%
4	1,5%	0,0%	17,5%	0,8%	0,8%	0,8%	4,6%	0,8%
5	1,5%	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	0,0%

De forma complementar, a Tabela 3.14 ilustra os valores das tensões nos diversos pontos do sistema, para o caso estudo apresentado: Barra 1 (Thévenin); no secundário do transformador de excitação; aplicada sobre o secundário do transformador de acoplamento; e, por fim, sobre a carga conectada à Barra 2.

TABELA 3.14 - TENSÕES NAS BARRAS DO SISTEMA

Intervalo	Tensão na carga			Tensão no TE			Tensão no TA			Tensão de Thévenin		
	EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF	EXP	MDT	MDF
1	123,5	124,3	124,3	0,1	0	0	3,0	6,5	6,5	127,0	127,0	127,0
2	124,2	124,1	124,1	26,5	26,2	26,1	22,7	24,0	24,1	101,6	101,6	101,6
3	123,5	124,3	124,3	0,1	0	0	3,0	6,5	6,5	127,0	127,0	127,0
4	122,8	123,6	123,6	14,1	13,7	13,7	16,6	16,9	16,9	139,7	139,7	139,7
5	123,5	124,3	124,3	0,1	0	0	3,0	6,5	6,5	127,0	127,0	127,0

Por fim, a Tabela 3.15 ilustra o cálculo do erro do MDF no que tange às tensões nas barras. De forma similar ao exposto para as correntes, também para as tensões os erros são desprezíveis, principalmente quando se compara os valores obtidos a partir do modelo matemático proposto com aquele no domínio do tempo.

TABELA 3.15 - TENSÕES NAS BARRAS - ERRO DO MDF

Intervalo	Tensão na carga		Tensão no TE		Tensão no TA		Tensão de Thévenin	
	EXP	MDT	EXP	MDT	EXP	MDT	EXP	MDT
1	0,6%	0,0%	0,1%	0,0%	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,1%	0,0%	0,3%	0,1%	1,1%	0,1%	0,0%	0,0%
3	0,6%	0,0%	0,1%	0,0%	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,6%	0,0%	0,3%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,6%	0,0%	0,1%	0,0%	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo prestou-se à apresentação e validação de uma proposta de modelagem matemática no domínio da frequência para o regulador de tensão em estudo. Em vias de legitimar as investigações, desenvolvimentos e expressões finais obtidos, optou-se pela utilização de um caso típico associado com a manifestação de variações negativas e positivas das tensões de suprimento em um alimentador radial.

Utilizando tal estudo de caso, foram apresentados os resultados operacionais obtidos através de três procedimentos distintos: um primeiro associado com a montagem e experimentos conduzidos num ambiente laboratorial controlado; um segundo atrelado com o emprego de um simulador utilizando técnicas de representação no domínio do tempo já existente [28]; e, por fim, uma terceira via de estudos fundamentada nas equações de desempenho aqui desenvolvidas.

Para a obtenção da primeira base de dados, o arranjo laboratorial utilizado consistiu na montagem de um alimentador constituído por uma fonte controlada de tensão, o regulador e um conjunto de cargas estáticas. Por meio da seleção de um conjunto de variações de tensão, compreendendo subtensões e sobretensões, em degraus de 10 e 20%, foram obtidos os resultados experimentais. As grandezas indicativas das tensões, correntes e potências associadas com os diversos componentes do complexo elétrico empregado revelaram uma performance dentro dos padrões esperados e os valores numéricos apresentaram-se como a base para as avaliações comparativas aqui desejadas.

Posteriormente, foi sintetizada a modelagem computacional no domínio do tempo desenvolvida na plataforma ATP, conforme procedimentos descritos em [28]. Para tanto, foram apenas indicados os recursos internos disponibilizados na biblioteca deste programa e os produtos desenvolvidos e que culminaram na representação das unidades eletromagnéticas e estratégia de controle. Os correspondentes resultados operacionais refletindo grandezas similares àquelas advindas dos experimentos foram então apresentados e utilizados como uma segunda base de sustentação para os estudos comparativos.

Por fim, através da aplicação das expressões desenvolvidas nesta dissertação, foram indicados os valores das principais grandezas que expressam o comportamento elétrico do conjunto alimentador, carga e regulador. Como indicado, houve total correspondência entre os valores obtidos para as tensões, correntes e potências, fato este que conduziu a uma constatação sobre a aderência do modelo proposto aos fins aqui almejados.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

Este capítulo tem por objetivo discorrer sobre as principais constatações, resultados e limitações decorrentes dos estudos apresentados ao longo desta pesquisa, em vias de proporcionar um melhor entendimento e visão a respeito das atividades concretizadas.

Inicialmente, o Capítulo 1 ateve-se a introduzir os conceitos e problemas relacionados à qualidade da energia, em especial, no que tange à necessidade de regularização das tensões nas redes elétricas em consonância com os requisitos impostos pelos agentes reguladores. Levantou-se, diante das premissas postas, o estado da arte sobre os recursos atualmente disponíveis visando ao processo de regulação das tensões, identificando as particularidades das tecnologias desenvolvidas e comparando seus princípios físicos e propriedades operacionais, direcionados à especificidade da situação à qual cada equipamento presta-se. Dessa forma, deu-se o desenvolvimento desta proposta de dissertação, alicerçada nesse horizonte de trabalhos e contínua evolução.

Enfocando, de forma especial, as tecnologias pautadas na utilização de estratégias eletromagnéticas, em que pese a ausência de recursos baseados na eletrônica de potência, foi feita a apresentação de uma síntese dos principais equipamentos comerciais utilizados pelas empresas energéticas nos dias atuais. Tal consideração vem ao encontro da busca por meios mais simples de regulação, confiáveis, econômicos, dispondo de manutenção reduzida, dentre outros aspectos relevantes que incitaram o desenvolvimento desta pesquisa. Somadas às estruturas convencionais, foram também consideradas as tecnologias alternativas menos difundidas, a exemplo dos reguladores defasadores ou de ângulos de fase (*phase-shifter transformers*). Estes últimos, como se sabe, não se tornaram alvo de produção em série por parte de fabricantes nacionais e internacionais, tendo sido conservadas apenas a sua conceituação e filosofia operacional.

Com vistas ao atendimento às premissas postas no que tange à simplicidade construtiva e operacional, nacionalização, custos, etc., os trabalhos avançaram no sentido de apresentar uma ideia inovadora, concebida na tese de doutorado referenciada como [28]. Ressalva faz-se ao fato de que o equipamento ali proposto tem como papel tão somente a restauração das magnitudes das tensões em pontos específicos da rede, e não o controle das potências reativas e ativas transmitidas entre sistemas, conforme premissas da estratégia de controle do ângulo de fase.

O regulador apresentado mostrou-se composto, primordialmente, por duas unidades principais de potência e uma unidade de controle, caracterizando-se, assim, por uma estrutura simples, de concepção predominantemente eletromagnética e passível de construção por fabricantes nacionais utilizando matéria prima existente no país. Ainda, seu arranjo de controle mostrou-se totalmente compatível com recursos tradicionalmente disponibilizados no mercado, o que, somado

à sua estrutura majoritariamente eletromagnética, contribui para a compatibilização aos requisitos almejados quando da concepção do dispositivo ora tratado.

Na busca por uma ferramenta que pudesse oferecer meios para uma avaliação simples e direta a respeito da eficácia operacional do dispositivo regulador, assim como prover meios para um pré-dimensionamento de suas unidades de potência e controle, o Capítulo 2 apresentou por foco o desenvolvimento de uma modelagem do equipamento baseada nos recursos oferecidos pela representação matemática no domínio da frequência. De posse de tais desenvolvimentos matemáticos, acredita-se ter sido viabilizada uma estratégia mais simples para uma melhor compreensão e parametrização do dispositivo diante das características das cargas e necessidades impostas pela rede de conexão, vulnerável aos fenômenos responsáveis por variações de tensão e violações dos padrões estabelecidos pela ANEEL.

A partir das bases físicas e operacionais concebidas na tese de doutorado anteriormente mencionada, e no intuito de oferecer meios para uma validação da modelagem proposta neste trabalho, seguiu-se, no Capítulo 3, à apresentação de uma estrutura laboratorial preparada a receber ensaios e estudos de desempenho de um protótipo de regulador produzido em escala reduzida para os propósitos aqui postos, com destaque às suas características físicas construtivas e principais parâmetros.

Dessa forma, procedeu-se, na sequência, à caracterização do caso estudo considerado como base para os estudos comparativos, apresentando os resultados obtidos a partir da inserção do protótipo no arranjo laboratorial e os analisando no âmbito da eficácia da regulação ora referida. Para tal, empregou-se uma configuração de rede elétrica simplificada na qual foram impostas condições operacionais caracterizadas na forma de sobretensões e subtensões no ponto de conexão, em degraus de 20% e 10%. A potencialidade da proposta e sua eficácia aos propósitos aqui estabelecidos foram ratificadas através dos casos avaliados nessa primeira fase dos estudos.

Ainda em consonância com os desenvolvimentos obtidos em pesquisas anteriores, e, com vistas a proporcionar uma base mais sólida de resultados e comportamentos do regulador, que servissem a uma avaliação mais fidedigna do desempenho do modelo no domínio da frequência ora proposto, apresentou-se, de forma concisa, o estabelecimento da estratégia de representação do equipamento via técnicas de modelagem no domínio do tempo e sua inserção na plataforma ATP. Através deste *software*, foi feita uma avaliação computacional da performance do regulador, diante das mesmas condições operativas impostas experimentalmente, apresentando-se, pois, como uma segunda base de resultados para o processo de avaliação da estratégia de representação proposta por esta dissertação.

De maneira semelhante aos desenvolvimentos e estudos de desempenho apresentados para o arranjo experimental, através da imposição, na forma de degraus programados de tensão de 10% e 20% (reduções e elevações de tensão), foram então realizados os ensaios de desempenho visando à validação das respostas advindas do simulador ATP, os quais se mostraram consistentes no sentido de evidenciar a operação do dispositivo e o sucesso no processo da compensação.

Por fim, foi realizada uma avaliação de desempenho da modelagem no domínio da frequência, proposta por esta dissertação de mestrado, correlacionando seus resultados aos desempenhos previamente apresentados no tangente aos estudos experimentais e computacionais no domínio do tempo, demonstrando a congruência dos mesmos e a eficácia da estratégia de representação.

Muito embora se reconheça o sucesso da proposta de modelagem no domínio da frequência e também dos desempenhos operacionais do regulador eletromagnético como um todo, tendo em vista os resultados supra mencionados no ambiente laboratorial e computacional, deve-se atentar para o fato que, até a plena consolidação do dispositivo, na forma de um produto comercial, certamente outros aspectos ainda se fazem necessários e merecedores de maiores investigações. Neste particular ressaltam-se os seguintes pontos focais:

- Estudos operacionais utilizando-se técnicas de representação por elementos finitos objetivando, dentre outros aspectos, uma maior identificação das condições operacionais sob o ponto de vista magnético e térmico;
- Investigações associadas com os fenômenos transitórios de energizações, desenergizações, alterações de tapes, processos de comutação, dentre outros;
- Análise de desempenhos envolvendo a operação dinâmica, com destaque à questão da inversão de fluxos de potências;
- Proposição de mecanismos eletrônicos para variações das tensões injetadas e respectivos impactos na rede de conexão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOLLEN, M. **"Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions"**. 1. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 1999.
- [2] PRODIST, A. -A. N. D. E. E. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. [S.l.]: [s.n.], v. Revisão 4, fevereiro 2012.
- [3] IEEE STANDARD 1159-1995. **IEEE recommended practice for monitoring electric power quality**. New York. 1995.
- [4] VASCONCELLOS, A. B. **"Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos tipo Reator a Núcleo Saturado Para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e Validação Experimental"**. Universidade Federal de Uberlândia, Tese de Doutorado. Uberlândia. Setembro de 2004.
- [5] OLIVEIRA, J. C. et al. **"Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação"**. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia – VII CBQEE. Santos - SP: [s.n.]. 2007. p. 1-6.
- [6] KHEDERZADEH, M.; GHORBANI, A. "STATCOM Modeling Impacts on Performance Evaluation of Distance Protection of Transmission Lines". **European Transactions on Electrical Power**, v. 21, p. 2063-2079, 2011.
- [7] MANUAL de instruções para Regulador de Tensão Monofásico TB-R1000. Toshiba Leading Innovation. [S.l.]: [s.n.]. <http://www.toshiba.com.br/>.
- [8] REGULADOR de Tensão Monofásico COOPER – VR 32, Manual do fabricante. Cooper Power Systems: [s.n.]. www.cooperpower.com.
- [9] REGULADOR de Tensão Monofásico ITB RAV-2, Manual do fabricante. ITB Equipamentos Elétricos: [s.n.]. www.itb.ind.br.
- [10] WEINHOLD, M. et al. **"Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems"**. II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - II SBQEE. São Lourenço – MG: [s.n.]. 1997. p. 1-6.
- [11] NIELSEN, J. G. et al. "Control and Testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at Medium Voltage Level". **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 19, n. 3, p. 806-813, 2004.
- [12] KHALILIAN, M. et al. "Distributed Static Series Compensator (DSSC) for Subsynchronous Resonance Alleviation and Power Oscillation Damping". **European Transactions on Electrical Power**, v. 22, p. 589-600, 2012.
- [13] GUPTA, R.; GHOSH, A.; JOSHI, A. "Performance Comparison of VSC-Based Shunt and Series Compensators Used for Load Voltage Control in Distribution Systems". **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 1, p. 268-278, 2011.
- [14] PIRES, I. A. **"Compensadores Série de Tensão em Onda Quadrada: Aplicação na Mitigação de**

Afundamentos de Tensão". Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado. Belo Horizonte - MG. 2011.

[15] MASSOUD, A. M. et al. "Evaluation of a Multilevel Cascaded-Type Dynamic Voltage Restorer Employing Discontinuous Space Vector Modulation". **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 7, p. 2398-2410, 2010.

[16] GALASSI, M. "**Projeto e Construção de um Restaurador Dinâmico de Tensão**". Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado. São Paulo. 2006.

[17] SIDELMO, M. S. "**Análise e Implementação de um Restaurador Dinâmico de Tensão**". Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado. Belo Horizonte - MG. Dezembro de 2003.

[18] DIVAN, D. et al. "**Impact of Voltage Sag Correction in Critical Manufacturing Applications**". Power Quality Applications - PQA. North America – Portland, Oregon: [s.n.]. Jun 2002. p. 1-7.

[19] MINIDYSC, ProDySc e MegaDySC, Manual do fabricante. [S.l.]: Softswitching Technologies. <http://www.softswitch.com/sst/index.do>.

[20] HINGORAL, N. G.; GYUGYI, L. "**Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**". 1. ed. [S.l.]: Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1999.

[21] GYUGYI, L. "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems". **Generation, Transmission and Distribution**, v. 139, n. 4, p. 323-331, Jul 1992.

[22] MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems". **IEEE Press and Wiley Interscience**, New York, USA, 2002.

[23] SILVA, T. V. D. **Uma Proposta para o Controle Eletrônico de Reguladores Eletromagnéticos através do Reforço Série de Tensão**. Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. Uberlândia. 2012.

[24] GONEN, T. "**Electric Power Distribution System Engineering**", **Second Edition**. CRC Press, 2007.

[25] FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. **Electronic Tap-Changer for Distribution Transformers**. 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 2011.

[26] CONTROLE para Regulador de Tensão Monofásico TB-R1000. Toshiba Leading Innovation. [S.l.]: [s.n.]. <http://www.toshiba.com.br/>.

[27] IRAVANI, M. R. et al. Applications of static phase shifters in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1994.

[28] SANTILIO, F. P. **Proposta, Modelagem e Validação de uma Nova Concepção de Regulador Eletromagnético através do Reforço Série de Tensão**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2013.

[29] MEMBERS OF THE STAFF OF THE DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING - MIT. **Magnetic Circuits and Transformers**. 15ª. ed. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T Press, 1965.