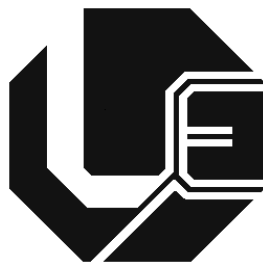


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



PROPOSTA, MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE
UMA NOVA CONCEPÇÃO DE REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO ATRAVÉS DO REFORÇO
SÉRIE DE TENSÃO

Fabricao Parra Santilio

Uberlândia
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**PROPOSTA, MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE
UMA NOVA CONCEPÇÃO DE REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO ATRAVÉS DO REFORÇO
SÉRIE DE TENSÃO**

Tese apresentada por Fabricio Parra Santilio à Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Doutor em Ciências. Aprovado em 29 de novembro de 2013.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD – UFU (Orientador)

Gilson Paulillo, Dr – ELDORADO

Mário Fabiano Alves, PhD - PUC/Minas

Antônio Carlos Delaiba, Dr – UFU

Kleiber David Rodrigues, Dr – UFU

Uberlândia

2013

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

S235p Santilio, Fabricio Parra, 1983-
2013 Proposta, modelagem e validação de uma nova concepção de
 regulador eletromagnético através do reforço série de tensão /
 Fabricio Parra Santilio. - 2013.
 155 f. : il.

Orientador: José Carlos de Oliveira.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica -
Controle de qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de, 1947. II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Proposta, Modelagem e Validação de uma Nova Concepção de Regulador Eletromagnético Através do Reforço Série de Tensão

Fabricio Parra Santilio

Tese apresentada por Fabricio Parra Santilio à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor em Ciências.

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

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

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha esposa Gabriela,
aos meus pais Sérgio e Ginoefa e aos meus
irmãos Hugo e Gabriela.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar nesta caminhada.

Aos meus pais Sérgio e Ginoefa, os mais profundos agradecimentos por suas sábias lições de vida, por sempre primarem pela minha educação e por seus exemplos de bondade, honestidade, amor e trabalho.

À minha esposa Gabi, pelo apoio e companheirismo. Obrigado “Vida” pelo seu amor e amizade e por ter escolhido seguir comigo nesta caminhada.

Em especial, expresso meus sinceros agradecimentos ao meu orientador e que se tornou meu *segundo pai* Prof. Dr. José Carlos de Oliveira. Obrigado por ter me aceitado como seu orientando, pela confiança em mim depositada, pela amizade e convivência. Obrigado pelo incentivo, auxílio e constantes ensinamentos, essenciais à concretização desta etapa. Agradeço também, sua esposa Anete, pela amizade e sábios conselhos sobre a vida.

Aos meus familiares, em especial aos meus irmãos Hugo e Gabriela, minha cunhada Laurita e meus tios José Lucas e Magali, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo ao longo das fases e obstáculos superados em minha vida.

Ao professor Dr. Arnulfo Barroso de Vasconcellos, meu orientador de iniciação científica da Universidade Federal de Mato Grosso, por acreditar em mim e ser o grande incentivador da minha busca por constante aperfeiçoamento.

Aos amigos do Laboratório de Qualidade da Energia e da Pós-Graduação: Angélica, Cadu e Duda, Arnaldo, Isaque, João Areis e Maria, Ivan e Ana Cristina, Alex e Loana, Fernanda, Afonso e Gabi, Paulo Henrique e Laíse, Thiago e Mayra, Lucas e Vanessa, Arthur e José Rubens pelo companheirismo, apoio, amizade e agradável convívio proporcionado nos diversos momentos de trabalho em equipe e nos momentos de lazer.

Aos amigos Thiago Vieira e Lucas Vasconcelos pela amizade, apoio e contribuição inestimável na realização desta pesquisa.

Aos alunos da Faculdade de Engenharia Elétrica Letícia, Germano e Hugo pela contribuição durante seu período de Iniciação Científica.

Aos professores Antônio Carlos Delaiba, Aloísio de Oliveira, José Wilson Resende, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Milton Itsuo Samesima, Kleiber David Rodrigues, José Rubens e Luiz Carlos Gomes de Freitas pelo auxílio e conhecimentos transmitidos.

Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições e prontidão em auxiliar na conclusão deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, através de seus professores e funcionários, pela oportunidade de crescimento profissional e aprendizado. À Cinara, José Maria e Kátia pela presteza nos encaminhamentos dos assuntos vinculados com a secretaria da Pós-Graduação, bem como aqueles envolvidos com projetos de pesquisa.

À empresa TRAEI Transformadores Elétricos pela doação das unidades magnéticas que deram origem ao protótipo do Regulador Eletromagnético de Tensão.

A FAPEMIG por ter concedido suporte financeiro a esta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a viabilização desta tese de doutorado.

RESUMO

A busca por soluções para os distintos problemas de qualidade de energia, em especial a regulação dinâmica da tensão de suprimento, têm originado propostas de dispositivos inovadores e adequados às legislações em vigor. Neste 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 desafios para as pesquisas e o desenvolvimento de novos produtos. Neste contexto, o presente trabalho encontra-se focado na proposição de um dispositivo totalmente eletromagnético, no que tange as suas unidades de potência, o qual, via injeções série de reforços de tensão, aditiva ou subtrativa, proporciona a regulação das tensões tanto para alimentadores trifásicos como monofásicos, sendo esse último exigido por muitas instalações rurais. A presente tese ressalta a estrutura física do equipamento, apresenta resultados computacionais extraídos do simulador ATP, estabelece uma modelagem no domínio da frequência, compara os desempenhos teoricamente obtidos com medições realizadas com um protótipo de regulador em escala reduzida validando, assim, a proposição aqui feita.

Palavras-Chave: Qualidade da Energia Elétrica, Regulador de Tensão, Dispositivo Eletromagnético, Modelagem computacional e experimental.

ABSTRACT

The search for solutions to the diverse problems associated with power quality, in particular the regulation of the supply voltage, has been a source of various innovative proposals, which fit satisfactorily within the legislation presently practiced. In particular, while 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 study focuses on the proposal of a fully electromagnetic device as far as the power components are concerned with a discrete mechanical tap changer compensation approach, which through the injection of additive or subtractive series reinforcement provides voltage regulation for both three-phase and single phase feeders, the latter being required by many rural installations. This work highlights the physical structure of the equipment; presents computational results extracted from the simulator ATP; proposes a frequency domain model and compares the theoretical performance obtained from measurements carried out through the use of a scaled down prototype of the regulator, all of which thus validates the proposed study.

Words-Key: Power Quality, Voltage Regulation, Electromagnetic Device, Computational and Experimental Models.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL	21
1.1 - Considerações Iniciais	21
1.2 - Contextualização do Tema.....	23
1.3 - Objetivos e Contribuições Oferecidas Por Esta Tese	28
1.4 - Estrutura da Tese	29

CAPÍTULO II

TECNOLOGIAS DE REGULADORES ELETROMAGNÉTICOS E CONCEPÇÃO DA PROPOSTA	32
2.1 - Considerações Iniciais	32
2.2 - Reguladores Eletromagnéticos Comerciais	33
2.3 - Reguladores Eletromagnéticos Especiais	38
2.4 - Proposta da Topologia e Estrutura Física do Regulador.....	42
2.5 - Estratégia de Controle do Regulador	46
2.6 - Modelagem Matemática do Regulador	48
2.7 - Considerações Finais	59
2.8 - Contribuições Oferecidas Por Este Capítulo.....	60

CAPÍTULO III

MODELAGEM DO REGULADOR NO SIMULADOR ATP E ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO	62
3.1 - Considerações Iniciais	62
3.2 - O Simulador ATP	63
3.3 - Modelagem do RET na Plataforma ATP	65
3.3.1 - Transformador Série	66
3.3.2 - Transformador Paralelo ou de Excitação	74
3.3.3 - Sistema de Controle	76

3.3.4 -	<i>Sistema Completo do Compensador RET – Unidades de Potência e Controle.....</i>	77
3.4 -	Avaliação de Desempenho do Modelo	78
3.5 -	Considerações Finais	87
3.6 -	Contribuições Oferecidas Por Este Capítulo.....	88

CAPÍTULO IV

PROTÓTIPO DO REGULADOR DE TENSÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

4.1 -	Considerações Iniciais	89
4.2 -	Protótipo do RET	90
4.2.1.	<i>Transformador série.....</i>	91
4.2.2.	<i>Autotransformador ou transformador de excitação.....</i>	92
4.2.3.	<i>Dispositivo de seleção de tapes.....</i>	93
4.2.4.	<i>Placa de controle</i>	94
4.2.5.	<i>Acessórios complementares</i>	95
4.3 -	Estudos de Desempenho e Validação do Modelo Computacional Através de Arranjo Laboratorial	95
4.3.1 -	<i>Caso 01 – Variações em degrau impostas pela fonte de suprimento</i>	96
4.3.2 -	<i>Caso 02 – Estudo de desempenho através de variações de carga</i>	109
4.4 -	Estudos de Desempenho Computacional Utilizando o Sistema IEEE de 14 Barras	124
4.5 -	Considerações Finais	134
4.6 -	Contribuições Oferecidas Por Este Capítulo.....	136

CAPÍTULO V

Conclusões	138
-------------------------	------------

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas.....	143
---------------------------------	-----

Anexos

Anexos	148
--------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Concepção de reguladores à base de comutação de tapes [12].....	34
Figura 2.2 - Regulador de tensão Toshiba TB-R1000 [21] e [22].....	37
Figura 2.3 - Regulador de tensão Cooper VR-32 [24]	37
Figura 2.4 - Regulador de tensão ITB RAV-2 [25].....	38
Figura 2.5 - Conceituação física de um regulador de magnitude de tensão [26]	40
Figura 2.6 - Conceituação física de um regulador de ângulo de fase e magnitude de tensão [26]	41
Figura 2.7 - Topologias físicas para o RET	43
Figura 2.8 - Estrutura física do RET com mudança de tapes discretos sob carga.....	44
Figura 2.9 - Diagrama fasorial ilustrativo do desempenho do compensador para reduções e elevações de tensão.....	46
Figura 2.10 - Diagrama de blocos para o controle do compensador	47
Figura 2.11 – Sistema elétrico equivalente atuando como elevador de tensão e constituído por: supridor, alimentador, regulador e cargas	50
Figura 2.12 – Circuito elétrico equivalente do RET para reforço positivo	51
Figura 2.13 – Tensões no supridor, carga e no secundário do autotransformador	55
Figura 2.14 – Sistema elétrico equivalente atuando como redutor de tensão e constituído por: supridor, alimentador, regulador e cargas	56
Figura 2.15 – Circuito elétrico equivalente do RET para reforço negativo	56
Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente de um transformador monofásico de dois enrolamentos – não linear – ATP	64
Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente do RET no sistema	65
Figura 3.3 - Transformador saturável (Modelo: SatTrafo) – ATPDraw	66
Figura 3.4 - Arquivo ATP-file do transformador saturável.....	67
Figura 3.5 - Arquivo DBM representativo do transformador série	68
Figura 3.6 - Declaração de argumentos referentes a nomes de nós.....	68
Figura 3.7 - Declaração de argumentos relacionados a valores numéricos.....	70

Figura 3.8 - Template representativa dos enrolamentos do transformador série.....	71
Figura 3.9 - Execução do ATP Launcher	72
Figura 3.10 - Cartão (*.lib) do transformador série.....	72
Figura 3.11 - Curva de saturação – Transformador série	73
Figura 3.12 - Novo elemento criado no ATPDraw – TSERIE.sup	74
Figura 3.13 - Autotransformador [46]	74
Figura 3.14 - Autotransformador no ATPDraw	75
Figura 3.15 - Controle do RET no ATPDraw	77
Figura 3.16 - Regulador Eletromagnético de Tensão no ATPDraw.....	78
Figura 3.17 - Diagrama unifilar do sistema radial utilizado para os estudos computacionais .	79
Figura 3.18 - Tensão na Barra 1 – variações de tensão adotadas ao longo do período de investigação	80
Figura 3.19 - Tensões nas barras 1 e 2	81
Figura 3.20 - Tensões e correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série	83
Figura 3.21 - Correntes nos diversos trechos do alimentador	84
Figura 3.22 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador	84
Figura 3.23 - Potências aparente, ativa e reativa requeridas pelo RET	86
Figura 4.1 - Protótipo do RET	91
Figura 4.2 - Transformador série do RET	92
Figura 4.3 - Autotransformador.....	93
Figura 4.4 - Dispositivo de seleção de tape	93
Figura 4.5 - Placa de controle.....	94
Figura 4.6 - Reator de comutação e transformado para alimentação do controle e das chaves	95
Figura 4.7 - Arranjo laboratorial utilizado para os experimentos - caso 01	96
Figura 4.8 - Estrutura física estabelecida.....	97
Figura 4.9 - Tensão na Barra 1 – variações adotadas ao longo do período de investigação – caso 1	97
Figura 4.10 - Tensões nos barramentos 1 e 2 – valores eficazes – caso 1.....	99
Figura 4.11 - Tensão na Barra 2 – valores instantâneos – caso 1.....	100
Figura 4.12 - Tensões e Correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores eficazes – caso 1	102

Figura 4.13 - Tensões impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores instantâneos – caso 1	103
Figura 4.14 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores eficazes – caso 1	104
Figura 4.15 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores instantâneos – caso 1	105
Figura 4.16 - Tempo de resposta do protótipo do RET	107
Figura 4.17 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador – caso 1	108
Figura 4.18 - Arranjo laboratorial utilizado para os experimentos - caso 02	110
Figura 4.19 - Tensão medida na Barra 2 – sem a atuação do RET – caso 2: Inserção súbita de carga	111
Figura 4.20 - Tensão no Barra 2 – Sem e com o RET – caso 2: Inserção súbita de carga	113
Figura 4.21 - Tensões e Correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores eficazes – caso 2: Inserção súbita de carga.....	114
Figura 4.22 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores eficazes – caso 2: Inserção súbita de carga.....	115
Figura 4.23 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador – caso 2: Inserção súbita de carga	117
Figura 4.24 – Tensão medida na Barra 2 – sem a atuação do RET - caso 2: Alívio súbito de carga	119
Figura 4.25 - Tensão na barra 2 – Com e sem o RET - caso 2: Alívio súbito de carga	120
Figura 4.26 - Tensões e Correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores eficazes - caso 2: Alívio súbito de carga.....	121
Figura 4.27 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores eficazes - caso 2: Alívio súbito de carga.....	122
Figura 4.28 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador - caso 2: Alívio súbito de carga.....	124
Figura 4.29 - Sistema elétrico IEEE 14 barras	126
Figura 4.30 - Casos de estudo inseridos no sistema elétrico IEEE 14 barras.....	129
Figura 4.31 - Perfil da tensão da fase A na Barra 14 (vermelha) e na barra da Carga ₁₄ (verde), com atuação do RET – Rejeição de carga na Barra 9	131
Figura 4.32 - Perfil da tensão da fase A na Barra 14 (vermelha) e na barra da Carga ₁₄ (verde), com atuação do RET – Perda de geração na Barra 2.....	131

Figura 4.33 - Perfil da tensão da fase A na Barra 14 (vermelha) e na barra da Carga14 (verde), com atuação do RET – Curto-circuito trifásico na Barra 6	132
Figura 4.34 - Potência aparente solicitada pelo RET para fins de compensação de tensão – 3 casos de análise.....	133
Figura 4.35 - Potência Aparente na barra da Carga ₁₄	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Principais propriedades dos equipamentos de compensação.....	27
Tabela 3.1 - Parâmetros do alimentador radial utilizado.....	79
Tabela 3.2 - Tensões de operação adotadas para a Barra 1	81
Tabela 3.3 - Tensão das Barras 1 e 2 – computacional	82
Tabela 3.4 - Potências na carga e no regulador proposto	85
Tabela 4.1 - Tensões de operação adotadas para a barra 1 – caso 1.....	98
Tabela 4.2 - Tensão nas Barra 1 e 2 – computacional e experimental – caso 1	100
Tabela 4.3 - Potências na carga e no regulador proposto – caso 1	109
Tabela 4.4 - Parâmetros do sistema e do regulador – caso 2: Inserção súbita de carga	110
Tabela 4.5 - Tensão medida na barra 2 – sem a atuação do RET – caso 2: Inserção súbita de carga	112
Tabela 4.6 - Tensão na Barra 2 – computacional e experimental – caso 2: Inserção súbita de carga	113
Tabela 4.7 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – caso 2: Inserção súbita de carga	116
Tabela 4.8 - Potências na carga e no regulador proposto – caso 2: Inserção súbita de carga	117
Tabela 4.9 - Parâmetros do alimentador radial utilizado – caso 2: Alívio súbito de carga	118
Tabela 4.10 - Tensão medida na barra 2 – sem a atuação do RET - caso 2: Alívio súbito de carga	119
Tabela 4.11 - Tensão na Barra 2 – computacional e experimental - caso 2: Alívio súbito de carga	120
Tabela 4.12 - Correntes nos diversos trechos do alimentador - caso 2: Alívio súbito de carga	123
Tabela 4.13 - Potências na carga e no regulador proposto - caso 2: Alívio súbito de carga ..	124
Tabela 4.14 - Parâmetros dos elementos constituintes do sistema IEEE 14 barras.....	127
Tabela 4.15 - Parâmetros do RET - sistema IEEE	128
Tabela 4.16 – Casos investigados - sistema IEEE.....	130
Tabela 4.17 – Valores da tensão da fase A na barra 14 – rejeição de carga na barra 9.....	131
Tabela 4.18 – Valores da tensão da fase A na Barra 14 – perda de geração na barra 2	132

Tabela 4.19 – Valores da tensão da fase A na Barra 14 – curto-circuito trifásico na barra 6	132
Tabela 4.20 – Potência aparente solicitada pelo RET para fins de compensação de tensão – 3 casos de análise.....	133
Tabela 4.21 – Característica e magnitude do fenômeno manifestado na barra 14	134

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica;
QEE	Qualidade da Energia Elétrica;
RCTs	Reatores Controlados a Tiristores;
CCT	Capacitores Chaveados a Tiristores;
STATCOM	Static Synchronous Compensator;
SIPCON P	Siemens Power Conditioner – Parallel;
DVR	Dynamic Voltage Regulator;
SIPCON S	Siemens Power Conditioner – Series;
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
DySC	Dynamic Sag Correctors
UPFC	Unified Power Flow Controller;
RET	Regulador Eletromagnético de Tensão;
ATP	Alternative Transients Program;
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor;
GTO	Gate Turn-Off Thyristor;

LISTA DE SÍMBOLOS

$\pm\Delta V$	Parcela de tensão injetada ou absorvida do sistema;
V_a	Tensão na fase a ;
V_b	Tensão na fase b ;
V_c	Tensão na fase c ;
ΔV_a	Parcela de tensão injetada ou absorvida na fase a ;
ΔV_b	Parcela de tensão injetada ou absorvida na fase b ;
ΔV_c	Parcela de tensão injetada ou absorvida na fase c ;
$V_a \text{ Reg}$	Tensão na fase a com regulação;
$V_b \text{ Reg}$	Tensão na fase b com regulação;
$V_c \text{ Reg}$	Tensão na fase c com regulação;
$\dot{V}_s$	Tensão na barra do supridor;
$\dot{V}_c$	Tensão na barra do consumidor;
$\Delta \dot{V}_1$	Parcela de tensão injetada ou absorvida no primário;
$\Delta \dot{V}_2$	Parcela de tensão injetada ou absorvida no secundário;
N_1	Número de espiras do enrolamento primário;
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário;
Ch_{pp}	Chave de compensação para reforço positivo;
Ch_{pn}	Chave de compensação para reforço negativo;
$Ch_0 \text{ a } Ch_4$	Chaves dos tapes do autotransformador;
$\Delta \dot{V}_s$	Tensão de compensada;
$\dot{Z}_{CC}$	Impedância do sistema;
$\dot{V}_{th}$	Tensão equivalente de Thévenin;
R_{th}	Resistência de Thévenin equivalente do alimentador;
X_{th}	Reatância de Thévenin equivalente do alimentador;

$\dot{V}_{Tape}$	Tensão no tape do autotransformador;
$\dot{I}_C$	Corrente da carga (consumidor);
$\dot{Z}_C$	Impedância da carga;
$\dot{I}_F$	Corrente fornecida pelo supridor;
$\dot{I}_{AT}$	Corrente no primário do autotransformador;
$\dot{I}_N$	Corrente no neutro do autotransformador;
$\dot{I}_{TS_S}$	Corrente no secundário do transformador série;
$\dot{V}_{TS_S}$	Tensão no secundário do transformador série;
$\dot{Z}_{1TS}$	Impedância do enrolamento primário do transformador série;
$\dot{Z}_{2TS}$	Impedância do enrolamento secundário do transformador série;
$\dot{R}_{1TS}$	Resistência do enrolamento primário do transformador série;
$\dot{X}_{1TS}$	Reatância de dispersão do enrolamento primário do transformador série;
$\dot{R}_{2TS}$	Resistência do enrolamento secundário do transformador série;
$\dot{X}_{2TS}$	Reatância de dispersão do enrolamento secundário do transformador série;
$\dot{I}_{AT_S}$	Corrente no secundário do autotransformador;
$\dot{V}_{AT_S}$	Tensão no secundário do autotransformador;
$\dot{Z}_{1AT}$	Impedância do enrolamento primário do autotransformador;
$\dot{Z}_{2AT}$	Impedância do enrolamento secundário do autotransformador;

$\dot{R}_{1AT}$	Resistência do enrolamento primário do autotransformador;
$\dot{X}_{1AT}$	Reatância de dispersão do enrolamento primário do autotransformador;
$\dot{R}_{2AT}$	Resistência do enrolamento secundário do autotransformador;
$\dot{X}_{2AT}$	Reatância de dispersão do enrolamento secundário do autotransformador;
a_{AT}	Relação de transformação do autotransformado;
$\dot{Z}_{Reator}$	Impedância do reator de comutação;
S_{AT}	Potência aparente do autotransformador;
S_{TS}	Potência aparente do transformador série;
$Z_{cc}\%$	Impedância percentual de curto-circuito do transformador;
$R_{cc}\%$	Resistencia percentual de curto-circuito do transformador;
$I_0\%$	Corrente percentual do transformador em vazio;
S_{carga}	Potência entregue a carga;
S_{RET}	Complemento de potência injetada/absorvida pelo regulador;
$\Delta S[\%]$	Porcentual da diferença entre a potência entregue a carga e o complemento de potência injetada/absorvida pelo regulador

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos principais pontos associados com o desempenho das redes elétricas de distribuição e transmissão apoia-se na questão do atendimento aos padrões estabelecidos para as faixas permitidas às tensões de suprimento. Somado aos valores de regime permanente, há ainda a se considerar outros fenômenos, de natureza dinâmica, que podem se apresentar como fatores impactantes ao desempenho dos sistemas. De fato, o assunto 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 de ciclos elétricos até mesmo em minutos [1].

No contexto acima posto, a regulamentação vigente relacionada com a conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica, em regime permanente, encontra-se devidamente formalizada pela Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL, através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica [2]. Esse módulo tem por objetivo estabelecer os procedimentos relativos à Qualidade da Energia Elétrica - QEE, abordando tópicos relativos à qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Particularmente, no que se refere à qualidade do produto, o documento

citado define os conceitos, os parâmetros envolvidos e mecanismos que possibilitem à ANEEL definir os valores limite para os indicadores de QEE.

Os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos nesse módulo aplicam-se aos sistemas de distribuição e devem ser observados por todos os agentes envolvidos, destacando-se entre eles as distribuidoras de energia elétrica.

Na seção 8.1 do PRODIST define-se a terminologia, caracteriza-se o fenômeno e são estabelecidos os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão. Também são fixados os limites para os níveis de tensão em regime permanente (estado estacionário), os indicadores de qualidade, os critérios de medição e registro, prazos para regularização e de compensação ao consumidor, caso os limites para o atendimento adequado não sejam obedecidos.

O termo conformidade de tensão elétrica refere-se à comparação da tensão medida no ponto de conexão em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos [2]. Com relação aos valores de referência, as tensões medidas devem ser referenciadas a valores nominais ou a valores contratados. Os valores nominais devem ser fixados em função dos níveis de planejamento do sistema de distribuição de modo que haja compatibilidade com os níveis de projeto dos equipamentos elétricos de uso final. Os valores contratados devem estar situados dentro de uma faixa em torno dos valores nominais, devendo ser pactuados entre os agentes. Dessa forma, o valor usado para comparação com as tensões medidas, seja o nominal ou o contratado, deve ser denominado tensão de referência [2].

Para a regulação das tensões contratadas devem ser especificados valores correspondentes às derivações padronizadas ou pactuadas entre a distribuidora e o consumidor do Grupo A, dentro das faixas de tensões contratadas. Essas devem se basear em estudos técnicos que consideram as variações de tensão no sistema de distribuição, ao longo do tempo.

Segundo os procedimentos de medição de tensão estabelecidos no Módulo 8, seção 8.1, item 2.6 (Instrumentação e metodologia de medição) e sub-item 2.6.3 (Classificação das leituras), a tensão de atendimento associada às leituras deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência adotada.

Os referidos valores correspondentes às faixas de classificação adequada, precária e crítica (superior e inferior) são definidos em categorias percentuais que englobam as tensões de distribuição e transmissão, em seus valores nominais, para as classes de tensão inferiores a 1 kV, de 1 kV a 69 kV, de 69 kV a 230 kV e acima de 230 kV.

Visando mitigar os desvios na tensão de suprimento, tanto no que tange aos efeitos de longa duração como os 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.

1.2 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A preocupação com a manutenção da qualidade da energia elétrica dentro dos padrões considerados aceitáveis é um dos temas mais abordados nos dias de hoje. Isso ocorre principalmente pelo fato de que os níveis de tensão nas barras são regulamentados pela agência de regulação e, na eventualidade do desvio de tensão a um nível considerado não ideal de suprimento, pode resultar em penalizações para as concessionárias de energia elétrica.

Das tecnologias concebidas para realização desse processo de adequação dos níveis de tensão, somado a outras estratégias voltadas para se atingir tal objetivo, a exemplo de reforços de barramentos, repotencialização de

componentes, etc., existem, tradicionalmente, duas vias mais comumente utilizadas. As indiretas, que se fundamentam no controle das potências reativas que se estabelecem pelos alimentadores e seus respectivos impactos sobre os níveis das tensões, e as diretas, que atuam pontualmente nos valores das tensões através de dispositivos que proporcionam, via comutadores de tapes ou outros, o atendimento dos propósitos em pauta.

Focando a estratégia da potência reativa, surge a técnica clássica do emprego de bancos de capacitores e/ou reatores, fixos ou variáveis [3] e [4]. No que tange aos mecanismos que proporcionam alterações das respectivas potências, fornecidas ou consumidas, há ainda de se reconhecer o emprego de recursos mecânicos, eletromagnéticos e eletrônicos. O tema, de modo geral, é bastante clássico e os dispositivos comercialmente em uso dispensam comentários adicionais, a não ser pela menção de que os arranjos mecânicos caracterizam-se pelo emprego de contadores, chaves ou disjuntores; os eletromagnéticos baseiam-se na não linearidade dos materiais utilizados; e os eletrônicos nos recursos tecnológicos amplamente difundidos. Não obstante tal reconhecimento, vale ressaltar que, em se tratando dos equipamentos com controle eletrônico, uma das tecnologias mais comumente difundidas na atualidade apresenta-se na forma dos conhecidos RCTs (reatores controlados a tiristores) e CCTs (capacitores chaveados a tiristores), já em uso há décadas e com eficácia comprovada [5], [6], [7] e [8]. Quanto aos dispositivos provenientes do controle do nível de saturação, esses foram largamente utilizados no passado e, atualmente, tal tecnologia têm sido alvo de investigações a exemplo de [9], [10] e [11], visto que a estratégia pôde se mostrar atrativa para algumas aplicações particulares.

Ainda no contexto da filosofia de compensação da tensão fundamentada no fornecimento ou consumo de potências reativas, não se pode deixar de mencionar os conhecidos compensadores síncronos, em uso há longa data e ainda oferecendo, para aplicações específicas, uma alternativa bastante atrativa [12] e [13].

Por fim, e ainda inserido nos mesmos princípios supramencionados, na atualidade, através dos recursos disponibilizados pela eletrônica de potência, surgiu um novo conceito, já materializado na forma de produtos comerciais, os quais, além da propriedade atrelada com a regulação de tensão, também possuem, via de regra, outros atributos não diretamente afeitos aos fins aqui considerados. Nessa categoria incluem-se dispositivos diversos, com as denominações distintas conforme seus fabricantes, os quais atuam no sentido de propiciar injeções ou consumos de potências reativas através de equipamentos eletrônicos que se apresentam fisicamente constituídos por arranjos conversores capazes de atuar como dispositivos que oferecem meios para a adequação dos níveis de tensão, utilizando, para tanto, o princípio do controle da magnitude da tensão e respectivo ângulo de fase através de disparos programados para as chaves eletrônicas que compõem as unidades inversoras. Esse é o caso dos denominados recursos comerciais STATCOM, SIPCON P, dentre outros [14], [15], [16], [17], [18], [19] e [20].

Alternativamente, o processo da compensação da tensão, como anteriormente referido, pode empregar dispositivos capazes de atuar diretamente sobre essa grandeza através da alteração direta da mesma com vistas a promover a sua adequação aos padrões exigidos. Isso pode ser conseguido pela alteração manual ou automática de tapes ou pela inserção de tensões controladas, aditivas ou subtrativas, àquelas disponibilizadas pela rede supridora. Inserido nesse contexto, apresentam-se produtos comerciais bastante clássicos, a exemplo dos reguladores eletromagnéticos: Toshiba TB-R1000, COOPER VR-32 e o de fabricação brasileira ITB RAV-2 [21], [22], [23], [24] e [25].

Inserido no cenário dos equipamentos que utilizam o método direto, destacam-se, para os fins aqui postos, os equipamentos eletromagnéticos destinados a proporcionar defasagens angulares entre as tensões, a exemplos dos clássicos dispositivos *phase shifters* ou defasadores. Esses, originalmente voltados ao controle do fluxo de potência ativa a partir da variação do ângulo δ ,

são também capazes de proporcionar a regulação de tensão. 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. Faz-se necessário ainda ressaltar que esses reguladores podem alterar o valor do módulo e ângulo das tensões injetadas de maneira discreta ou contínua; a primeira a partir da utilização de arranjo de bobinas que são alternadas através de contadores eletromagnéticos ou outro meio mecânico, e uma segunda estratégia fundamentada no emprego de conversores estáticos, como indicado em [26], [27], [28], e [29].

Ainda dentro do cenário dos dispositivos atuantes diretamente sobre os níveis das tensões surgiram, há relativamente pouco tempo, linhas mais modernas de produtos que também empregam recursos da eletrônica de potência. Esses equipamentos possuem como filosofia básica a produção e injeção de tensões complementares à de suprimento, de forma aditiva ou subtrativa, que proporcionam incrementos de tensões 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. Dentro dessa linha de equipamentos, ressaltam-se as tecnologias comercialmente conhecidas por DVR, SIPCON S, TSSC, SSSC, Softswitching DySC, dentre outros [20], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39] e [40]. Tais produtos encontram-se embasados numa filosofia construtiva e operacional em consonância com o denominado UPFC [26], [41] e [42].

Diante da grande diversidade de produtos, cada qual com sua concepção física e operacional, destaca-se as principais propriedades dos equipamentos de compensação nos quesitos, técnicos, econômicas e operacionais. Para facilitar uma análise comparativa entre os mesmos, complementando informações extraídas de [43], foi produzida a Tabela 1.1, a qual ilustra, de forma sucinta, os principais aspectos atrelados com uma ou outra tecnologia e produto.

Tabela 1.1 – Principais propriedades dos equipamentos de compensação

Equipamento de Compensação	Principais Propriedades
Reator chaveado mecanicamente	• Princípio e construção simples; • Valores fixos;
Banco de capacitores chaveado mecanicamente	• Princípio e construção simples; • Valores Fixos; • Transitórios de chaveamento;
Compensador Síncrono	• Possui capacidade de sobrecarga; • Totalmente controlável; • Tempo de resposta lento (500ms); • Contribuição de curto circuito na faixa capacitiva; • Perdas elevadas; • Manutenção Elevada;
Reator a núcleo saturado	• Princípio e construção simples; • Baixo índice de manutenção; • Controle natural da absorção de reativos; • Rápido tempo de resposta; • Não é produzido em escala industrial; • Produção de componentes harmônicas;
Reator controlado a Tiristores – RCT	• Tempo rápido de resposta (5ms); • Totalmente controlável; • Controle contínuo de potência reativa; • Nenhum efeito sobre o nível de faltas; • Perdas médias; • Manutenção Baixa; • Harmônicos durante transitórios e regime permanente;
Banco de capacitores chaveado a Tiristores – CCT	• Tempo rápido de resposta (10ms); • Perdas baixas; • Manutenção baixa; • Harmônicos durante transitórios; • Controle da potência reativa somente por estágios; • Barramentos e controle complexos;
Reguladores automáticos de tensão	• Princípio e construção simples; • Baixo custo; • Alto tempo de resposta; • Alto índice de manutenção; • Valores preestabelecidos para regulação da tensão;

Static Synchronous Compensator - STATCOM	• Rápido tempo de resposta (8ms); • Pode fornecer ou absorver potência reativa; • Total controle do montante de potência a ser absorvida/injetada; • Alto custo de implementação e manutenção; • Necessidade de mão de obra qualificada; • Utiliza a mais fina linha da eletrônica de potência; • Complexo sistema de controle;
Dymanic Voltage Restorer – DVR	• Rápido tempo de resposta (8ms); • Pode injetar tensões, tanto aditivas quanto subtrativas, em módulo e ângulo de fase; • Pode ser utilizado como um filtro ativo; • Alto custo de implementação e manutenção; • Necessidade de mão de obra qualificada; • Utiliza a mais fina linha da eletrônica de potência; • Complexo sistema de controle;

À luz do exposto, fica evidenciado que, muito embora se reconheça a existência de uma extensa gama de produtos disponíveis no mercado para os fins aqui almejados, o tema ainda tem motivado muitos pesquisadores para a busca de novas concepções visando, dentro outros aspectos: simplicidade operacional, robustez, valores de investimento competitivos, instalações físicas menores, custos de manutenção reduzidos, maior índice de nacionalização, nível de confiabilidade elevado e propriedades operativas compatíveis com os requisitos impostos. A busca por produtos com tais propriedades apresenta-se pois como o grande motivador para a pesquisa aqui proposta.

1.3 - OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA TESE

Empregando arranjos físicos totalmente eletromagnéticos no que tange às suas partes de potência, surge a proposta contemplada nesta tese de doutorado, a qual foi designada por Regulador Eletromagnético de Tensão – RET. O arranjo, em sua essência, é formado por duas unidades eletromagnéticas fundamentais. Uma primeira destinada à extração de energia da rede, materializada na forma de

um autotransformador conectado em paralelo com a rede, e uma segunda, destinada à inserção, em série com o alimentador principal, de uma tensão compatível ao enquadramento das tensões de suprimento nos termos requeridos pela legislação.

Tendo contextualizado o tema e estabelecidas às diretrizes que nortearam a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, vale ressaltar que esta tese apresenta as seguintes contribuições direcionadas à análise de desempenho do equipamento RET:

- Definição da estrutura física do compensador e estratégia de controle, modelagem e implementação computacional no simulador ATP e estudos de desempenho de situações adversas da operação do dispositivo;
- Estabelecimento do modelo do dispositivo no domínio da frequência visando meios para o dimensionamento básico das unidades de potência e controle;
- Construção de um protótipo de regulador de tensão em escala reduzida visando estudos preliminares de desempenho e ratificação do modelo estabelecido.

1.4 - ESTRUTURA DA TESE

Diante do exposto, além do presente capítulo introdutório, esta pesquisa será desenvolvida dentro da estrutura organizacional que se segue:

Capítulo II – Tecnologias de Reguladores Eletromagnéticos e Concepção da Proposta

Este capítulo é dedicado à apresentação dos arranjos eletromagnéticos tradicionais, encontrados na literatura ou comercialmente disponíveis no mercado nacional e internacional, os quais têm sido utilizados nas redes de

transmissão e distribuição de energia elétrica. Adicionalmente, são tecidos comentários sobre os reguladores de ângulo de fase indicados na literatura. Por fim, o trabalho estabelece a concepção física e operacional do dispositivo proposto e sua respectiva modelagem matemática através de técnicas de representação no domínio da frequência.

Capítulo III – Modelagem do Regulador no Simulador ATP e Estudos Computacionais de Desempenho

Este capítulo apresenta a estratégia para o processo de modelagem, a qual, em consonância com procedimentos tradicionais, tem por norte a utilização dos recursos já disponibilizados na plataforma ATP, os quais são devidamente adequados aos propósitos desta pesquisa. A representação em pauta contempla as unidades de potência e de controle, obtendo como resultado final o modelo computacional completo do dispositivo RET devidamente inserido na plataforma escolhida. Por fim são realizados estudos avaliativos do programa obtido através de um caso estudo de regulação de um alimentador elétrico sujeito a variações programadas para a tensão do supridor.

Capítulo IV – Protótipo do Regulador de Tensão e Validação do Modelo Computacional

Esta etapa da pesquisa encontra-se direcionada ao estudo de desempenho do protótipo do Regulador Eletromagnético de Tensão ora proposto, visando à validação operacional do equipamento e do modelo computacional elaborado. Portanto, o cerne dos trabalhos situa-se na correlação entre os resultados

operacionais obtidos de duas estratégias laboratoriais e seus correspondentes comportamentos computacionais, e da realização de estudos avaliativos do desempenho do dispositivo diante de fenômenos dinâmicos atrelados com o sistema elétrico padrão denominado por IEEE - 14 barras.

Capítulo V – Conclusões

Por fim, apresenta-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo, e ainda, algumas perspectivas para futuros desenvolvimentos para o avanço da proposta ora contemplada.

CAPÍTULO II

TECNOLOGIAS DE REGULADORES ELETROMAGNÉTICOS E CONCEPÇÃO DA PROPOSTA

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante da extensa gama de possibilidades de dispositivos destinados ao processo da regulação da tensão nos termos sintetizados anteriormente e, em consonância com os objetivos desta tese, este capítulo encontra-se direcionado a sintetizar os mais distintos equipamentos já desenvolvidos no mundo e que se fundamentam no emprego de dispositivos eletromagnéticos, com características construtivas e princípios operacionais similares aos dos transformadores. Disso resulta que filosofias outras, a exemplo dos compensadores síncronos, reatores saturados, estratégias baseadas na eletrônica de potência, dentre outros, não são aqui reportados. De fato, maiores informações sobre esses dispositivos podem ser encontradas em [44].

Nesse contexto, os produtos aqui reportados apresentam-se na forma das soluções que utilizam o princípio da correção direta da tensão, baseadas em arranjos eletromagnéticos, como já dito, similares à constituição física dos transformadores.

Esses arranjos, principalmente os que empregam variações de tape a vazio, têm sido utilizados desde o início da engenharia elétrica e seu uso é classicamente conhecido como solução para a manutenção de tensões dentro dos patamares requeridos.

Não obstante o reconhecimento da assertiva acima, a busca por soluções que se apresentam na forma de novas concepções ou adequações de dispositivos já existentes mostra-se continuamente como desafios merecedores da atenção dos pesquisadores. Como já esclarecido, é, pois, nesse cenário que se insere esta tese, a qual tem por foco, a partir de fundamentos já estabelecidos [28], propor uma estratégia construtiva e de controle de um regulador de tensão destinado a prover meios para a regularização dos padrões dos suprimentos elétricos à legislação vigente.

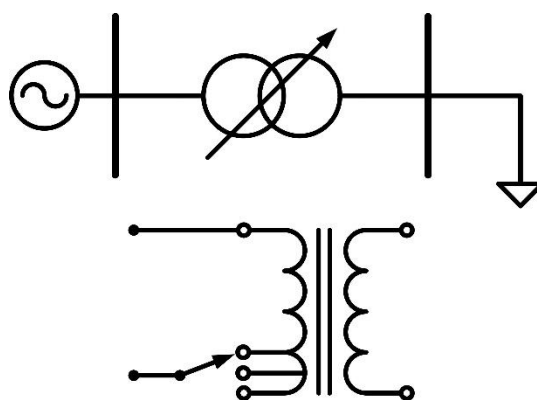
Para tanto, o capítulo tece, num primeiro momento, considerações sobre os arranjos eletromagnéticos tradicionais, encontrados na literatura ou comercialmente disponíveis no mercado nacional e internacional, os quais têm sido utilizados nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. Por fim, o trabalho contempla o dispositivo focado nesta tese.

2.2 - REGULADORES ELETROMAGNÉTICOS COMERCIAIS

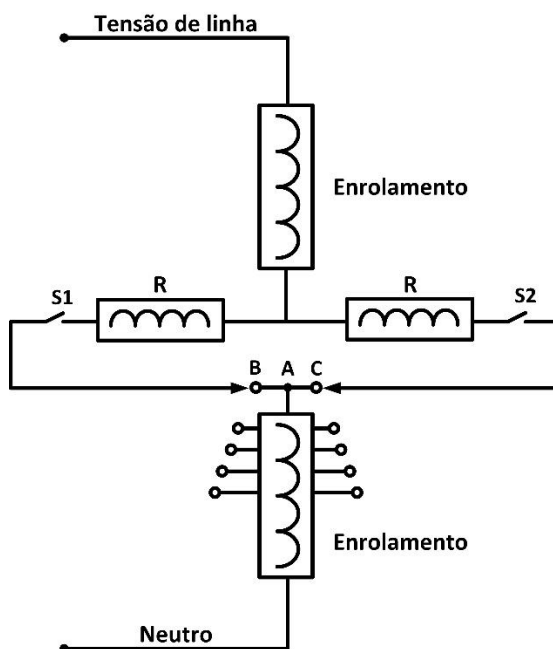
Tendo por meta considerar tão apenas os dispositivos enquadrados dentro da filosofia eletromagnética, em que pese sua correspondência com arranjos similares aos transformadores, reconhece-se, há tempos, os clássicos reguladores de tensão, fixos ou automáticos, que podem ser comutados sob carga ou não. Esses, como sabido, destinam-se a estabilizar os níveis de tensão nas barras de suprimento em consonância com a legislação vigente.

Tratando de uma forma mais genérica as filosofias desses produtos, uma das mais tradicionais soluções pode ser compreendida através da ilustração contida na Figura 2.1(a), a qual mostra, de forma esquemática, um transformador

com mudança de tapes destinado à operação a vazio. Complementarmente, a Figura 2.1(b) corresponde a um transformador com mudança de tapes sob carga [12].



(a) operação a vazio



(b) operação sob carga

Figura 2.1 - Concepção de reguladores à base de comutação de tapes [12]

Como pode ser constatado, os arranjos enquadrados dentro do conceito da comutação de tapes a vazio apresentam-se consonantes com princípios básicos e utilizados tradicionalmente nesse campo de conhecimento. Portanto, pouco há a se acrescentar aos conhecimentos já amplamente difundidos no meio da engenharia elétrica.

Todavia, aqueles destinados ao processo de regulação com comutação de tapes sob carga mostram-se com particularidades tais a oferecer mecanismos para que o processo ocorra sem interrupção da corrente de carga. Para atender a esse quesito, os tapes de comutação encontram-se na posição correspondente à máxima tensão disponibilizada pelo transformador, e sua respectiva corrente de carga é dividida igualmente entre as duas metades da bobina R, resultando, assim, num fluxo zero e, conseqüentemente, numa impedância mínima para a bobina R. O procedimento de mudança de tapes, para diminuição do valor eficaz da tensão, ocorre com a abertura da chave S1, o que implica em dizer que a corrente de carga passa, agora, somente pela outra metade do reator R. O contato B então se move para o tape mais abaixo e, em seguida, S1 é novamente fechada. Como consequência dessa ação, existe uma corrente circulante na bobina R imposta pela corrente de carga e, para que isto não ocorra, a chave S2 abre e o contato C move para o tape mais abaixo. Novamente, a chave S2 é fechada e, assim, restaura-se um fluxo nulo na bobina R. Com isso, pode-se concluir que, para alteração do tape do regulador sob carga, há necessidade de se cumprir 6 etapas até que a restauração da tensão seja obtida. Isso se constitui numa das grandes restrições do produto quanto ao tempo de resposta e efeitos sobre desgastes de peças e componentes [12]. Quanto ao primeiro aspecto, não é demais lembrar que as alterações dos tapes ocorrem de maneira mecânica, fato este que conduz, em consonância com relatos encontrados na literatura, a cerca de 5 ou 10 s até a conclusão da manobra.

Enquadrados, pois, dentro dos princípios aqui postos, pode-se, na atualidade, identificar os produtos relacionados na sequência, os quais representam a maioria dos reguladores em uso no Brasil.

- **REGULADOR TOSHIBA TB-R1000** [21] E [22]

O regulador de tensão da Toshiba, denominado por TB-R1000, corresponde a um dispositivo cuja estrutura básica é composta por unidades eletromagnéticas de potência e um sistema de controle equipado com um processador para leitura da tensão e controle de tapes.

Para fins de regulação dinâmica da tensão, o equipamento disponibiliza, tipicamente, 8 tapes de variação de 2,85%, sendo um deles o central. Como esse produto é equipado com uma chave para inversão de polaridade, sua estrutura permite a compensação de variações de tensão de regime permanente de até 0,2 pu, ou seja, afundamento de até 0,8 pu de tensão residual e elevações de até 1,2 pu de tensão residual. Vale aqui destacar que a terminologia empregada “afundamento” e “elevação” referem-se a fenômenos associados com “reduções” e “acréscimos” de tensão e se apresentam concordantes com o constante na Tabela 9 do PRODIST – seção 8.1. Nestes termos, fica aqui posto que, estas designações serão empregadas ao longo do texto, quer para as situações envolvendo desvios da tensão de referência em intervalos inferiores a 3 minutos, ou mesmo, para durações superiores a este período de tempo. 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.

A Figura 2.2 apresenta uma fotografia da unidade comercial conhecida por regulador TB-R1000.



Figura 2.2 - Regulador de tensão Toshiba TB-R1000 [21] e [22]

- **COOPER VR-32 [24]**

O regulador de tensão do fabricante Cooper Power System corresponde a um produto produzido nos Estados Unidos e que se apresenta difuso no mercado nacional. A variação da regulação pode oferecer níveis de compensação de até 10%, acima ou abaixo da tensão de operação, em 32 tapes de 0,625%. O dispositivo encontra-se também equipado com um sistema de automação para o controle das tensões.

Na Figura 2.3 tem-se uma fotografia do mesmo.



Figura 2.3 - Regulador de tensão Cooper VR-32 [24]

- **ITB RAV-2 [25]**

Uma alternativa encontrada no mercado nacional corresponde ao regulador produzido pela empresa brasileira ITB Equipamentos Elétricos Ltda, o qual recebeu a denominação RAV-2. Esse se apresenta como um dispositivo automático para restauração da tensão de até 10%, acima ou abaixo da tensão de operação, constituído por tapes que totalizam 33 variações, em degraus de 0,625%. Além do tape central, pode-se ainda contar com 16 tapes acima da tensão de operação e 16 abaixo dessa. A Figura 2.4 abaixo ilustra o equipamento em pauta.

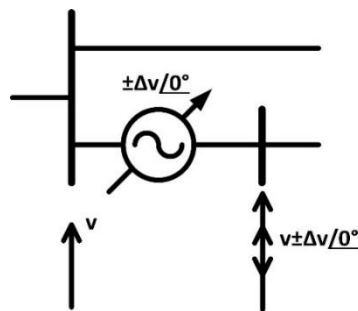


Figura 2.4 - Regulador de tensão ITB RAV-2 [25]

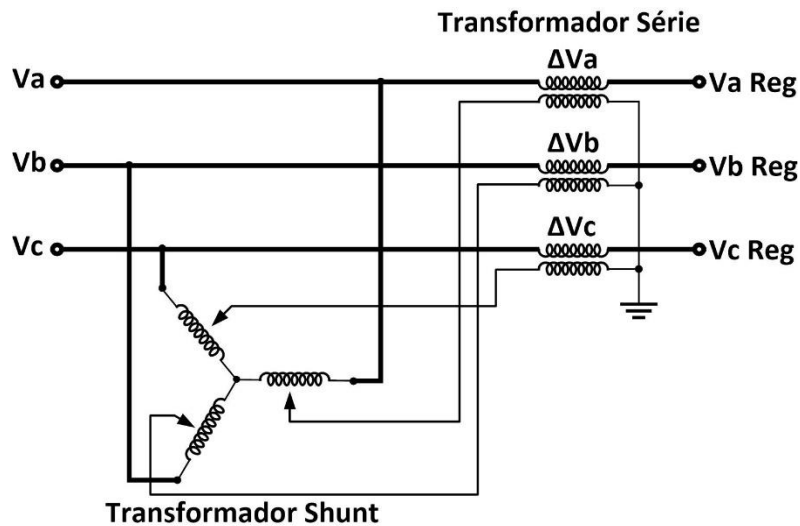
2.3 - REGULADORES ELETROMAGNÉTICOS ESPECIAIS

Os conceitos básicos relacionados com a regulação do módulo e ângulo das tensões, conforme requerido para muitas aplicações nas redes de transmissão, conduziram ao desenvolvimento de dispositivos com características especiais. Dentro desses princípios, a ideia central encontra-se alicerçada na busca da inserção de um incremento de tensão controlada, em magnitude e ângulo, em fase ou em quadratura com a tensão existente. Assim agindo, certamente seria obtida uma grandeza resultante capaz de promover efetivos controles dos fluxos de potência e correções das tensões. Esses arranjos são designados por “reguladores de magnitude e fase”, ou do inglês, “*phase-shift regulators*” [26], [27] e [28].

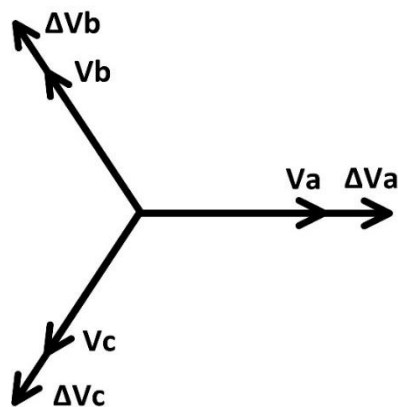
Do exposto segue que os dispositivos ora comentados visam, sobretudo, à inserção de uma tensão controlada $\pm\Delta V$ nos termos indicados pelas Figuras 2.5 (a), (b) e (c). Essas mostram, respectivamente, a inserção do equipamento na rede, o diagrama trifilar que identifica suas principais unidades de potência e, por fim, o diagrama fasorial expondo uma composição em fase da tensão de regulação ou incremento de tensão. Essa filosofia apresenta-se como a base motivadora dos trabalhos conduzidos nesta tese.



(a) Inserção na rede



(b) Diagrama trifilar

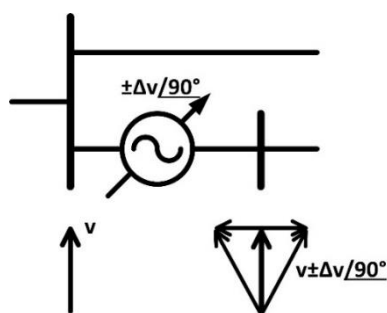


(c) Diagrama fasorial

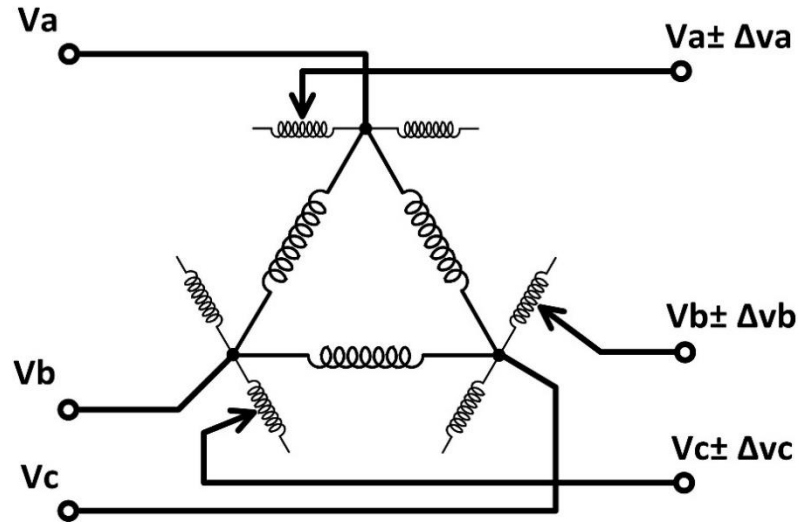
Figura 2.5 - Conceituação física de um regulador de magnitude de tensão [26]

O ajuste da tensão é oferecido pela alteração dos tapes do autotransformador, o qual usualmente é tratado como transformador regulador ou de excitação. A tensão extraída deste é inserida na outra unidade eletromagnética que introduz o incremento necessário à compensação requerida e a injeta no alimentador.

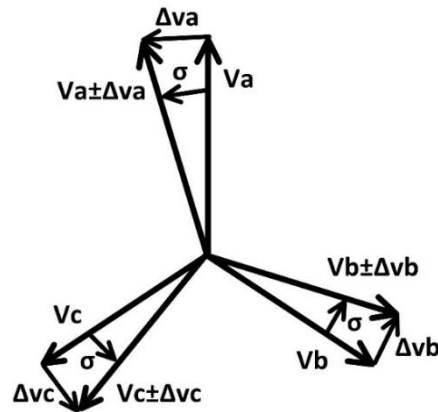
De modo similar, o arranjo indicado na Figura 2.6 pode ser empregado para o controle do ângulo de fase através da injeção de um incremento de tensão defasado de 90° da tensão de suprimento do alimentador. A mencionada figura indica, como anteriormente, a inserção do compensador junto ao alimentador, o diagrama trifilar apropriada e o diagrama fasorial correspondente. Naturalmente, ao se adicionar uma tensão em quadratura, conforme o ângulo de correção introduzido, é possível haver alterações significativas no valor da tensão resultante. Todavia, tal fato poderá ser contornado através de arranjos outros que não são aqui considerados.



(a) Inserção na rede



(b) Diagrama trifilar



(c) Diagrama fasorial

Figura 2.6 - Conceituação física de um regulador de ângulo de fase e magnitude de tensão [26]

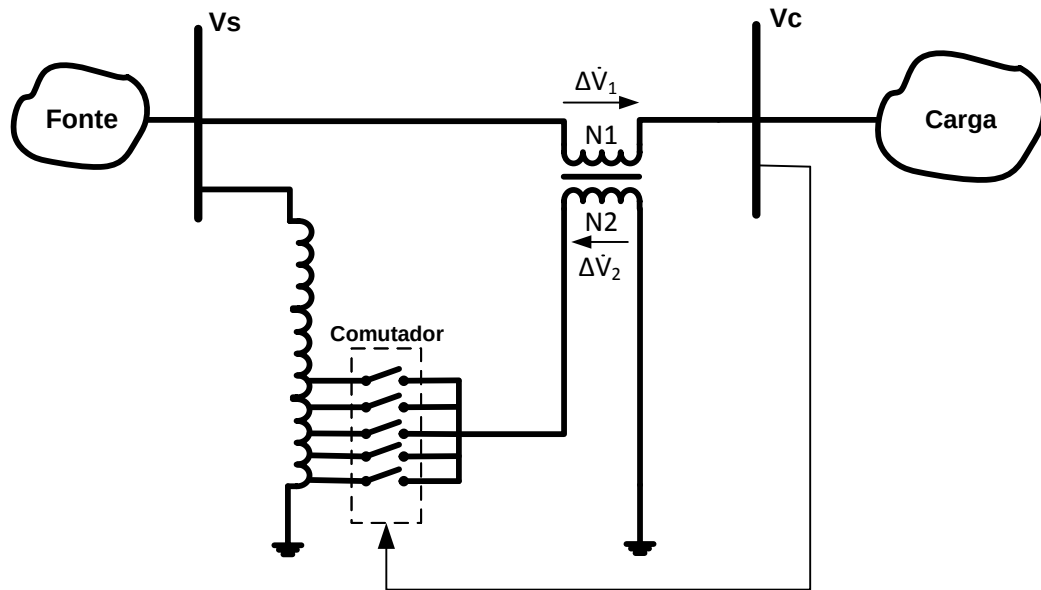
Além dos arranjos anteriormente destacados, de acordo com [27] e [28] outras configurações podem ser reconhecidas, todavia, como reportado nessas referências, essas se fundamentam em chaves eletrônicas (tiristores, IGBTs e GTOs). Por tal motivo, tais arranjos não são aqui discutidos.

2.4 - PROPOSTA DA TOPOLOGIA E ESTRUTURA FÍSICA DO REGULADOR

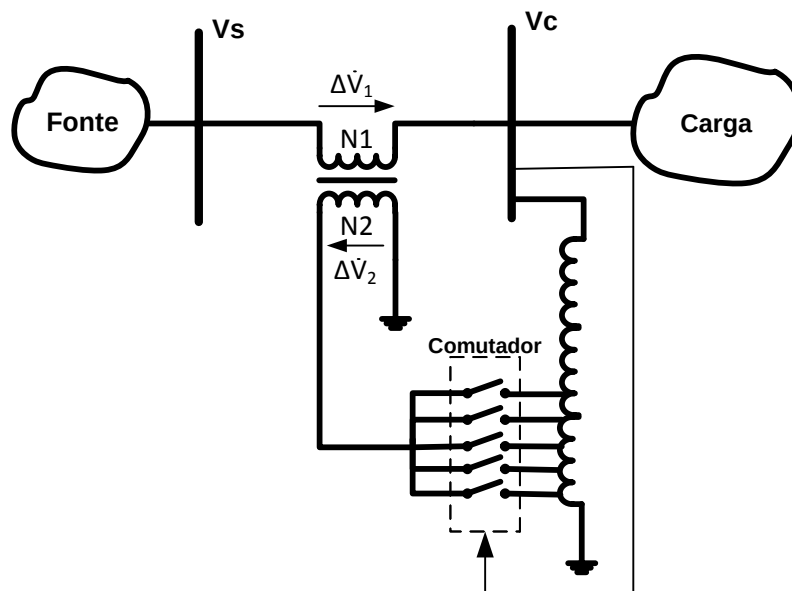
À luz do exposto, fica evidenciado que, muito embora se reconheça a existência de uma extensa gama de produtos disponíveis no mercado para os fins aqui almejados, o tema ainda tem motivado muitos pesquisadores para a busca de novas concepções.

Empregando arranjos físicos totalmente eletromagnéticos no que tange às suas partes de potência, surge a proposta contemplada nesta pesquisa, a qual foi designada por Regulador Eletromagnético de Tensão (RET). O arranjo, em sua essência, é formado por duas unidades eletromagnéticas: uma destinada à extração de energia da rede, materializada na forma de um autotransformador conectado em paralelo com o circuito; e uma segunda, sob a forma de um transformador em série com o alimentador principal, destinado à inserção de uma tensão compatível ao enquadramento do suprimento nos termos requeridos pela legislação.

Como indicado na Figura 2.7, de início surgiram duas possibilidades quanto à composição física do regulador. Uma primeira, designada por (a), apresenta-se constituída por um autotransformador instalado a montante do transformador série. Essa hipótese, no entanto, revela que o sinal de tensão nos terminais desta unidade não corresponde àquela efetivamente aplicada à carga, determinando, portanto, dificuldades diante das quedas de tensão na unidade série de regulação, as quais necessitariam ser corrigidas para se atingir a regulação almejada. Diante dessa conjuntura, optou-se pela utilização de uma segunda topologia, evidenciada pela Figura 2.7 (b), a qual revela que o autotransformador encontra-se a jusante do transformador série. Nessa nova configuração, o autotransformador fica conectado diretamente à barra focada no processo de regulação da tensão e, portanto, eventuais quedas de tensão no transformador série já seriam sistematicamente compensadas pelo dispositivo regulador.



(a) Autotransformador a montante da unidade série



(b) Autotransformador a jusante da unidade série

Figura 2.7 - Topologias físicas para o RET

De acordo com os principais componentes indicados, o dispositivo regulador em pauta apresenta-se consonante com os princípios postos quanto à busca de um dispositivo que congregue: características atrativas sob o ponto de vista da tecnologia empregada, custos de investimentos, dentre outros.

Diante desse cenário, o equipamento focado nesta pesquisa apresenta-se estruturalmente concebido nos termos indicados na Figura 2.8, a qual se destina tão apenas a ilustrar a concepção física do equipamento em pauta. No que se refere a suas propriedades operativas, estas serão gradualmente esclarecidas à medida que o assunto venha a ser detalhado através dos modelos, estudos de desempenho computacionais e experimentais, etc.

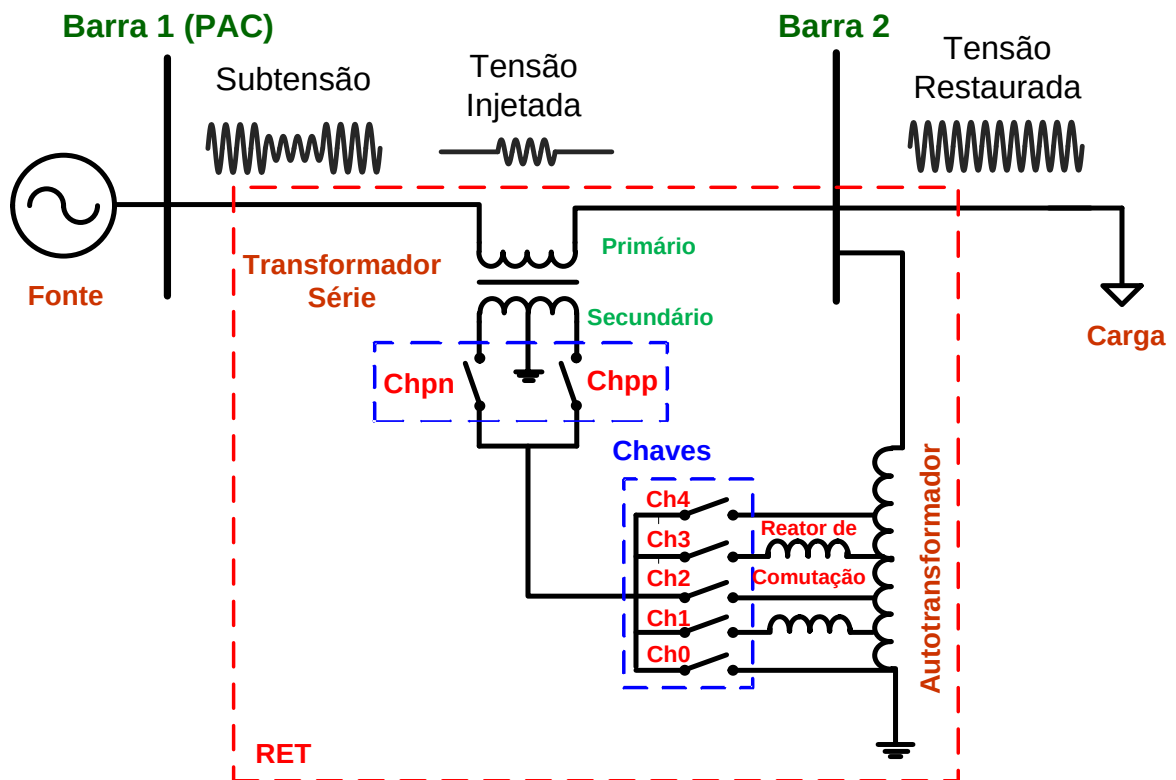


Figura 2.8 - Estrutura física do RET com mudança de taps discretos sob carga

Onde:

Chpn – Chave de compensação para reforço negativo;

Chpp – Chave de compensação para reforço positivo;

Ch0 a Ch4 – Chaves dos taps do autotransformador

Dentre as propriedades almejadas para o compensador em pauta, ressalta-se:

- Fundamentação operacional baseada em componentes eletromagnéticos, sem dispositivos complementares (fontes e chaves) eletrônicos;
- Estratégia de controle simples e efetiva;
- Equipamento factível com aplicações monofásicas ou trifásicas;
- 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 tensões 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.

De acordo com a topologia proposta, o arranjo possui uma composição física similar a alguns arranjos tradicionais de reguladores de tensão. Uma delas apresenta-se na forma da obtenção de tensões extraídas de conversores eletrônicos, a exemplo dos equipamentos DVR e outros. Outra filosofia similar está nos equipamentos genericamente conhecidos por “reguladores de magnitude e fase” ou “*phase-shift regulators*”. Não obstante esse reconhecimento, a concepção aqui idealizada possui suas particularidades tanto no que tange às unidades de potência e chaveamento, como também à lógica de controle discutida posteriormente.

Por fim, visando a uma maior compreensão a respeito dos objetivos traçados, têm-se simplificadamente, na Figura 2.9, a ação esperada para o

compensador em pauta. Pode-se observar que a polaridade do reforço de tensão, se positivo ou negativo, é determinada a partir da escolha entre as chaves Chpp ou Chpn, 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.

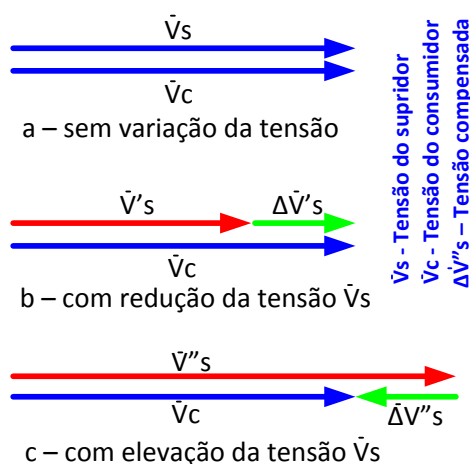


Figura 2.9 - Diagrama fasorial ilustrativo do desempenho do compensador para reduções e elevações de tensão

2.5 - ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO REGULADOR

No que se refere à estratégia do controle do RET, destinada à seleção do tape e respectiva polaridade da tensão de compensação, essa se encontra sintetizada no diagrama de blocos da Figura 2.10. Esse evidencia um módulo operativo definido por “A”, o qual se encontra vinculado com as etapas que compõem a leitura do valor eficaz da tensão a ser compensada, assim como determina o tape a ser acionado para a regulação da tensão final. Quanto ao módulo “B”, esse se destina ao processo decisório sobre o tape e polaridade apropriados à regularização da tensão.

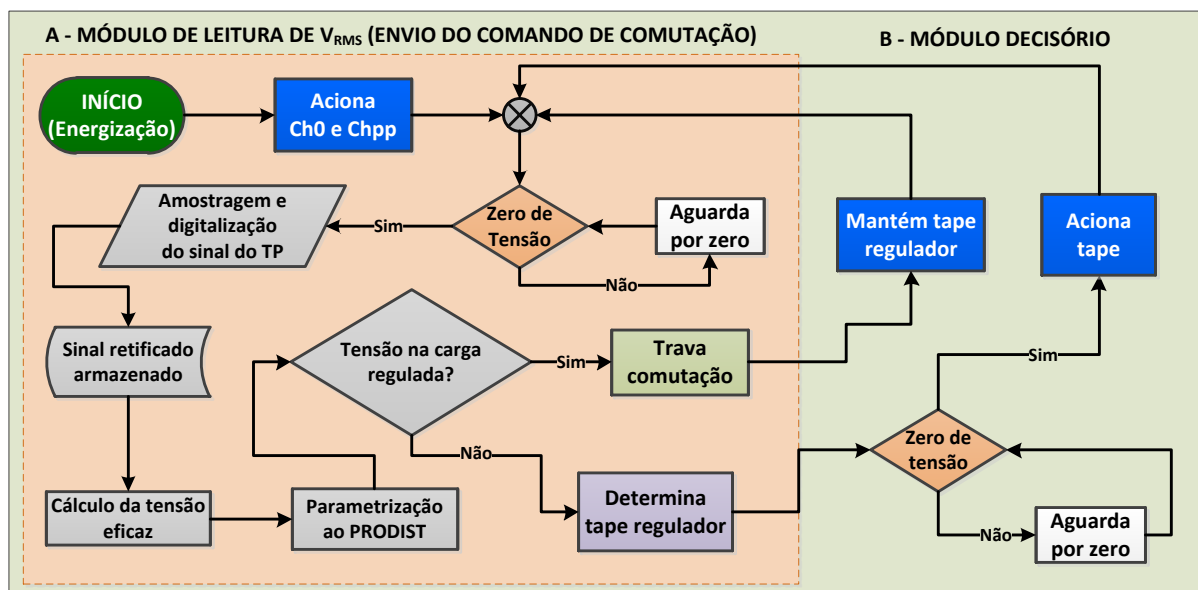


Figura 2.10 - Diagrama de blocos para o controle do compensador

Como ressaltado nas diversas etapas do processo de regulação da tensão, a lógica estabelecida para a definição do tape destinado à restauração dos padrões de suprimento, de forma resumida, são:

- Após a energização do regulador e respectivo controle, a chave de terra (Ch0) e a de polaridade positiva (Chpp) são acionadas durante um intervalo de tempo adequado às condições de inicialização do ambiente e da carga a ser controlada;
- Prosseguindo, o controle busca um zero de tensão para que o processo de digitalização possa ter início;
- O sinal de tensão inicia então sua digitalização para armazenamento na forma de um vetor;
- Finalizada a conversão, dá-se então início ao cálculo da tensão eficaz, e esse, por sua vez, é correlacionado com os padrões estabelecidos como aceitáveis pelo PRODIST;
- O *firmware* então avalia se o valor de tensão eficaz calculado enquadra-se dentro da faixa de regulação disponibilizado pelo equipamento visando a sua compatibilização com os requisitos da legislação;

- Através de mudanças sequenciais dos tapes, em degraus definidos pelo regulador, é feita 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 é repassada ao módulo decisório;
- 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 se encontra 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 carga e definida a necessidade de mudança de tapes para a regulação dessa grandeza, o tape é prontamente acionado, observando-se, todavia, que o *firmware* está dotado de recursos que promovem 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.

2.6 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO REGULADOR

Como para qualquer outro trabalho de modelagem de dispositivos e complexos elétricos, são duas as técnicas de representação utilizadas, uma que utiliza recursos atrelados com as técnicas no domínio do tempo, e outra, no domínio da frequência.

Para fins desta pesquisa, muito embora a ênfase maior seja no sentido de implementar o regulador no simulador ATP, fato este que proporcionará meios

para estudos de desempenho transitório, dinâmico e de regime permanente, objetivando uma visualização mais direta do tema, assim como também o estabelecimento de um equacionamento que ofereça uma pronta correlação entre o funcionamento da rede elétrica com a presença do RET, e ainda, meios para a parametrização e dimensionamento do regulador, optou-se, nesta fase, pela busca de uma representação através de circuitos equivalentes e respectiva modelagem matemática.

Em consonância com os objetivos supra postos ressalta-se que o modelo proposto deverá contemplar:

- A fonte de suprimento, a qual será tratada na forma de um circuito equivalente de Thévenin;
- As unidades físicas constituintes do regulador propriamente dito, com destaque as unidades eletromagnéticas constituídas pelo autotransformador e o transformador série;
- A carga suprida, na forma de impedância constante.

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, a saber: o RET atuando como elevador e, na sequência, como redutor de tensão.

Como previamente exposto, tais modos de funcionamento são ditados pela utilização das chaves de polaridade conectadas às extremidades dos enrolamentos secundários do transformador série, ilustrado na Figura 2.8. Esta permitiu constatar que, ao se utilizar a chave Chpp, a tensão inserida pelo primário do transformador série (ΔV_s) encontra-se em fase com a tensão do supridor, o que implica na elevação da tensão final à jusante do dispositivo. Em contrapartida, ao se utilizar a chave de polaridade negativa, Chpn, tem-se a inserção de uma tensão

defasada em 180 graus da tensão do supridor, caracterizando um reforço negativo por parte do regulador e, conseqüentemente, uma diminuição da tensão final.

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

Modo 1: RET atuando como elevador de tensão

Como pode ser observado no circuito da Figura 2.11, o transformador série é representado, de forma simplificada, apenas com dois de seus três enrolamentos: o enrolamento primário, parte constituinte da malha principal; e parte do enrolamento secundário, destinada à conexão da chave de polaridade positiva (Chpp).

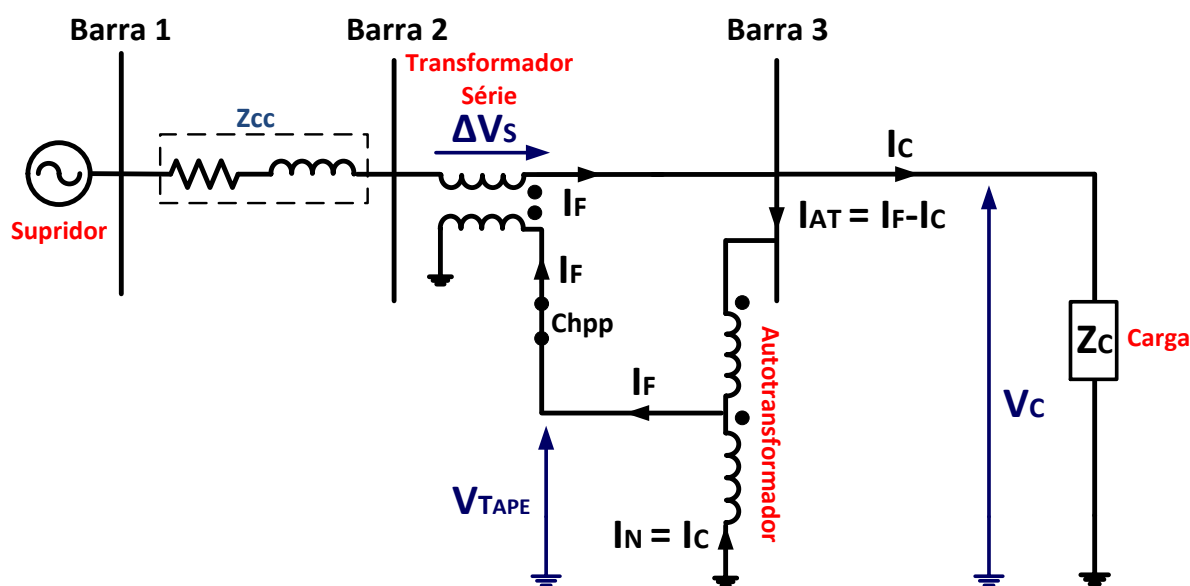


Figura 2.11 – Sistema elétrico equivalente atuando como elevador de tensão e constituído por: supridor, alimentador, regulador e cargas

Em consonância com a composição física apresentada na figura anterior é possível obter o circuito equivalente indicado na Figura 2.12. Esta evidencia as

principais unidades constituintes do complexo elétrico na forma de 2 (duas) malhas, como mostrado.

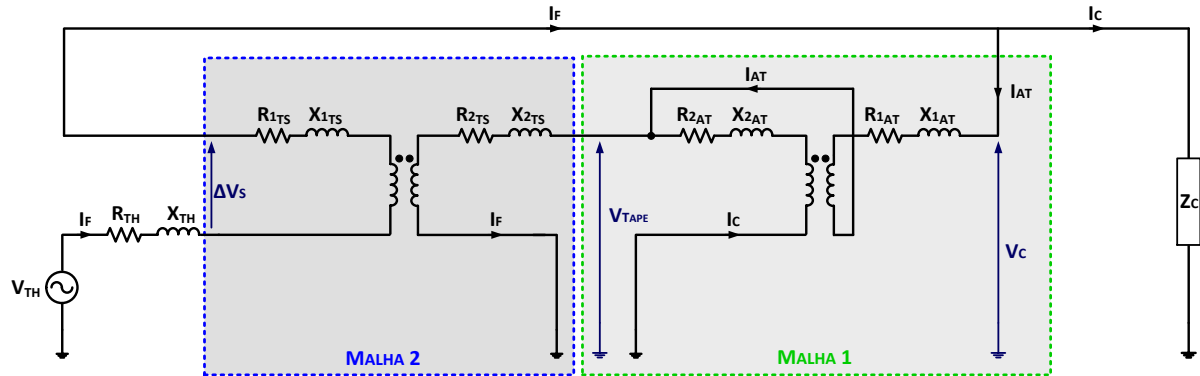


Figura 2.12 – Circuito elétrico equivalente do RET para reforço positivo

Como indicado, cada transformador é representado pelo seu circuito elétrico equivalente simplificado, com suas impedâncias divididas entre os enrolamentos primário e secundário. Nesta etapa os ramos de magnetização para ambas as unidades transformadoras são desconsiderados, ou seja, as correntes de magnetização são assumidas nulas.

Nestas condições, a representação aqui empregada, cujos detalhes podem ser encontrados em [45], compreende o emprego das seguintes variáveis:

- $\Delta \dot{V}_s$ Tensão de compensada;
- $\dot{Z}_{CC}$ Impedância do sistema;
- $\dot{V}_{th}$ Tensão equivalente de Thévenin;
- $\dot{V}_c$ Tensão na carga;
- R_{th} Resistência de Thévenin equivalente do alimentador;
- X_{th} Reatância de Thévenin equivalente do alimentador;
- $\dot{V}_{Tape}$ Tensão no tape do autotransformador;
- $\dot{I}_C$ Corrente da carga (consumidor);
- $\dot{Z}_C$ Impedância da carga;
- $\dot{I}_F$ Corrente fornecida pelo supridor;
- $\dot{I}_{AT}$ Corrente no primário do autotransformador;
- $\dot{I}_N$ Corrente no neutro do autotransformador;
- $\dot{I}_{TS}$ Corrente no secundário do transformador série;

- $\dot{V}_{TS}$ Tensão no secundário do transformador série;
- $\dot{Z}_{1TS}$ Impedância do enrolamento primário do transformador série;
- $\dot{Z}_{2TS}$ Impedância do enrolamento secundário do transformador série;
- $\dot{R}_{1TS}$ Resistência do enrolamento primário do transformador série;
- $\dot{X}_{1TS}$ Reatância de dispersão do enrolamento primário do transformador série;
- $\dot{R}_{2TS}$ Resistência do enrolamento secundário do transformador série;
- $\dot{X}_{2TS}$ Reatância de dispersão do enrolamento secundário do transformador série;
- $\dot{I}_{AT}$ Corrente no secundário do autotransformador;
- $\dot{V}_{AT}$ Tensão no secundário do autotransformador;
- $\dot{Z}_{1AT}$ Impedância do enrolamento primário do autotransformador;
- $\dot{Z}_{2AT}$ Impedância do enrolamento secundário do autotransformador;
- $\dot{R}_{1AT}$ Resistência do enrolamento primário do autotransformador;
- $\dot{X}_{1AT}$ Reatância de dispersão do enrolamento primário do autotransformador;
- $\dot{R}_{2AT}$ Resistência do enrolamento secundário do autotransformador;
- $\dot{X}_{2AT}$ Reatância de dispersão do enrolamento secundário do autotransformador;
- a_{AT} Relação de transformação do autotransformado;
- $\dot{Z}_{Reator}$ Impedância do reator de comutação;

Portanto, o circuito equivalente constante da Figura 2.12 permite escrever:

- A tensão (V_{Tape}) na saída da malha 1 pode ser expressa por:

$$\dot{V}_{Tape} = \dot{V}'_C - \dot{I}'_{AT} \cdot \dot{Z}_{1AT}' - \dot{I}_C \cdot \dot{Z}_{2AT} \quad (1)$$

Considerando-se que as impedâncias dos enrolamentos primário e secundário sejam idênticas:

$$\dot{V}_{Tape} = \frac{\dot{Z}_C \dot{I}_C}{(a_{AT} + 1)} - 2 \cdot \dot{I}_C \cdot \dot{Z}_{2AT} \quad (2)$$

- A partir da grandeza acima e observando-se a composição da malha 2, tem-se que:

$$\dot{\Delta V}_S = \dot{V}'_{Tape} - \dot{I}'_F \cdot \dot{Z}'_{2TS} - \dot{I}_F \cdot \dot{Z}_{1TS} \quad (3)$$

- Tendo em vista que a queda de tensão $\dot{\Delta V}_S$ a ser compensada constitui-se numa informação já conhecida, está se apresenta como a grandeza majoritária para a definição do tape a ser empregado. Portanto:

$$\dot{V}_{Tape} = \dot{\Delta V}_S + 2 \cdot \dot{I}_C \left(\frac{a_{AT} + 1}{a_{AT}} \right) \dot{Z}_{1TS} \quad (4)$$

Caso o arranjo utilize um reator de comutação para a atenuação dos fenômenos de transferência das chaves, este pode ser inserido como a seguir:

$$\dot{V}_{Tape} = \dot{\Delta V}_S + 2 \cdot \dot{I}_C \left(\frac{a_{AT} + 1}{a_{AT}} \right) \dot{Z}_{1TS} + \dot{I}_C \left(\frac{a_{AT} + 1}{a_{AT}} \right) \dot{Z}_{Reator} \quad (5)$$

- A partir das grandezas acima conclui-se que a potência requerida do autotransformador é:

$$S_{AT} = I_{AT_S} \cdot V_{AT_S} = I_C \cdot V_{Tape} \quad (6)$$

- Quanto a potência do transformador série:

$$S_{TS} = I_{TS_S} \cdot V_{TS_S} = I_F \cdot V_{Tape} \quad (7)$$

Ou:

$$S_{TS} = \frac{I_C (a_{AT} + 1)}{a_{AT}} V_{Tape} \quad (8)$$

Visando esclarecer a aplicação da metodologia acima posta, esta é aplicada, a seguir, para uma situação particular. Essa compreende o dimensionamento do regulador para a compensação de uma queda de tensão de 10% de um alimentador de tensão nominal do sistema de 127 V, suprimindo uma carga de 1480 VA com fator de potência de 0,94 indutivo. O valor da impedância do transformador série de $0,2541\Omega$ com ângulo de $86,75^\circ$.

Para este exemplo numérico tem-se que:

- ✓ A tensão que o regulador deverá compensar é:

$$\dot{\Delta V}_S = 127,0,1 = 12,7 \angle 0^\circ V$$

- ✓ A corrente da carga nominal é:

$$\dot{I}_C = \frac{1480}{127} = 11,65 \angle -19,95^\circ \text{ A}$$

- ✓ A relação de transformação do autotransformador é pois:

$$\alpha_{AT} = \frac{V_C}{V_{Tape}} = \frac{127}{12,7} = 10$$

- ✓ A tensão do tape do autotransformador requerida é:

$$\dot{V}_{Tape} = 12,7 \angle 0^\circ + 2 \cdot 11,65 \angle -19,95^\circ \left(\frac{10+1}{10} \right) = 0,2541 \angle 86,75^\circ$$

$$\dot{V}_{Tape} = 16,4 \angle 21,4^\circ \text{ V}$$

- ✓ As potências do autotransformador e da unidade série são:

$$S_{AT} = 11,65 \cdot 16,4 = 191,06 \text{ VA}$$

$$S_{TS} = 11,65 \frac{(10+1)}{10} 16,4 = 210,16 \text{ VA}$$

Portanto, o enrolamento do autotransformador é de 13% da potência total da carga, para a regulação de 10% da tensão, enquanto que o transformador série é de 14% desta mesma grandeza. A potência maior no transformador série se justifica, pela presença da corrente solicitada pelo autotransformador, em serie com o enrolamento primário.

- ✓ Por fim, a Figura 2.13 evidencia que, para o caso em pauta, redução da tensão para o valor de 114,3 V foi adequadamente ajustada através do RET aqui selecionado.

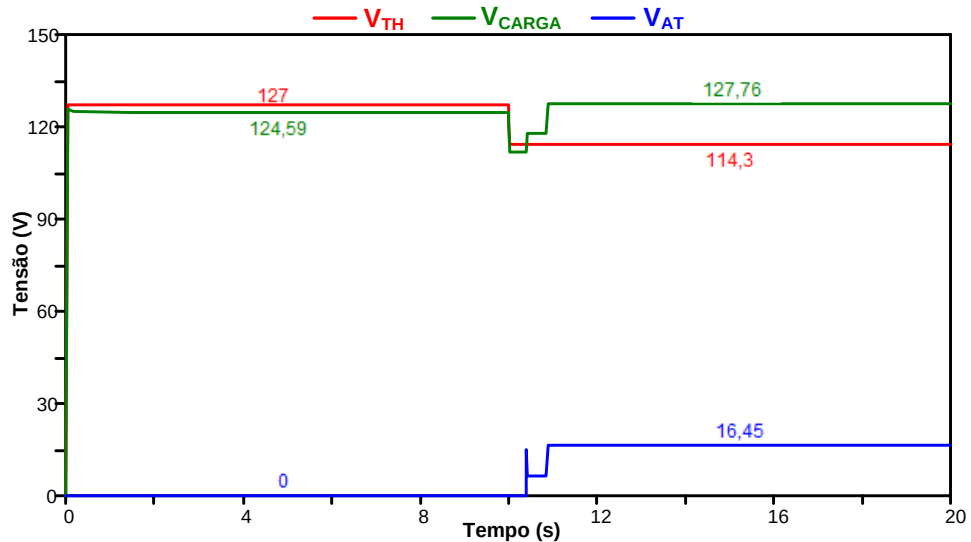


Figura 2.13 – Tensões no supridor, carga e no secundário do autotransformador

Modo 2: RET atuando como redutor de tensão

A presente sessão contempla a operação do regulador série atuando como redutor de tensão, ou seja, desta feita o dispositivo deverá atuar no sentido de compensar um aumento da tensão de suprimento através da injeção de um reforço negativo para a mitigação do ocorrido.

Mais uma vez, como ilustrado na Figura 2.14, pode-se identificar o transformador série com apenas dois de seus enrolamentos: o primário, conectado à malha principal; e o secundário, conectado à chave de polaridade negativa (Chpn).

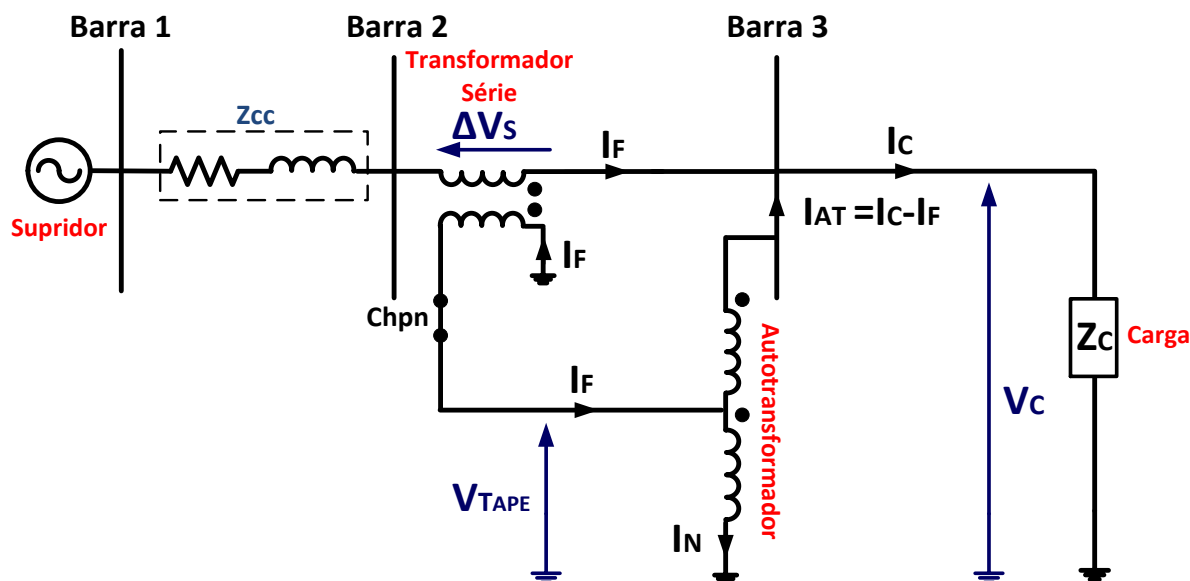


Figura 2.14 – Sistema elétrico equivalente atuando como redutor de tensão e constituído por: supridor, alimentador, regulador e cargas

De acordo com a composição física apresentada na figura anterior pode-se obter o circuito equivalente indicado na Figura 2.15. Esta, novamente, evidencia as principais unidades constituintes do complexo elétrico na forma de 2 (duas) malhas.

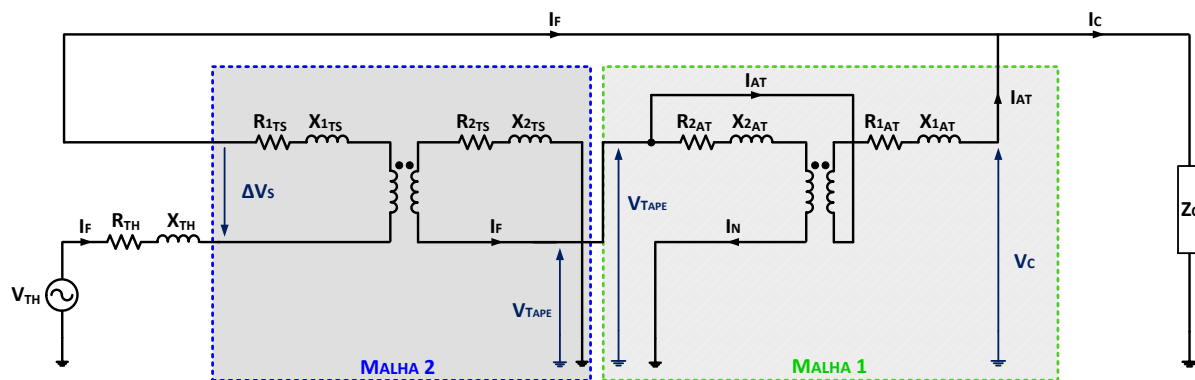


Figura 2.15 – Circuito elétrico equivalente do RET para reforço negativo

Utilizando a mesma estratégia anterior, cada transformador é representado pelo seu circuito elétrico equivalente simplificado, com suas impedâncias divididas entre os enrolamentos primário e secundário. Como já mencionado, também nesta etapa os ramos de magnetização para ambas as unidades

transformadoras são desconsiderados, ou seja, as correntes de magnetização são assumidas nulas.

Em consonância com o circuito equivalente constante da Figura 2.15 e sem a preocupação de se redefinir os parâmetros já utilizados na formulação anterior, tem-se que:

- A tensão (V_{Tape}) na saída da malha 1 pode ser expressa por:

$$\dot{V}_{Tape} = \dot{I}_N \cdot \dot{Z}_{2AT} + \dot{I}'_{AT} \cdot \dot{Z}'_{1AT} + \dot{V}'_C \quad (9)$$

Sendo as impedâncias dos enrolamentos primário e secundário idênticas:

$$\dot{V}_{Tape} = 2 \cdot \dot{I}_C \left(\frac{a_{AT}}{a_{AT} + 2} \right) \dot{Z}_{2AT} + \frac{\dot{Z}_C \dot{I}_C}{(a_{AT} + 1)} \quad (10)$$

- Com base na formulação acima e a composição da malha 2, tem-se que:

$$\Delta \dot{V}_S = \dot{V}'_{Tape} + \dot{I}'_F \cdot \dot{Z}'_{2TS} + \dot{I}_F \cdot \dot{Z}_{1TS} \quad (11)$$

- Sendo a queda de tensão $\Delta \dot{V}_S$ uma grandeza conhecida, da expressão acima segue que:

$$\dot{V}_{Tape} = \Delta \dot{V}_S - 2 \cdot \dot{I}_C \left(\frac{a_{AT} + 1}{a_{AT} + 2} \right) \dot{Z}_{1TS} \quad (12)$$

Caso seja empregado um reator de comutação para o processo de transferência das chaves, este pode ser inserido como a seguir:

$$\dot{V}_{Tape} = \Delta \dot{V}_S - 2 \cdot \dot{I}_C \left(\frac{a_{AT} + 1}{a_{AT} + 2} \right) \dot{Z}_{1TS} - \dot{I}_C \left(\frac{a_{AT} + 1}{a_{AT} + 2} \right) \dot{Z}_{Reator} \quad (13)$$

- Por fim, a potência requerida do autotransformador é:

$$S_{AT} = I_{AT_S} \cdot V_{AT_S} = I_N \cdot V_{Tape} \quad (14)$$

Ou:

$$S_{AT} = I_C \left(\frac{a_{AT}}{a_{AT} + 2} \right) \cdot V_{Tape} \quad (15)$$

- E a potência do transformador série:

$$S_{TS} = I_{TS_S} \cdot V_{TS_S} = I_F \cdot V_{Tape} \quad (16)$$

Ou:

$$S_{TS} = I_C \left(\frac{a_{AT} + 1}{a_{AT} + 2} \right) V_{Tape} \quad (17)$$

Tomando novamente o exemplo numérico empregado para fins da ilustração da metodologia quando da redução de tensão, considerando, desta feita, o dimensionamento do regulador para a compensação de uma elevação de tensão de 10% tem-se que:

- ✓ A tensão que o regulador deverá compensar é:

$$\dot{\Delta V}_s = 127,11 = 139,7 \angle 0^\circ V$$

- ✓ A corrente da carga nominal é:

$$\dot{I}_C = \frac{1480}{127} = 11,65 \angle -19,95^\circ A$$

- ✓ A relação de transformação do autotransformador é pois:

$$\alpha_{AT} = \frac{V_C}{V_{Tape}} = \frac{127}{12,7} = 10$$

- ✓ A tensão do tape do autotransformador requerida é:

$$\dot{V}_{Tape} = 12,7 \angle 0^\circ - 211,65 \angle -19,95^\circ \left(\frac{10+1}{10+2} \right) = 0,2541 \angle 86,75^\circ$$

$$\dot{V}_{Tape} = 11,68 \angle -25,27^\circ V$$

- ✓ As potências do autotransformador e da unidade série são:

$$S_{AT} = 11,65 \cdot 11,68 = 136,07 VA$$

$$S_{TS} = 11,65 \left(\frac{10+1}{10+2} \right) 11,68 = 124,73 VA$$

Portanto, o enrolamento do autotransformador é de 9% da potência total da carga, para a regulação de 10% da tensão, enquanto que o transformador série é de 8% desta mesma grandeza. Comparando esses novos resultados de potência com aquelas obtidas na condição de reforço positivo, constata-se uma redução destas grandezas. De fato, para o autotransformado há uma diminuição de 4% e para o transformador série de 6%.

Vale ressaltar que a modelagem ora proposta contemplou a utilização de apenas um dos tapes do autotransformador, ou seja, apenas o de 10%. Naturalmente, ao se adicionar outras ramificações no secundário do autotransformador, a relação de transformação do mesmo (α_{AT}) será modificada, o que implicará na variação de (I_F , V_{Tape} , ΔV_S).

2.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo por foco que o Capítulo I teceu comentários sobre as mais distintas tecnologias utilizadas para fins da regulação de tensão nas redes elétricas, em que pese a presença dos dispositivos mais tradicionais até os mais atuais, respeitando-se seus fundamentos e princípios, assim como suas propriedades operacionais e econômicas, nesta unidade de tese as atenções foram centradas aos equipamentos embasados na tecnologia eletromagnética, sem qualquer recurso atrelado com a eletrônica de potência.

Dentro desta filosofia, foram descritos os principais produtos em franca utilização pelo setor elétrico e disponibilizados comercialmente no Brasil. Também, em consonância com proposições encontradas na literatura, foram tecidos comentários visando à abordagem de outras estratégias eletromagnéticas baseadas, de modo genérico, nos dispositivos reconhecidos como reguladores de ângulo de fase ou *phase-shifters*. Para esses últimos, não obstante as menções e citações bibliográficas, a ausência de maiores informações de caráter prático e aplicativo não permitiu contextualizar dispositivos comercialmente oferecidos a nível nacional ou internacional.

Por fim, em atenção aos objetivos postos no texto, com destaque a simplicidade construtiva e operacional, nacionalização, custos, etc., foi então feita uma proposta de arranjo físico e de controle de um regulador eletromagnético de tensão monofásico, o qual se apresenta com uma base de sustentação apoiada nos mencionados reguladores de ângulo de fase, sem, todavia, explorar tais

propriedades operativas. Isso se deu, sobremaneira, ao fato que apenas correções dos valores das tensões eficazes apresentaram-se como metas a serem atingidas, e não o controle de potências ativa ou reativa.

A concepção proposta apresentou-se constituída por duas unidades principais de potência e uma unidade de controle. No que tange às unidades eletromagnéticas, essas possuem grande similaridade com a estrutura física de transformadores convencionais. Quanto ao controle, esse se encontra idealizado de forma tal a cumprir os objetivos atrelados com a restauração das tensões de acordo com os princípios estabelecidos e em patamares discretos de tensão.

O dispositivo desenvolvido foi denominado por: RET – Regulador Eletromagnético de Tensão.

Como para qualquer outro dispositivo e objetivando uma visualização mais direta do tema, assim como também o estabelecimento de um equacionamento que ofereça uma pronta correlação entre o funcionamento da rede elétrica com a presença do RET, e ainda, meios para a parametrização e dimensionamento do regulador, foi então estabelecida uma representação através de circuitos equivalentes e respectiva modelagem matemática através de técnicas de representação no domínio da frequência. Neste particular e em atenção aos dois modos principais de atuação, quais sejam, para adequação dos efeitos associados com reduções e com elevações de tensão, estas duas situações particulares foram contempladas na estratégia apresentada.

2.8 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTE CAPÍTULO

As principais contribuições oferecidas por este capítulo são:

- Definição da estrutura física e das principais características operativas do regulador eletromagnético de tensão proposto;
- Estabelecimento da lógica de controle para a definição do tape destinado à restauração dos padrões de suprimento;

- Estabelecimento de uma modelagem matemática do complexo compreendendo o compensador e rede de conexão, empregando-se para tanto, técnicas de representação no domínio da frequência;
- Viabilização de meios para o dimensionamento básico dos componentes que perfazem o regulador, assim como também seus requisitos quanto ao controle.

CAPÍTULO III

MODELAGEM DO REGULADOR NO SIMULADOR ATP E ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez apresentadas a estrutura do regulador em foco nesta pesquisa, este capítulo encontra-se direcionado ao desenvolvimento de um programa computacional destinado a estudos avaliativos do desempenho do mesmo sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente. Para tanto, a opção feita recaiu sobre o simulador ATP, o qual se apresenta como uma plataforma de estudos de ampla difusão e aceitação no setor elétrico. Esse recurso, como sabido, utiliza técnicas de modelagem no domínio do tempo, fato esse determinante para o pleno atendimento aos objetivos supra delineados.

Diante do exposto, o conteúdo abordado no presente capítulo apresenta os seguintes pontos focais:

- Estabelecimento da estratégia para o processo de modelagem, a qual, em consonância com procedimentos tradicionais, tem por norte a utilização dos recursos já disponibilizados pelo software escolhido;
- Implementação dos modelos das partes componentes do regulador, em que pese as unidades de potência e de controle;

- Obtenção do modelo computacional completo do dispositivo RET devidamente inserido no programa ATP;
- Avaliação computacional inicial do desempenho do modelo e do equipamento.

3.2 - O SIMULADOR ATP

O *Alternative Transients Program* (ATP) consiste numa plataforma computacional destinada à modelagem e simulação de circuitos elétricos no domínio do tempo. Esse programa é amplamente conhecido e difundido no setor elétrico nacional e internacional, tendo em vista que o mesmo corresponde a um software de domínio livre. Como o próprio nome sugere, essa ferramenta permite a realização de estudos investigativos não apenas em regime permanente, mas apresenta também a potencialidade de permitir a reprodução, via simulação computacional, dos mais variados eventos transitórios e dinâmicos factíveis de manifestação nos sistemas elétricos [45].

Essa plataforma computacional apresenta ainda em sua biblioteca modelos elétricos correspondentes a uma série de dispositivos e componentes presentes nos sistemas elétricos, tais como: fontes de alimentação, chaves, linhas de transmissão, cabos, máquinas elétricas, cargas, transformadores, etc. Tais modelos encontram-se representados por parâmetros concentrados ou distribuídos, apresentando, ainda, possibilidades de inserção de eventuais não linearidades, dentre várias outras propriedades e recursos [45].

A representação de transformadores no programa ATP através de modelos elétricos equivalentes possibilita a reprodução dos mais variados tipos de equipamentos, desde os mais simples, até as configurações mais complexas para os mesmos, as quais são constituídas por unidades trifásicas do tipo núcleo envolvido ou envolvente, com dois ou mais enrolamentos por fase.

Focando uma exemplificação diretamente afeita aos interesses desta pesquisa, a Figura 3.1 apresenta o circuito elétrico equivalente de um transformador monofásico, não linear, de dois enrolamentos, também conhecido por “*Saturable Transformer*”. Esse recurso encontra-se disponibilizado na biblioteca do ATP [45].

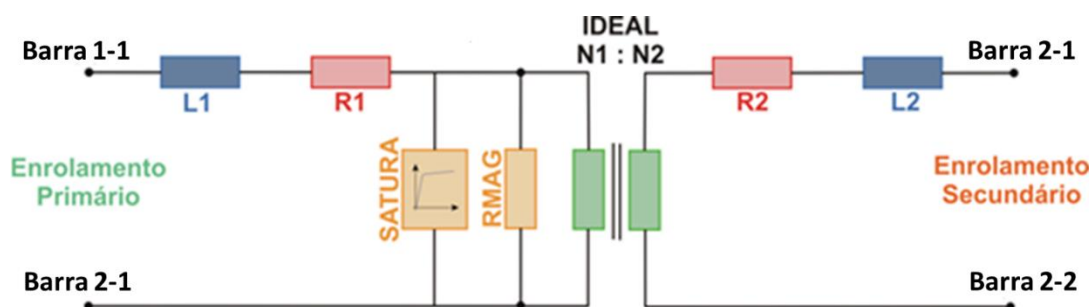


Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente de um transformador monofásico de dois enrolamentos – não linear – ATP

Conforme se pode observar, o modelo é composto basicamente por um transformador ideal de dois enrolamentos ($N1:N2$), sendo esse o responsável pela representação da relação de transformação entre os enrolamentos primário e secundário. Adicionado a isso, o mesmo ainda apresenta as impedâncias dos enrolamentos do equipamento, na forma de resistências e indutâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente ($R1$ e $L1$ – enrolamento primário) e ($R2$ e $L2$ – enrolamento secundário). Além disso, o circuito equivalente mostra um ramo responsável pela representação do efeito de saturação do transformador (SATURA), sendo esse conectado no circuito que representa o enrolamento primário. Por fim, as perdas associadas com o processo de magnetização, também conhecidas por perdas no núcleo, são representadas através de um elemento resistivo linear (RMAG). Esse último é conectado no circuito representativo do enrolamento primário, paralelamente ao ramo de saturação.

É, pois, dentro deste norte que foram desenvolvidas e implementadas as unidades magnéticas que perfazem o regulador contemplado nesta tese, como

poderá ser visto a seguir. Também, em vista da necessidade da inserção do controle do dispositivo, esse, em sintonia com procedimentos usuais, utiliza, diferentemente dos transformadores, recursos disponibilizados pela rotina MODELS, a qual é mais diretamente afeita à representação de funções de controle, modelos matemáticos de dispositivos, dentre outros.

3.3 - MODELAGEM DO RET NA PLATAFORMA ATP

Os trabalhos descritos nesta seção apresentam-se com o objetivo central de correlacionar o arranjo físico exposto no Capítulo II com os recursos existentes na plataforma ATP, visando, sobretudo, à modelagem do dispositivo, nos termos requeridos para a realização de estudos envolvendo a operação do mesmo sob, como já mencionado, situações de regime transitório, dinâmico e permanente.

Para tanto, a Figura 3.2 sintetiza o arranjo físico que compõe o complexo das unidades de potência, formada pelos transformadores em paralelo e em série, e também o sistema de controle. Também, visando oferecer uma ideia de conjunto, nessa figura o regulador encontra-se inserido num alimentador elétrico simplificado, constituído de uma fonte de tensão, linha e carga.

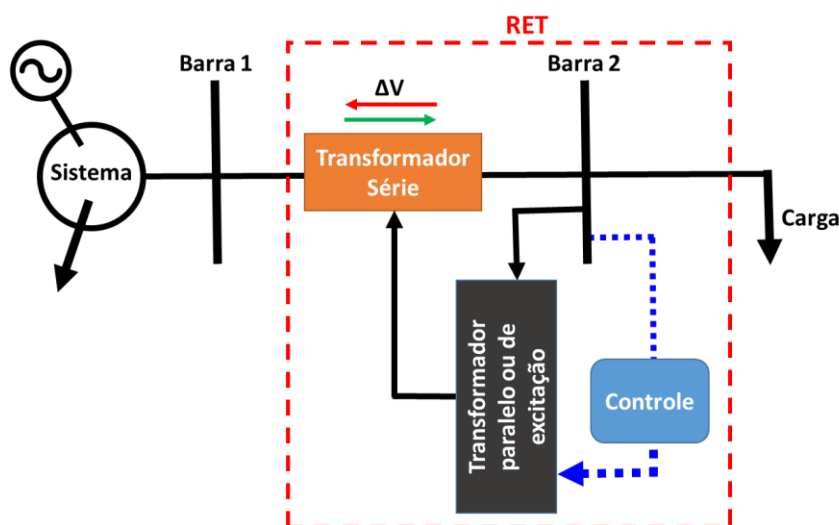
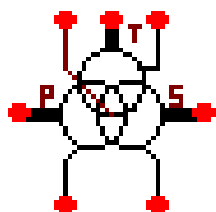


Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente do RET no sistema

De forma a tornar o texto mais didático, cada componente que perfaz o arranjo físico do RET é tratado separadamente, a seguir.

3.3.1 - Transformador Série

As Figuras 3.3 (a) e (b) ilustram os elementos representativos do transformador saturável existente no ATPDraw, enquanto a Figura 3.4 apresenta o respectivo arquivo “ATP-file”. Vale enfatizar que esses recursos encontram-se na biblioteca do simulador e são suficientemente flexíveis para a adequação a configurações diversas para o equipamento quanto ao arranjo eletromagnético, parametrização dos componentes, etc.



Component: SATTRAFO.SUP

Attributes | Characteristic

	Prim.	Sec.	Tert.
U [V]	24	0.4	1
R [ohm]	1	1	1
L [mH,ohm]	1	1	2

Coupling: Y Y Y
 Phase shift: 0 0
 I(0)= 0 Rm= 1000000 3-leg core
 F(0)= 0 RMS 3-winding

Order: 0 Label:
 Comment:
 Output: 0 - No
 Hide Lock

NODE	PHASE	NAME
P	ABC	XX0001
S	ABC	XX0002
Sat	ABC	XX0003
P-N	1	XX0004
S-N	1	XX0005
T	ABC	XX0006
T-N	1	XX0007

OK Cancel Help

(a) Transformador disponibilizado no ATP

(b) Variáveis de entrada

Figura 3.3 - Transformador saturável (Modelo: SatTrafo) – ATPDraw

```

Text Editor: Noname.atp
File Edit Character Help
BEGIN NEW DATA CASE
C
C -----
C Generated by ATPDRAW  abril, quinta-feira 25, 2013
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
C 1.E-6 .001
C 500 1 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER X0003A 1.E6 0
9999
1X0001AXX0004 1. 1. 24.
2X0002AXX0005 1. 1. .4
3X0006AXX0007 1. 2. 1.
TRANSFORMER X0003A X0003B
1X0001BXX0004
2X0002BXX0005
3X0006BXX0007
TRANSFORMER X0003A X0003C
1X0001CXX0004
2X0002CXX0005
3X0006CXX0007
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
1:1

```

Figura 3.4 - Arquivo ATP-file do transformador saturável

- Edição do arquivo ATP-file

O ATP oferece a possibilidade de se trabalhar com módulos de seções da rede elétrica, ou *templates*, permitindo, assim, a combinação entre elementos de valores fixos ou variáveis com argumentos. Nesse particular, vale lembrar que os valores correspondem a entidades numéricas, enquanto que os argumentos referem-se a nós elétricos. Essa ferramenta corresponde à rotina “DATA BASE MODULE”, mais conhecida por DBM, presente no referido programa.

A criação do modelo do transformador série com tape central foi, pois, embasada na edição do cartão do transformador trifásico de três enrolamentos ora apresentado e o resultado dessa etapa de desenvolvimentos encontra-se mostrado na Figura 3.5.

```

TSERIE.atp - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,PXXXXA,PNXXXX,SXXXXA,SNXXXX,TNXXXX,SATXXA
ARG,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,VPXXXX
ARG,RSXXXX,LSXXXX,VSXXXX,RTXXXX,LTXXXX,VTXXXX
NUM,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,VPXXXX
NUM,RSXXXX,LSXXXX,VSXXXX,RTXXXX,LTXXXX,VTXXXX
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
  TRANSFORMER      IOXXXXFOXXXXSATXXARMXXXX      0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\curva2.TXT
1PXXXXAPNXXXX      RPXXXXLPXXXXVPXXXX
2SXXXXASNXXXX      RSXXXXLSXXXXVSXXXX
3SNXXXXTNXXXX      RTXXXXLTXXXXVTXXXX
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH,TSERIE.lib
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
BLANK
BLANK
$EOF
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
|

```

Figura 3.5 - Arquivo DBM representativo do transformador série

De acordo com o modelo editado pode-se constatar que o mesmo possui argumentos enquadrados em duas categorias:

- ARG: que representam nomes de nós externos;
- NUM: que representam nomes de variáveis com valores numéricos.

A Figura 3.6 ilustra os nomes de argumentos de nós (ARG).

```

ARG,PXXXXA,PNXXXX,SXXXXA,SNXXXX,TNXXXX,SATXXA
ARG,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,VPXXXX
ARG,RSXXXX,LSXXXX,VSXXXX,RTXXXX,LTXXXX,VTXXXX

```

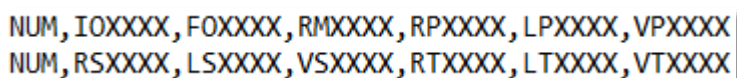
Figura 3.6 - Declaração de argumentos referentes a nomes de nós

No que tange à legenda dos respectivos nomes de argumentos de nós, esses são:

- PXXXXA: Entrada do enrolamento primário do transformador série (ponte de conexão com o alimentador);
- PNXXXX: Saída do enrolamento primário (ponto de conexão com a carga);
- SXXXXA: Entrada do enrolamento secundário (ponto de conexão do reforço negativo);
- SNXXXX: Saída dos enrolamentos secundário e terciário (terminal do tape central);
- TNXXXX: Entrada do enrolamento terciário do transformador (ponto de conexão do reforço positivo);
- SATXXA: Ponto de conexão do ramo magnetizante do modelo;
- I0XXXX e F0XXXX (corrente e fluxo): Pares de pontos usados para definir a indutância linear do ramo de magnetização no primário;
- RMXXXX (R_{mag}): Resistência linear e constante do ramo magnetizante;
- RPXXXX (R₁): Resistência do enrolamento primário;
- LPXXXX (L₁): Indutância de dispersão do enrolamento primário;
- VPXXXX (V_N): Tensão nominal do enrolamento primário;
- RSXXXX (R₂): Resistência do enrolamento secundário;
- LSXXXX (L₂): Indutância de dispersão do enrolamento secundário;
- VSXXXX (V_N): Tensão nominal do enrolamento secundário;
- RTXXXX (R₃): Resistência do enrolamento terciário;
- LTXXXX (L₃): Indutância de dispersão do enrolamento terciário;
- VTXXXX (V_N): Tensão nominal do enrolamento terciário;

Como visto, o modelo aqui proposto apresenta-se na forma de três enrolamentos em uma única coluna, onde o enrolamento primário é conectado em série com o alimentador principal enquanto o secundário e terciário são utilizados na conexão com o autotransformador.

Uma vez caracterizados os nomes dos argumentos do tipo (ARG), faz-se necessária a declaração dos mesmos em termos de valores numéricos. A Figura 3.7 apresenta os referidos argumentos tipo (NUM).



```
NUM, I0XXXX, F0XXXX, RMXXXX, RPXXXX, LPXXXX, VPXXXX  
NUM, RSXXXX, LSXXXX, VSXXXX, RTXXXX, LTXXXX, VTXXXX
```

Figura 3.7 - Declaração de argumentos relacionados a valores numéricos

Os nomes de argumentos de valores numéricos encontram-se identificados a seguir:

- I0XXXX e F0XXXX (corrente e fluxo): Pares de pontos usados para definir a indutância linear representativa do ramo de magnetização do enrolamento primário devem ser expressos na forma de valores de pico (corrente e fluxo) em [Ampère] e [Weber-volta];
- RMXXXX (R_{mag}): Valor da resistência de magnetização em [Ohm];
- RPXXXX (R₁): Resistência do enrolamento primário em [Ohm];
- LPXXXX (L₁): Indutância de dispersão do enrolamento primário em [mH] ou [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- VPXXXX (V_N): Tensão nominal do enrolamento primário em [V];
- RSXXXX (R₂): Resistência do enrolamento secundário em [Ohm];

- LSXXXX (L_2): Indutância de dispersão do enrolamento secundário em [mH] ou [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- VSXXXX (V_N): Tensão nominal do enrolamento secundário em [V];
- RTXXXX (R_3): Resistência do enrolamento terciário em [Ohm];
- LTXXXX (L_3): Indutância de dispersão do enrolamento terciário em [mH] ou [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- VTXXXX (V_N): Tensão nominal do enrolamento terciário em [V].

Após a declaração dos nomes de argumentos de nós (ARG) e dos valores numéricos (NUM), obtém-se o (*template*) ou modelo elétrico do transformador série do regulador proposto.

A Figura 3.8 apresenta a referida (*template*), onde pode ser observada a conexão elétrica entre o final da bobina do secundário como o início da bobina do terciário, representando assim o ponto de acoplamento do tape central.

```

TRANSFORMER          IOXXXXFOXXXXSATXXARMXXXX
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\curva2.TXT
1PXXXXAPNXXXX        RPXXXXLPXXXXVPXXXX
2SXXXXASNXXXX        RSXXXXLSXXXXVSXXXX
3SNXXXXTNXXXX        RTXXXXLTXXXXVTXXXX
    
```

Figura 3.8 - Template representativa dos enrolamentos do transformador série

• Cartão do transformador série

A obtenção do arquivo representativo do transformador série, ou seu cartão, consiste na execução do arquivo ATP recém-criado. Isso é feito através do “ATP Launcher”, cuja janela encontra-se ilustrada na Figura 3.9.

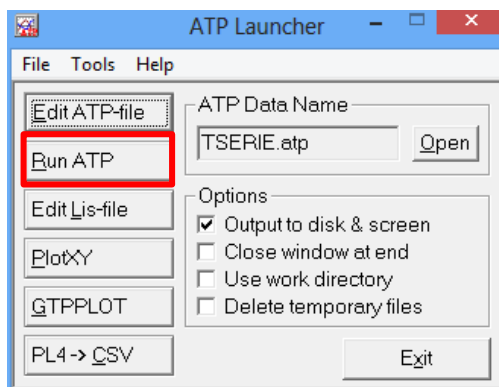


Figura 3.9 - Execução do ATP Launcher

O resultado obtido está indicado na Figura 3.10, na qual se pode constatar os meios utilizados para a inserção das informações próprias às características elétricas dos enrolamentos e da curva de saturação. A título de exemplificação, para a situação ilustrada, foram utilizados os dados associados a um transformador série de relação 1:1, com potência de 1,5 kVA e tensão nominal de 50V. Vale ressaltar que os pares de pontos de corrente e fluxos concatenados foram indexados ao modelo por meio do comando \$INCLUDE.

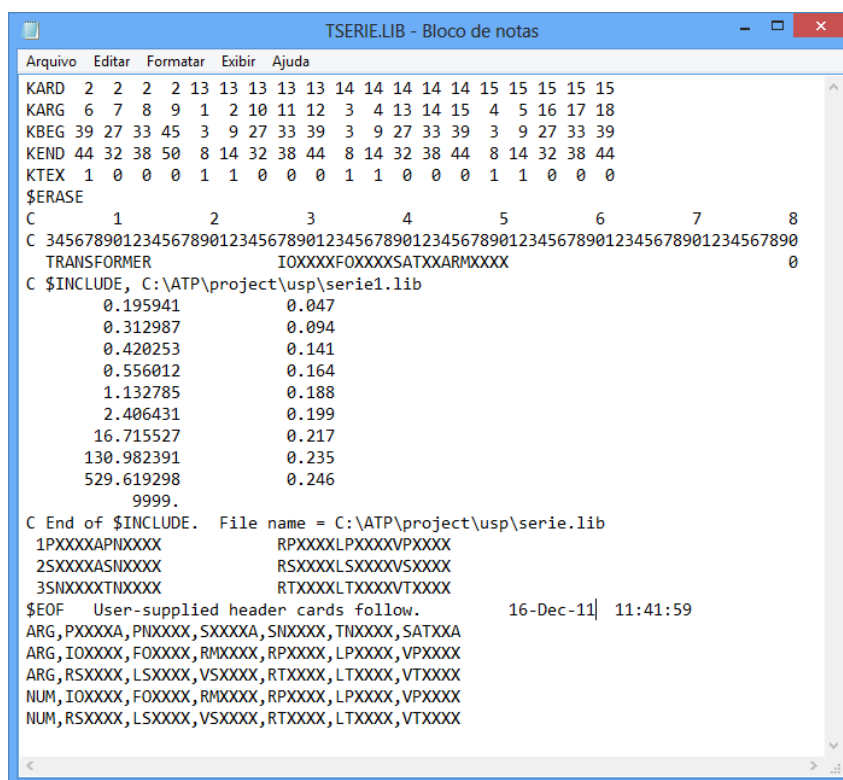


Figura 3.10 - Cartão (*.lib) do transformador série

Diante dos dados empregados, a Figura 3.11 indica a correlação ilustrativamente implementada para a relação fluxo *versus* corrente.

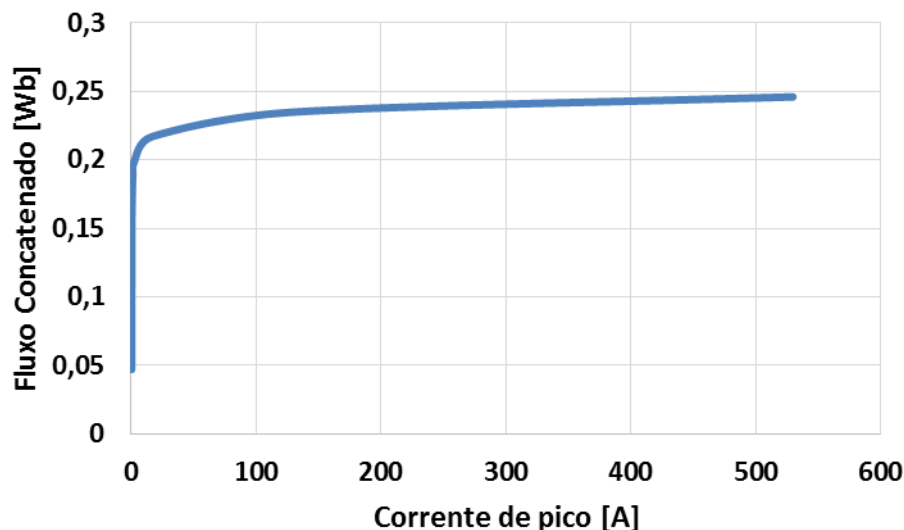
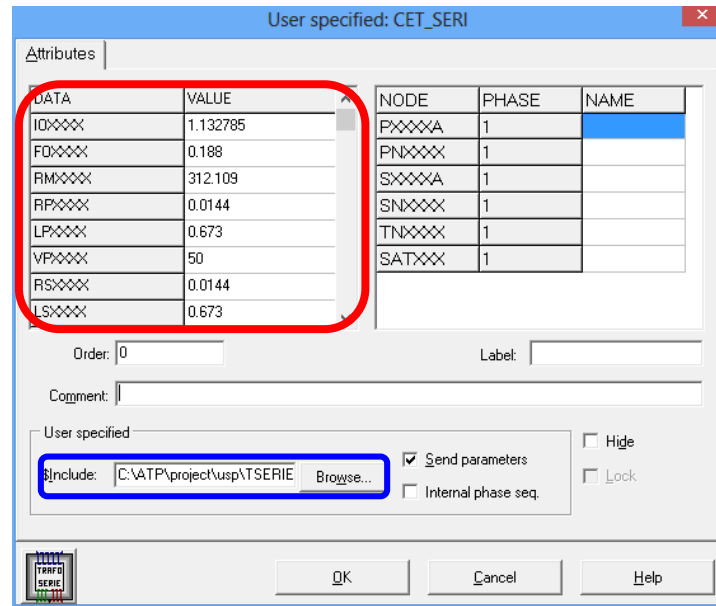
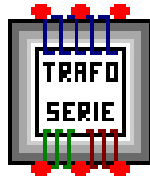


Figura 3.11 - Curva de saturação – Transformador série

- **Ícone do transformador série**

Para a utilização do transformador série na interface do ATPDraw, faz-se necessária a criação de um novo elemento (*.sup). Para tanto, o primeiro passo executado no programa ATPDraw foi a seleção da opção “new sup-file” localizada no seguinte caminho: *Objects* → *User Specified* → *New sup-file*.

As Figuras 3.12 (a) e (b) ilustram, respectivamente, o novo componente produzido e a janela para parametrização elétrica do mesmo. Na Figura 3.12 (b) destaca-se, em vermelho, os parâmetros elétricos numéricos a serem inseridos no modelo. No parâmetro \$INCLUDE, destacado em azul, deve-se inserir o arquivo (*.lib). Vale ressaltar que as informações elétricas para o modelo TSERIE.sup devem ser condizentes com os parâmetros físicos e elétricos utilizados no cálculo da curva de saturação, sendo essa última inserida no arquivo (*.lib) conforme explicitado anteriormente.



(a) Elemento criado

(b) Janela de parametrização elétrica do componente

Figura 3.12 - Novo elemento criado no ATPDraw – Tserie.sup

3.3.2 - Transformador Paralelo ou de Excitação

Em vista do fato que o transformador paralelo ou de excitação apresenta-se construtivamente na forma de um autotransformador, a diferença básica em relação aos desenvolvimentos anteriores é que, para esse componente, há um único enrolamento, como mostra a Figura 3.13.

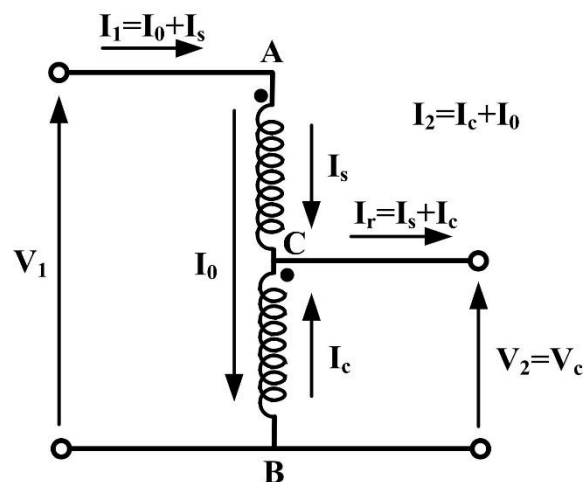


Figura 3.13 - Autotransformador [46]

Onde:

A a C – enrolamento série;

C a B – enrolamento comum;

V₁ e **V₂** – são as tensão do primário e do secundário respectivamente;

V_c – representa a tensão na carga;

I₁ – corrente do enrolamento primário;

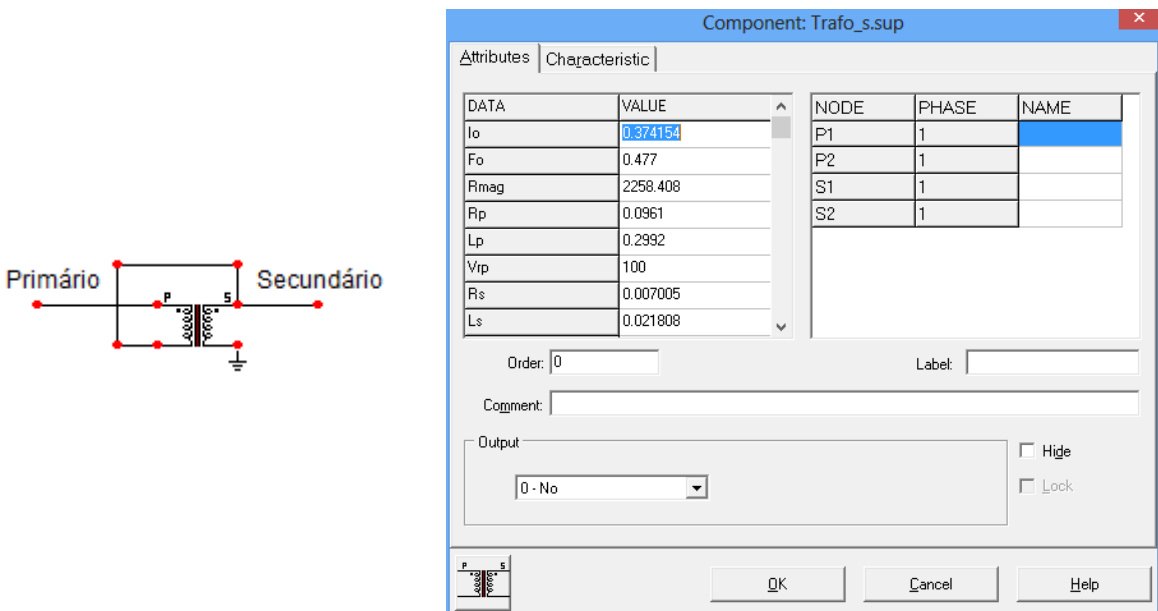
I₂ – corrente resultante unicamente no enrolamento comum;

I₀ – representa a corrente de magnetização;

I_c – componente da corrente resultante **I₂** no enrolamento comum;

I_r – representa a corrente secundária no circuito da carga.

À luz do exposto, segue que a utilização de um modelo pré-existente de um transformador monofásico saturado, identificado por “TRAFO_S” na plataforma ATPDraw, apresenta-se adequada aos objetivos postos. Esse recurso encontra-se ilustrado na Figura 3.14(a).



(a) Elemento montado

(b) Janela de parametrização elétrica do componente

Figura 3.14 - Autotransformador no ATPDraw

Sabendo-se que o autotransformador do regulador de tensão é constituído por cinco tapes com tensões distintas, houve a necessidade da criação de um autotransformador com características próprias, fato este que determinou a necessidade de tantos modelos equivalentes do tipo indicado na Figura 3.14(a), para cada tape a ser representado. O circuito completo será oportunamente apresentado. Ademais, para este componente não houve necessidade de adequações para a inserção no simulador ATP.

Vale enfatizar que, diante da utilização de um modelo de transformador já oferecido pelo simulador, não houve necessidade de qualquer detalhamento, nos termos anteriormente feitos, para esse componente. Portanto, descrições a exemplo da criação e parametrização de um novo dispositivo tornam-se desnecessárias nesta etapa. Como mencionado, a única particularidade estratégica adotada nesta fase dos trabalhos refere-se ao modo com que são configurados os tapes requeridos ao processo da compensação da tensão.

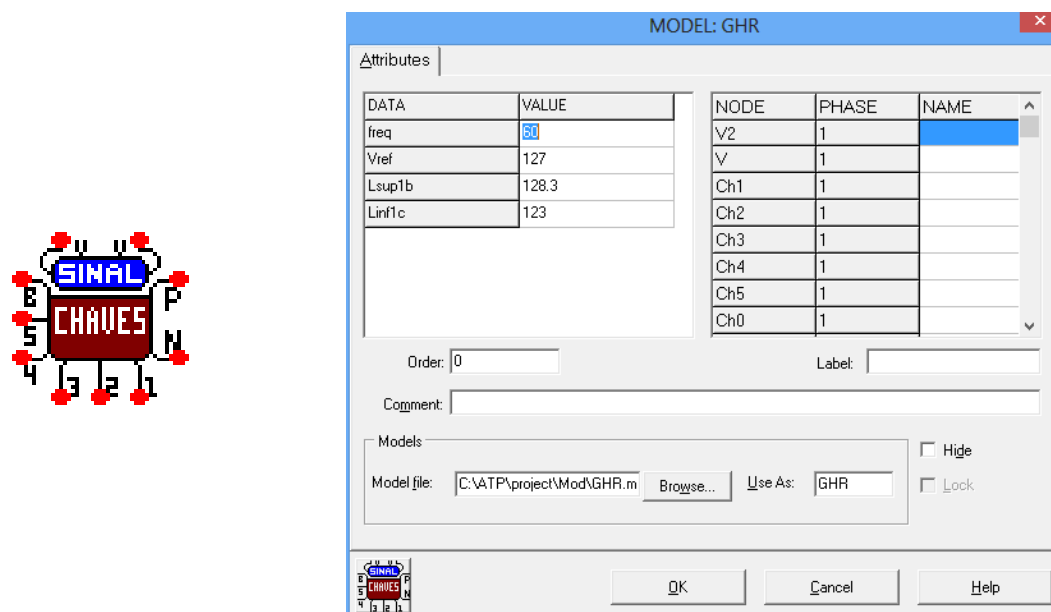
3.3.3 - Sistema de Controle

Inicialmente, ressalta-se que o trabalho de implementação do controle no simulador selecionado foi totalmente embasado na linguagem MODELS (*.mod), ferramenta está disponível no ATPDraw. Esse recurso apresenta-se como um idioma de descrição, de uso geral, apoiado por um jogo de ferramentas de simulação para a representação e estudos envolvendo grandezas variáveis no tempo. Fundamentalmente, tal recurso provê um formato descritivo da estrutura do modelo em função de seus elementos. À luz destes fatos essa linguagem permite, a partir de um algoritmo, modelar dispositivos de controle e de sistema nos termos requeridos pelo ATP.

Do exposto, sem a preocupação de tecer detalhes exaustivos sobre os trabalhos realizados, apresenta-se no anexo A o código fonte que contempla todas as ações originalmente discutidas no Capítulo II. Dessa forma, a partir das medições da variável tensão do barramento da carga, ao final, o programa

estabelece a ordem de fechamento do contator associado com o tape ideal para o processo de compensação desejado.

Por fim, a Figura 3.15 indica o resultado final obtido quanto à implementação do sistema de controle do RET na forma de: (a) ícone do elemento criado e (b) janela de parametrização.



(a) Elemento criado

(b) Janela de parametrização elétrica do componente

Figura 3.15 - Controle do RET no ATPDraw

3.3.4 - Sistema Completo do Compensador RET – Unidades de Potência e Controle

Uma vez descritos os modelos desenvolvidos para os três elementos principais que perfazem a estrutura do regulador, esses são então associados de forma a oferecer, no simulador ATP, a representação completa do dispositivo, incluindo-se as chaves de comutação dos tapes e polaridades responsáveis pela injeção do incremento de tensão. Para tanto, como de praxe, utilizou-se a ferramenta TACS do simulador, a qual, como amplamente difundido, presta-se aos objetivos de modelagem de chaves controladas, dentre outras propriedades. Disso resulta a representação completa do RET indicada na Figura 3.16.

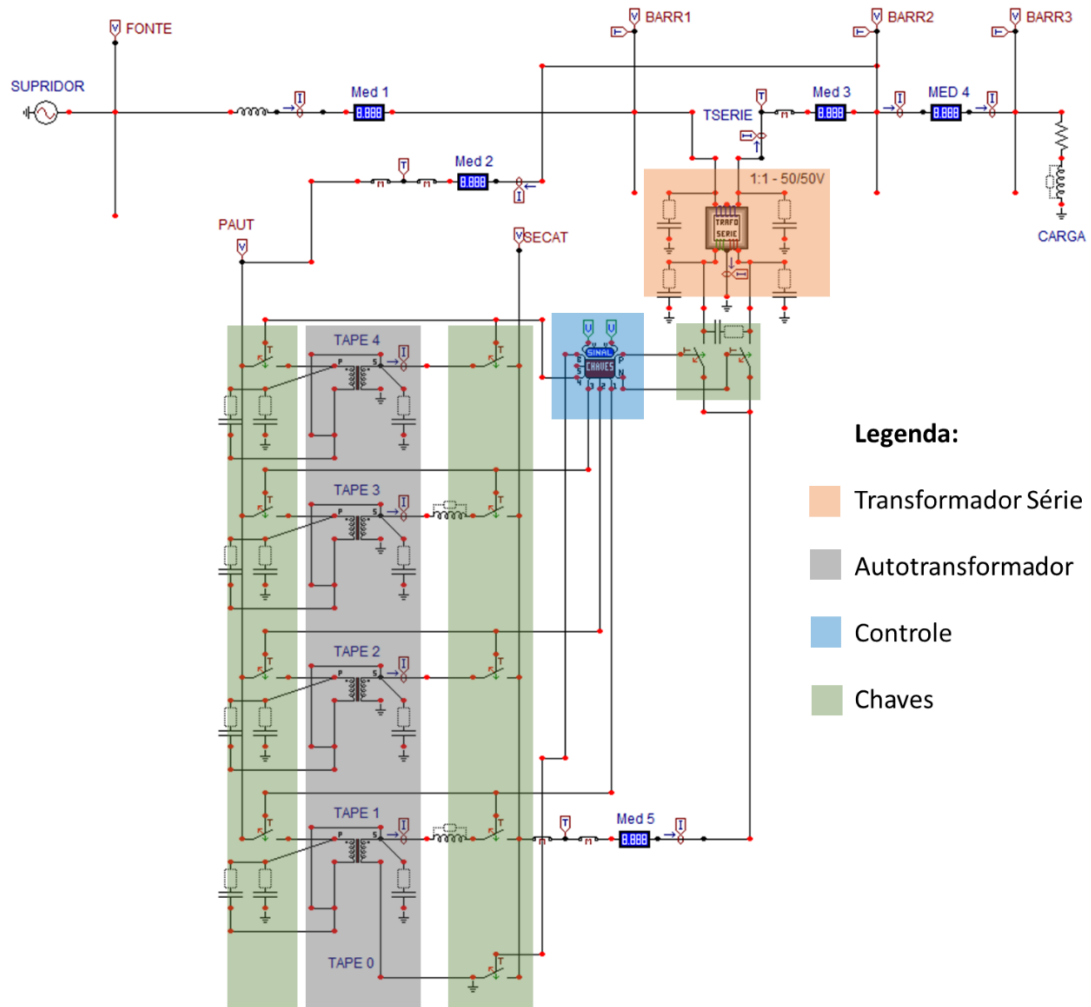


Figura 3.16 - Regulador Eletromagnético de Tensão no ATPDraw

3.4 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO

Uma vez obtido o modelo computacional do regulador eletromagnético de tensão e sua respectiva inserção na plataforma ATP, o passo seguinte consiste na avaliação de desempenho do modelo frente às situações tipicamente encontradas nas redes elétricas, conforme definido pelas premissas do processo de regulação aqui postas.

No que tange aos casos considerados para as avaliações computacionais foram utilizadas situações hipotéticas na forma de degraus sucessivos de variações de tensão envolvendo dezessete intervalos de tempo, cada qual atrelado

com uma dada condição operativa. Essas variações foram impostas ao modelo unifilar utilizado para os estudos e indicado na Figura 3.17.

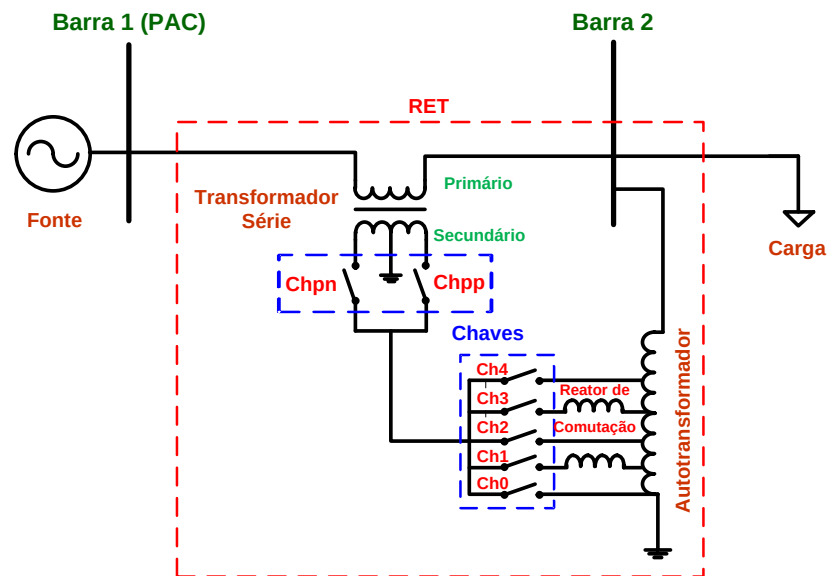


Figura 3.17 - Diagrama unifilar do sistema radial utilizado para os estudos computacionais

As principais informações atreladas com os parâmetros empregados encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros do alimentador radial utilizado

Dados	Potência [VA]	Fator de Potência	Tensão [V]	Potência de CC [MVA]	Zcc %	Rcc %
Fonte	-	-	127	30	-	-
Autotransformador	1500	-	127	-	3,5	2,27
Transformador Série	1500	-	com Tapes	-	3,5	1,73
Carga	1420	0,94	50:50	-	-	-

Para realizar a regulação de tensão, o autotransformador foi adotado com cinco tapes, a saber: 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os motivos que levaram a tais valores foram as margens de variações requeridas pelos estudos de desempenho propostos.

O tempo total de estudo foi escolhido arbitrariamente como sendo igual a 170 segundos e os intervalos representativos dos diferentes desempenhos do sistema correspondem, cada um, a um fenômeno com duração de 10 segundos. Dessa forma, no intervalo de tempo de 0 a 40 segundos, pode-se constatar, gradativamente, decréscimos sucessivos de 5 em 5% da tensão de suprimento e, por sua vez, de 50 a 80 segundos, acréscimos de mesma magnitude. Uma vez restaurada a tensão nominal em $t=80$ s, a partir desse e para os intervalos subsequentes, compreendendo a gama de tempos de 90 a 170 segundos, constata-se elevações de tensão com a mesma taxa percentual anteriormente explicitada.

A Figura 3.18 mostra o perfil das tensões impostas pela fonte ideal de tensão que compõe o sistema em estudo. Complementarmente, a Tabela 3.2 fornece os correspondentes valores de tensão para cada intervalo de estudo considerado.

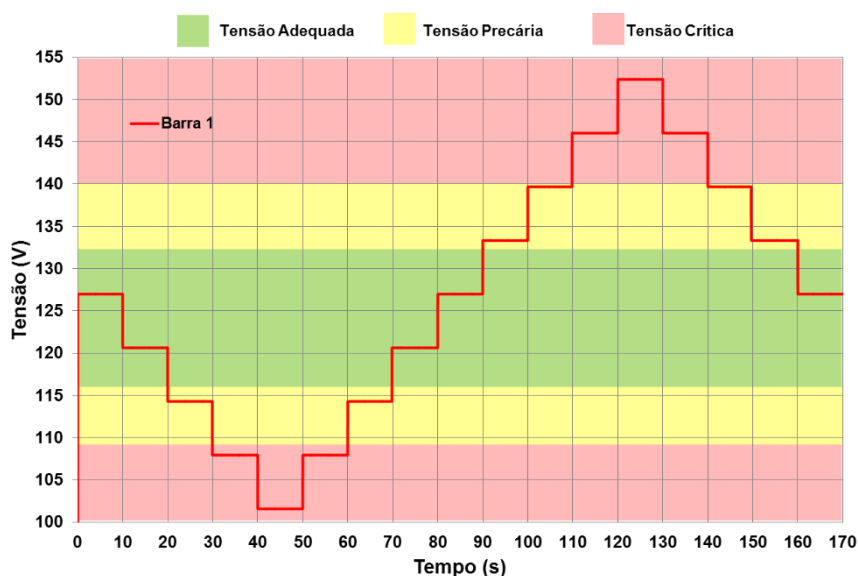


Figura 3.18 - Tensão na Barra 1 – variações de tensão adotadas ao longo do período de investigação

Tabela 3.2 - Tensões de operação adotadas para a Barra 1

Intervalos	Tempo [s]	Tensão[V]	$\Delta V\%$
Intervalo 1	0 a 10	127,0	0
Intervalo 2	10 a 20	120,6	-5
Intervalo 3	20 a 30	114,3	-10
Intervalo 4	30 a 40	107,9	-15
Intervalo 5	40 a 50	101,6	-20
Intervalo 6	50 a 60	107,8	-15
Intervalo 7	60 a 70	114,3	-10
Intervalo 8	70 a 80	120,6	-5
Intervalo 9	80 a 90	127,0	0
Intervalo 10	90 a 100	133,3	+5
Intervalo 11	100 a 110	139,7	+10
Intervalo 12	110 a 120	146,0	+15
Intervalo 13	120 a 130	152,4	+20
Intervalo 14	130 a 140	146,0	+15
Intervalo 15	140 a 150	139,7	+10
Intervalo 16	150 a 160	133,3	+5
Intervalo 17	160 a 170	127,0	0

A Figura 3.19 ilustra as tensões nas Barras 1 e 2 para as distintas situações impostas. Os resultados evidenciam que tais comportamentos expressam a operação do arranjo elétrico sob a ação das variações de tensão diante da presença do regulador aqui delineado. Os desempenhos obtidos revelam as tensões impostas pela fonte (Barra1) e na carga (Barra 2). De imediato, pode-se observar, com clareza, a eficácia do processo de regulação proposto por esta pesquisa.

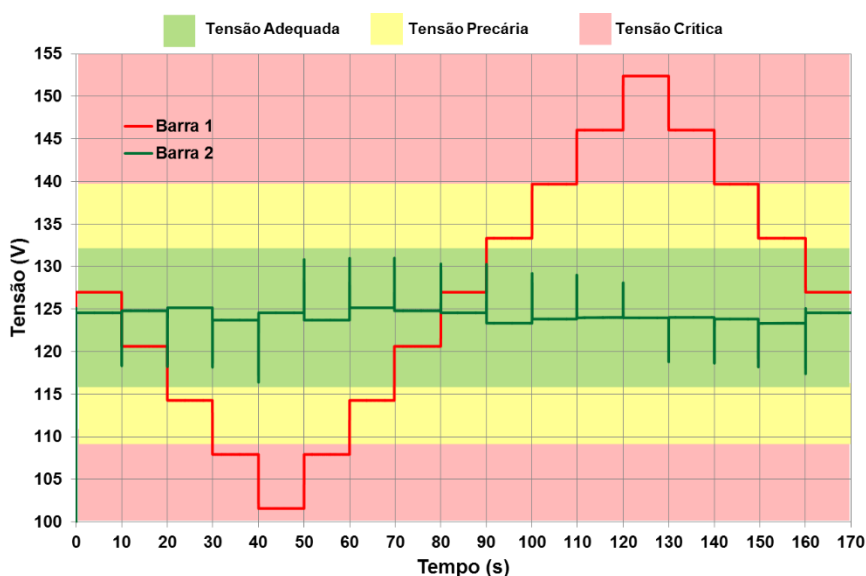


Figura 3.19 - Tensões nas barras 1 e 2

A Tabela 3.3 fornece os valores eficazes das tensões para as distintas situações avaliadas, tanto no barramento do supridor quanto para o da carga.

Tabela 3.3 - Tensão das Barras 1 e 2 – computacional

Tempo [s]	$\Delta V\%$	Valores das Tensões	
		Barra 1 [V]	Barra 2 [V]
0 a 10	0	126,9	124,6
10 a 20	-5	120,6	124,8
20 a 30	-10	114,2	125,1
30 a 40	-15	107,9	123,7
40 a 50	-20	101,6	124,6
50 a 60	-15	107,9	123,7
60 a 70	-10	114,3	125,1
70 a 80	-5	120,6	124,8
80 a 90	0	126,9	124,6
90 a 100	+5	133,3	123,3
100 a 110	+10	139,7	123,8
110 a 120	+15	146,0	124,0
120 a 130	+20	152,4	124,0
130 a 140	+15	146,0	124,0
140 a 150	+10	139,7	123,8
150 a 160	+5	133,3	123,3
160 a 170	0	126,9	124,6

Ressalta-se, que os valores corrigidos não se apresentam em total consonância com o valor nominal de 127 V. Todavia, ao se analisar os resultados supra postos, fica evidente uma pequena divergência entre as compensações idealizadas e aquelas que efetivamente ocorreram. Isso se deve a quedas de tensão nas unidades eletromagnéticas, as quais promovem, para os parâmetros fornecidos e carregamentos impostos, quedas de tensão nas imediações de 2 V, e também, à inexistência de um mecanismo para o ajuste final do grau de compensação (tapes discretos).

Somado ao efeito anterior, há ainda de se reconhecer que para as condições de compensação associadas com os tapes de 5% e 15%, tanto para a condição de afundamento como para a elevação da tensão há ainda a se considerar a queda de tensão nos reatores de comutação presentes em serie com os tapes 1 e 3 do autotransformador.

Não obstante as considerações anteriores, de um modo geral, os níveis de regulação atingidos mostram-se bastante satisfatórios.

Quanto às tensões e correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série, essas se encontram ilustradas na Figura 3.20.

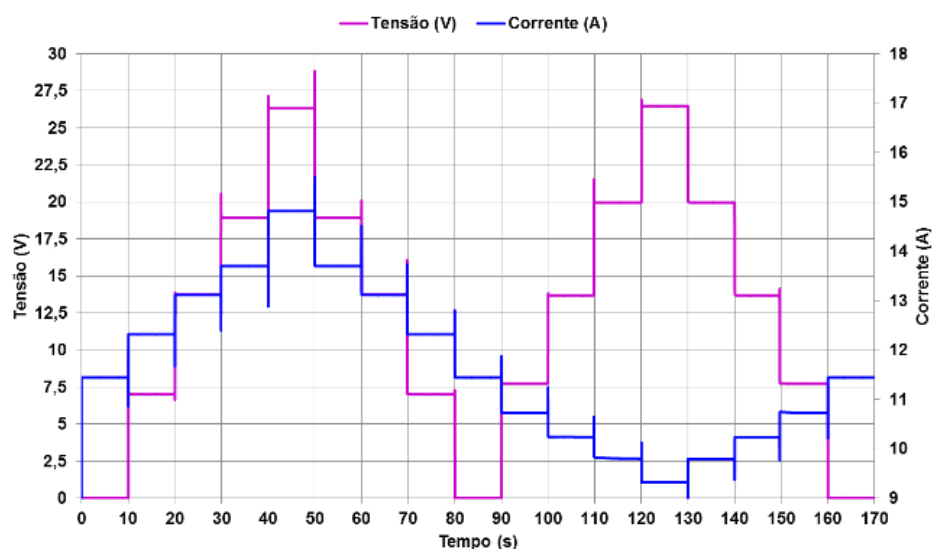


Figura 3.20 - Tensões e correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série

Objetivando proporcionar uma visão mais completa do mecanismo de compensação e das grandezas envolvidas no processo, a Figura 3.21 mostra as correntes nos diversos trechos do alimentador radial que compõe a rede elétrica adotada. Assim sendo, são indicadas as seguintes correntes: entre a fonte e a barra 1; entre a barra 2 e a carga; entre a barra 2 e o primário do autotransformador; e, por fim, entre o secundário do autotransformador e o secundário do transformador série. Vale observar que nas figuras subsequentes, o termo AT refere-se ao autotransformador.

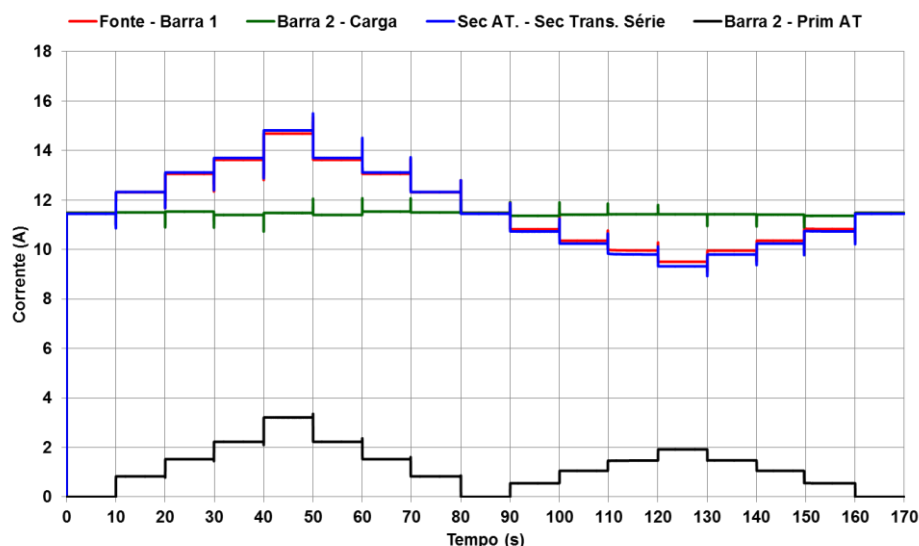


Figura 3.21 - Correntes nos diversos trechos do alimentador

Por fim, no que tange às potências aparentes envolvidas no processo de compensação, a Figura 3.22 evidencia tais grandezas para os mesmos trechos supra identificados. No que tange a esta grandeza, adotou-se, para fins das apresentações gráficas, que as potências se mostram sempre positivas, independentemente se o caso sob análise é de elevação ou redução da tensão.

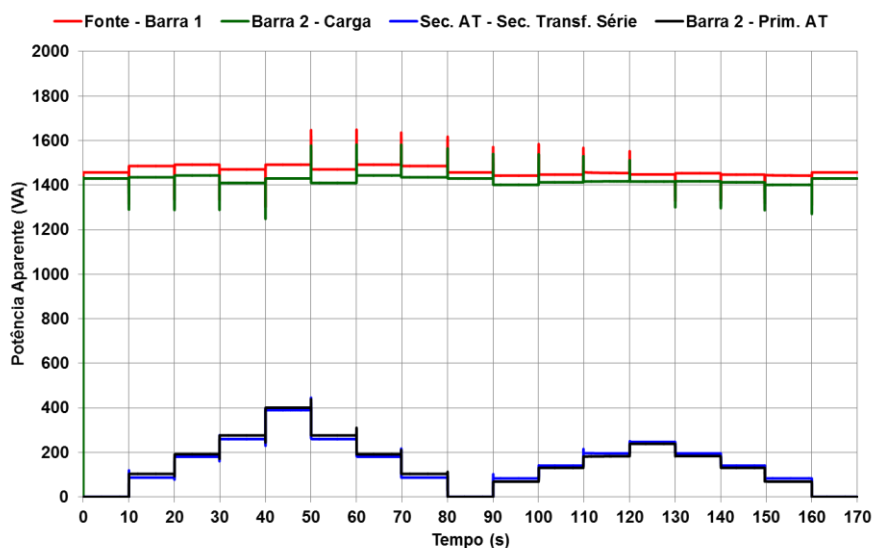


Figura 3.22 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador

A Tabela 3.4 ilustra os valores de relação percentual entre a potência aparente solicitada pelo RET e a correspondente grandeza solicitada pela carga

para as diversas variações da tensão de suprimento. Como pode ser observado, S_{carga} indica a potência entregue à carga, S_{RET} corresponde ao complemento de potência injetada/absorvida pelo regulador e $\Delta S[\%]$ expressa o percentual da diferença entre ambas.

Tabela 3.4 - Potências na carga e no regulador proposto

$\Delta V\%$	Potência Aparente		
	$S_{\text{CARGA}} [\text{VA}]$	$S_{\text{RET}} [\text{VA}]$	$\Delta S[\%]$
0	1429,6	0	0,0
-5	1434,9	86,3	6,0
-10	1443,1	180,2	12,5
-15	1409,8	259,3	18,4
-20	1429,7	389,8	27,3
-15	1409,8	259,4	18,4
-10	1443,1	180,2	12,5
-5	1434,9	86,3	6,0
0	1429,6	0	0,0
+5	1401,4	82,9	5,9
+10	1412,8	140,1	9,9
+15	1416,6	195,5	13,8
+20	1416,0	246,5	17,4
+15	1417,0	195,4	13,8
+10	1412,8	140,1	9,9
+5	1401,1	82,9	5,9

Por fim, a Figura 3.23 fornece as potências aparente, ativa e reativa requeridas dos dispositivos (autotransformador e transformador série) eletromagnéticos.

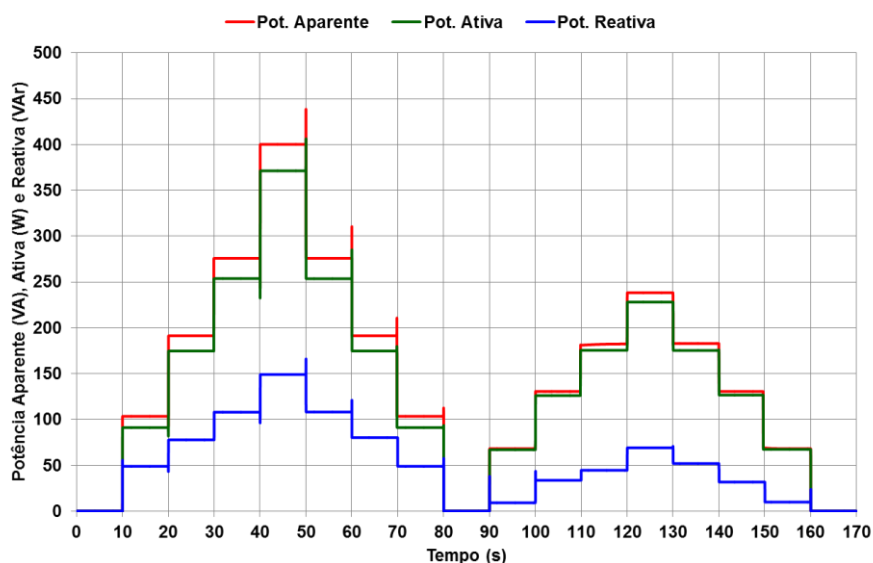


Figura 3.23 - Potências aparente, ativa e reativa requeridas pelo RET

À luz dos desempenhos obtidos e sintetizados nas figuras e tabelas anteriores, é possível observar que:

- As relações percentuais entre as potências entregues à carga, para as distintas situações avaliadas, e aquelas atreladas com os requisitos exigidos do compensador deixam claro que, esse último é demandado com valores inferiores ao do suprimento. Isso esclarece que o dispositivo regulador, para cada nível de compensação solicitado, opera com potências significativamente inferiores aos valores exigidos pela carga, como ocorre com os reguladores comerciais, a exemplo dos produtos oferecidos pela Toshiba e ITB, dentre outras. Nesse contexto fica ainda ratificado que quanto maiores forem os valores das variações de tensão a serem restauradas, tanto maior será a potência solicitada pelo dispositivo em pauta;
- Outra observação meritória refere-se aos valores das potências associados à operação do regulador, os quais sempre se mostram positivos tanto nas figuras como nas tabelas. Como seria fisicamente esperado, para os casos de reduções de tensão, as potências são fornecidas pelo RET e, para as situações vinculadas com elevações de tensão, essas invertem o seu

sentido, ou seja, a potência é absorvida pelo regulador. Portanto, as grandezas indicadas correspondem aos valores absolutos sem se preocupar com suas direções.

3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das bases físicas e operacionais contempladas no capítulo anterior, a proposta de equipamento compensador ora considerada foi, ao longo desta unidade, objeto de representação no simulador ATP.

Para tanto, através de recursos internos disponibilizados na biblioteca dessa plataforma, foi estabelecida a estratégia de modelagem do equipamento, em que pese sua representação via técnicas de modelagem no domínio do tempo. Isso se justifica pelo fato que os trabalhos de pesquisa aqui considerados destinam-se à realização de estudos investigativos focando o desempenho do regulador e respectiva rede de conexão sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente de operação.

Em vista do fato que as unidades de potência da proposta de dispositivo apresentam-se na forma construtiva e operacional de transformadores, a inserção do autotransformador paralelo ou de excitação, assim como do transformador série, foi feita a partir de recursos pré-existentes na biblioteca do ATP. Não obstante tais modelos disponibilizados apresentem-se como pré-existentes, houve necessidades de adequação dos mesmos aos propósitos desta pesquisa. Esses trabalhos culminaram na elaboração e edição de cartões especiais, nos termos apresentados ao longo do texto.

Em relação ao controle, empregando-se a rotina MODELS para o processo decisório e a TACS para os chaveamentos que se fizerem necessários, foi então concluída a modelagem do regulador em pauta.

Objetivando a realização de uma primeira etapa de trabalhos para a avaliação do programa computacional assim obtido, a partir da configuração de uma rede elétrica simplificada, na forma de sistema radial e formado por uma fonte de tensão, linha de alimentação, carga e o dispositivo regulador, foram então definidas condições operacionais hipotéticas para os estudos. Essas foram caracterizadas na forma de elevações e reduções da tensão do supridor, em degraus sucessivos de 5% em 5%, como exposto.

Isso posto, foram exploradas as potencialidades da proposta e sua eficácia aos propósitos aqui estabelecidos e, em consonância com essas primeiras investigações, foi ratificado o sucesso computacional do processo da compensação.

3.6 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTE CAPÍTULO

As principais contribuições oferecidas por este capítulo são:

- Proposição de um modelo para a representação do regulador eletromagnético de tensão e respectiva inserção no simulador ATP;
- Realização de testes avaliativos de desempenho do modelo empregando-se para tanto um arranjo físico de um alimentador disponibilizado em ambiente computacional.

CAPÍTULO IV

PROTÓTIPO DO REGULADOR DE TENSÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez definidas as características construtivas e operacionais do regulador de tensão focado nessa pesquisa e descritas as etapas de sua modelagem no simulador ATP, este capítulo encontra-se focado no processo de validação do modelo desenvolvido.

Para tanto, a estratégia empregada foi embasada em dois passos fundamentais. Um primeiro, consistindo na especificação, projeto e construção de um protótipo de um regulador de tensão em escala reduzida, para utilização em ambiente laboratorial e, uma segunda, direcionada à montagem de uma estrutura laboratorial para estudos experimentais de desempenho e respectivas correlações com respostas extraídas do software obtido.

À luz desses objetivos fica pois estabelecido que as metas principais deste capítulo encontram-se centradas na análise de desempenho experimental do protótipo no que tange à sua habilidade e propriedades intrínsecas ao cumprimento de suas funções.

Também, através de estudos comparativos e avaliativos da eficácia do regulador, tanto no que se refere ao seu desempenho experimental como

computacional, fica estabelecida uma estratégia destinada à validação do modelo computacional desenvolvido.

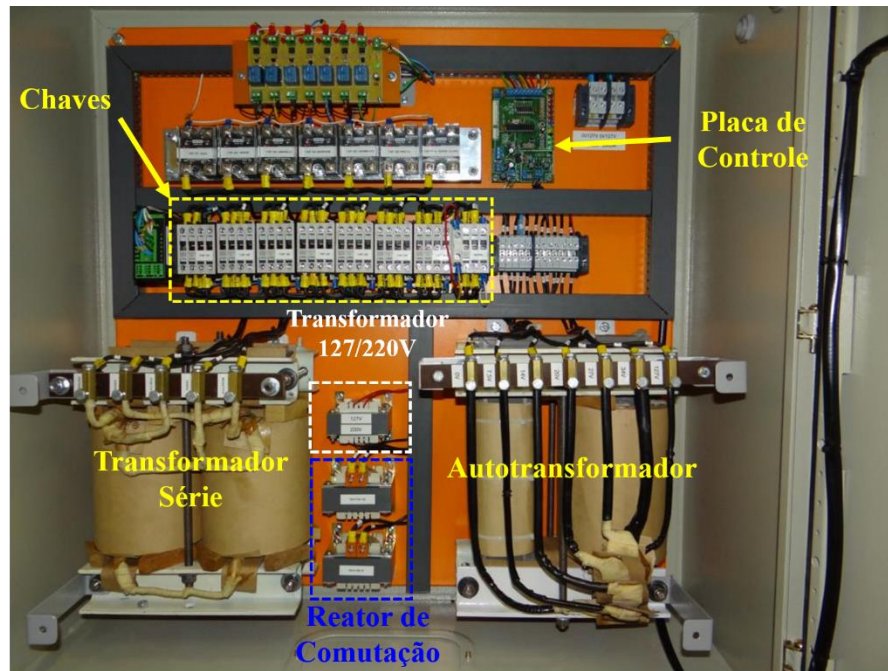
4.2 - PROTÓTIPO DO RET

No que tange à primeira fase dos trabalhos, as atividades realizadas visaram à definição de uma base paramétrica compatível com os recursos disponibilizados nos laboratórios de Qualidade da Energia Elétrica, em que pesasse as propriedades e limitações impostas por uma fonte destinada à reprodução de fenômenos atrelados com a ocorrência em variações de tensão. Dentro dessas circunstancias foram definidos os principais parâmetros das unidades de potência do regulador, o qual foi objeto de projeto e construção por parte de uma empresa fabricante de transformadores.

A partir dessa estrutura, em sintonia com a proposta de controle e chaveamento concebidos por essa tese, foi dado prosseguimento ao processo construtivo englobando as partes que perfazem o todo do produto, como mostrado através da Figura 4.1, a qual destaca o protótipo em sua forma completa.



(a) *Painel frontal*



(b) Parte interna do regulador

Figura 4.1 - Protótipo do RET

Apresenta-se, na sequência, as principais unidades que perfazem o dispositivo construído para fins experimentais.

4.2.1. Transformador série

O presente componente encontra-se ilustrado na Figura 4.2, a qual revela uma estrutura extremamente similar à de um transformador monofásico convencional, o qual se apresenta com as principais características indicadas. Informações sobre o projeto dessa unidade encontra-se no anexo B.



- ✓ 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 4.2 - Transformador série do RET

4.2.2. Autotransformador ou transformador de excitação

Essa unidade, conforme discutido, apresenta-se com o objetivo de suprir as tensões para o transformador série. Sua constituição se mostra 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. Novamente, sua estrutura física é convencional e composta pelos tapes a serem mecanicamente alterados conforme se faz necessário para o nível de regulação almejado. A Figura 4.3 mostra o referido componente e seus principais parâmetros. Informações adicionais relacionadas com o projeto desse componente encontram-se no anexo C.

- ✓ 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 %;
- ✓ Resistencia de curto-circuito – 2,27 %.



Figura 4.3 - Autotransformador

4.2.3. Dispositivo de seleção de tapes

Uma vez definido o grau de compensação desejado, como esclarecido ao longo dessa pesquisa, torna-se necessária a seleção do tape mais adequado para o suprimento da tensão de restauração das condições definidas pelo controle. Para tanto, a opção aqui feita recaiu sobre o emprego de um produto comercial, na forma de contator mecânico, oferecido por um fabricante nacional, como mostra a Figura 4.4.



- ✓ 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 contatores.

Figura 4.4 - Dispositivo de seleção de tape

4.2.4. Placa de controle

Uma vez caracterizados os recursos acima mencionados, vale ressaltar que o contator empregado apresenta-se na forma de um dispositivo composto por uma série de chaves, cada qual com seu comando individual e acionada por sinais advindos da unidade decisória, a qual, via acionamento do relé apropriado, provê o fechamento de uma ou outra chave de definição do tape a ser utilizado. Toda a lógica operacional compreendendo essa etapa dos trabalhos utilizou um microcontrolador modelo PIC18F2525, da Microchip - Figura 4.5. Essa opção foi feita em função de atrativos como: portabilidade, confiabilidade e robustez. O módulo de leitura da tensão eficaz da placa também funciona como um circuito de inspeção ciclo a ciclo da tensão da rede elétrica no que tange às variações de amplitude da mesma. Para tanto, dois processos essenciais são realizados no PIC: a conversão analógico/digital (A/D) da tensão e o cálculo de seu valor eficaz. Somente após isso, tornam-se possíveis as tomadas de decisões. Também, para que o processo de conversão A/D possa ser realizado de maneira satisfatória, faz-se necessário estabelecer uma referência sobre os zeros da tensão senoidal, isto é, os pontos de transição entre os semiciclos positivos e negativos. Essa referência determina o instante exato em que o microcontrolador deve iniciar a leitura da tensão a ser digitalizada.

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



Figura 4.5 - Placa de controle

4.2.5. Acessórios complementares

Somado às partes principais já caracterizadas, o protótipo de regulador de tensão ainda requer alguns acessórios complementares. Este é o caso dos reatores mostrados na Figura 4.6, os quais se destinam a reduzir os impactos associados com as manobras de chaveamento entre os tapes. Também, visando adequar os níveis de tensão disponibilizados na rede com os padrões requeridos pela placa de controle, tornou-se necessário o uso do transformador indicado na mesma figura.



Reator de comutação:

- ✓ Indutância de 265 μ H;
- ✓ 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 4.6 - Reator de comutação e transformado para alimentação do controle e das chaves

4.3 - ESTUDOS DE DESEMPENHO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL ATRAVÉS DE ARRANJO LABORATORIAL

No que tange aos casos considerados para as avaliações computacionais e experimentais, de um grande número de investigações conduzidas, optou-se pela apresentação e discussão de duas situações: uma associada com a imposição de variações de tensão na forma de degraus hipoteticamente aplicados ao arranjo (como anteriormente utilizado no Capítulo III), e outra relacionada com distúrbios manifestados em decorrência da inserção e retirada de cargas. Essas condições operativas foram empregadas tanto para os trabalhos experimentais como computacionais.

4.3.1 - Caso 01 – Variações em degrau impostas pela fonte de suprimento

As simulações e os estudos experimentais aqui realizados encontram-se atrelados com a mesma situação operativa já apresentada e discutida no Capítulo anterior, quando foram focados apenas investigações computacionais, em que pese o fato que os fenômenos vinculados com reduções e elevações de tensão foram impostos pela fonte supridora. Portanto, os trabalhos aqui explorados envolvem uma situação de funcionamento hipotética e compreendendo dezessete intervalos de tempo sequenciais, nos termos já estabelecidos.

Quanto ao arranjo físico, esse se apresenta com a topologia exibida na Figura 4.7, a qual é formada por um alimentador na forma de uma fonte programável de tensão, o RET propriamente dito e, por fim, cargas resistivas e indutivas. Os principais parâmetros associados com os componentes encontram-se indicados na própria figura.

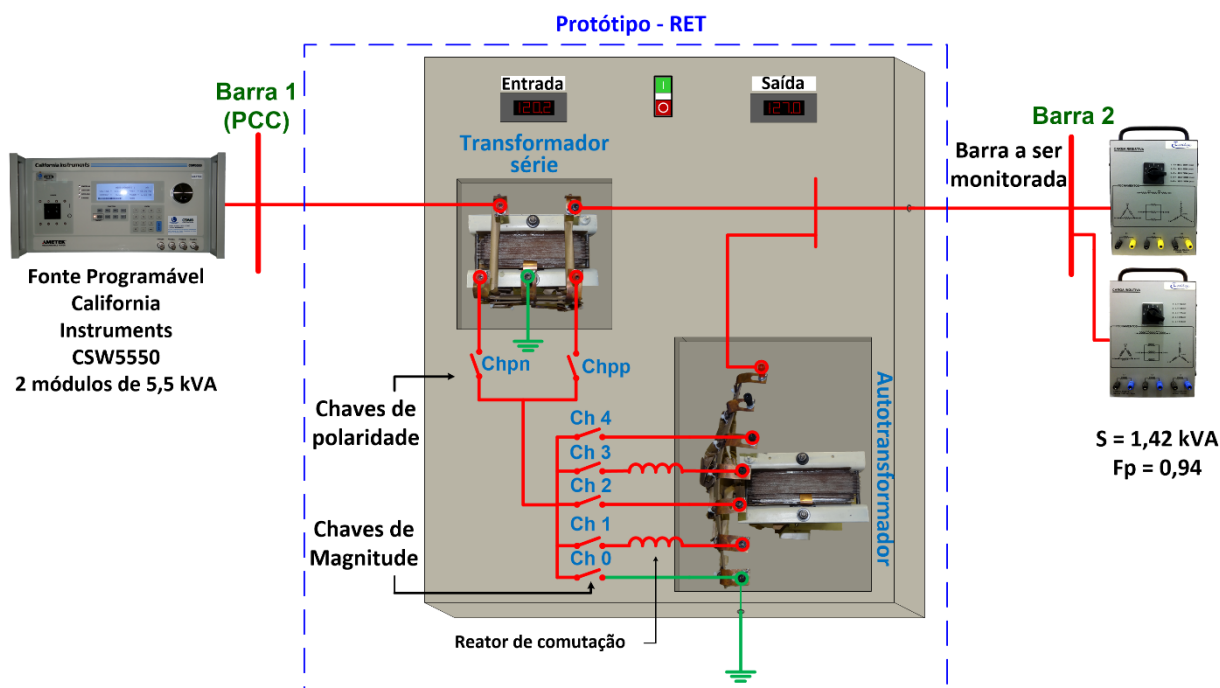


Figura 4.7 - Arranjo laboratorial utilizado para os experimentos - caso 01

O arranjo físico correspondente e montado no laboratório é indicado na Figura 4.8. Nesta pode ser observado que o suprimento é oferecido por duas fontes

CSW5550 da California Instruments, o consumidor representado por uma carga RL de 1420VA e fator de potência de 0,94 indutivo e, por fim, o protótipo do RET. A tensão nominal definida é de 127 V.

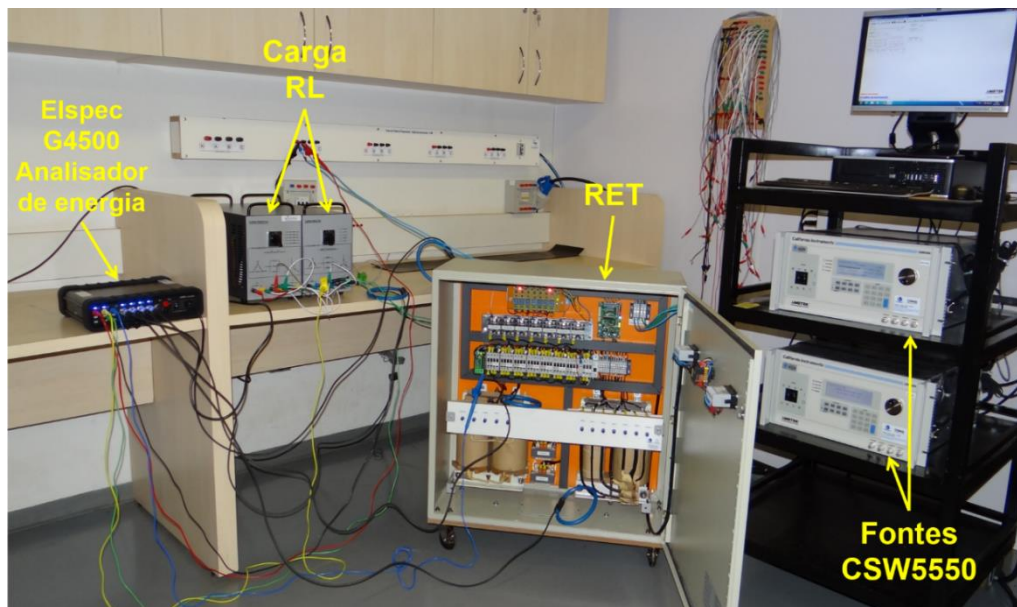


Figura 4.8 - Estrutura física estabelecida

A Figura 4.9 mostra o perfil das tensões impostas pela fonte ideal de tensão que compõe o sistema em estudo. Complementarmente, a Tabela 4.1 fornece os correspondentes valores de tensão para cada intervalo de estudo considerado.

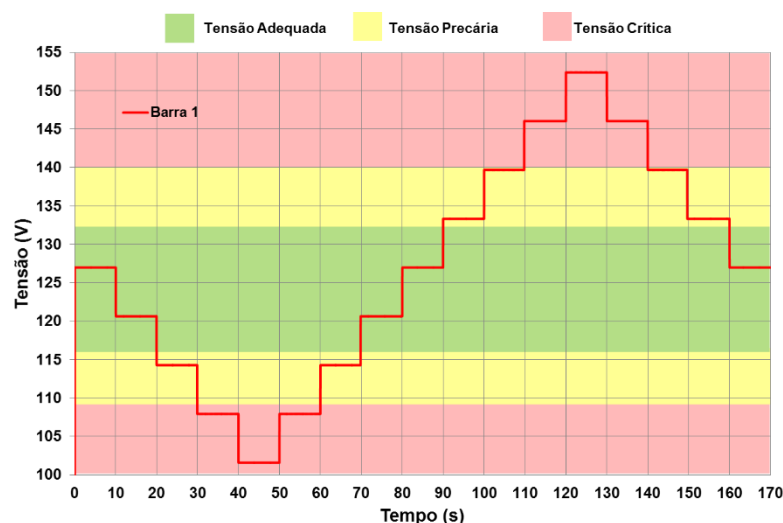
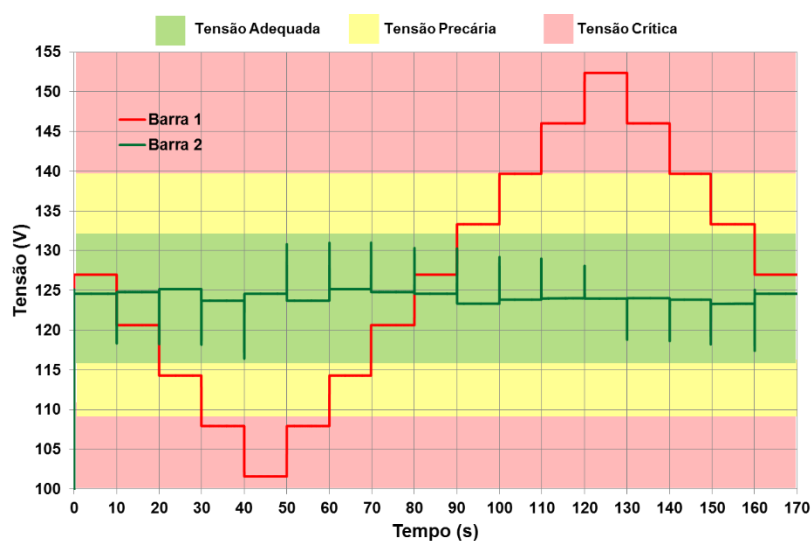


Figura 4.9 - Tensão na Barra 1 – variações adotadas ao longo do período de investigação – caso 1

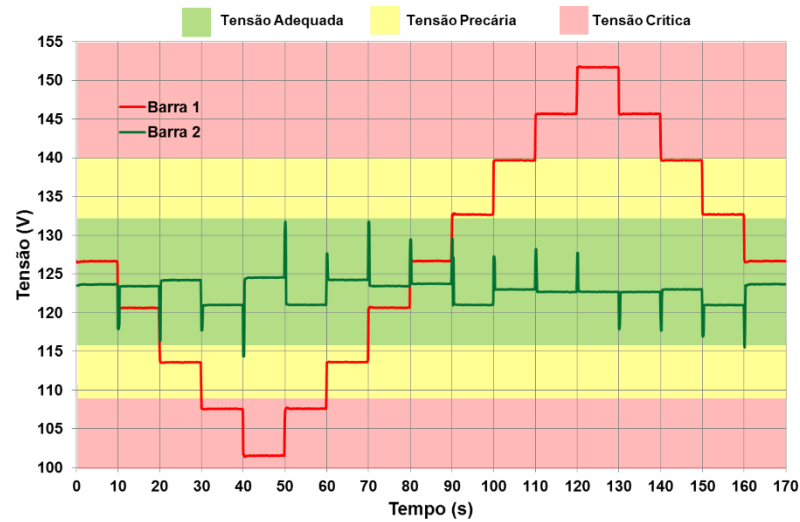
Tabela 4.1 - Tensões de operação adotadas para a barra 1 – caso 1

Intervalos	Tempo [s]	Tensão [V]	$\Delta V\%$
Intervalo 1	0 a 10	127,0	0
Intervalo 2	10 a 20	120,6	-5
Intervalo 3	20 a 30	114,3	-10
Intervalo 4	30 a 40	107,9	-15
Intervalo 5	40 a 50	101,6	-20
Intervalo 6	50 a 60	107,8	-15
Intervalo 7	60 a 70	114,3	-10
Intervalo 8	70 a 80	120,6	-5
Intervalo 9	80 a 90	127,0	0
Intervalo 10	90 a 100	133,3	+5
Intervalo 11	100 a 110	139,7	+10
Intervalo 12	110 a 120	146,0	+15
Intervalo 13	120 a 130	152,4	+20
Intervalo 14	130 a 140	146,0	+15
Intervalo 15	140 a 150	139,7	+10
Intervalo 16	150 a 160	133,3	+5
Intervalo 17	160 a 170	127,0	0

A Figura 4.10 ilustra as tensões eficazes registradas computacionalmente e experimentalmente nas Barras 1 e 2 para as distintas situações impostas. 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. A Figura 4.10(a) mostra os resultados obtidos através da plataforma ATP e a Figura 4.10(b) ilustra o desempenho obtido laboratorialmente.



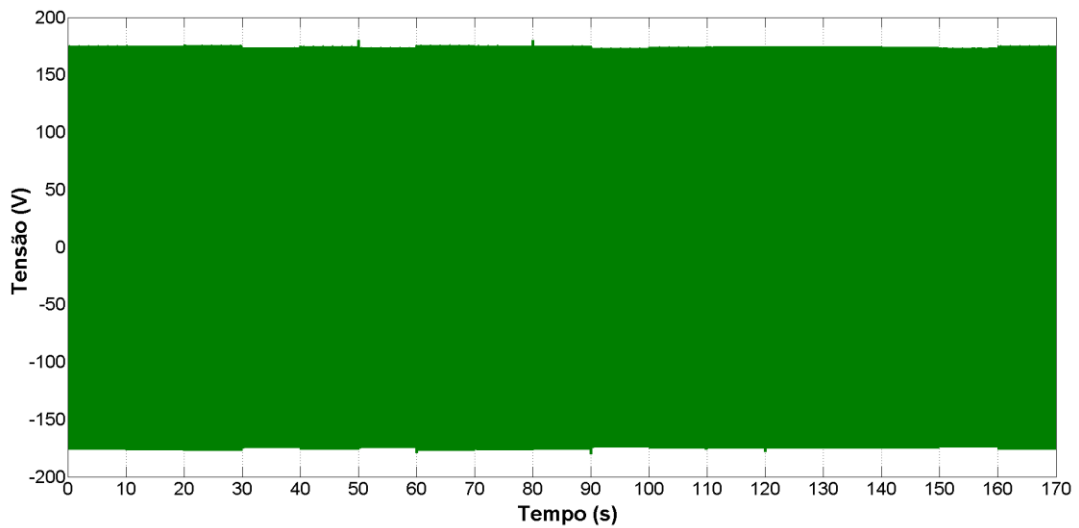
(a) Computacional



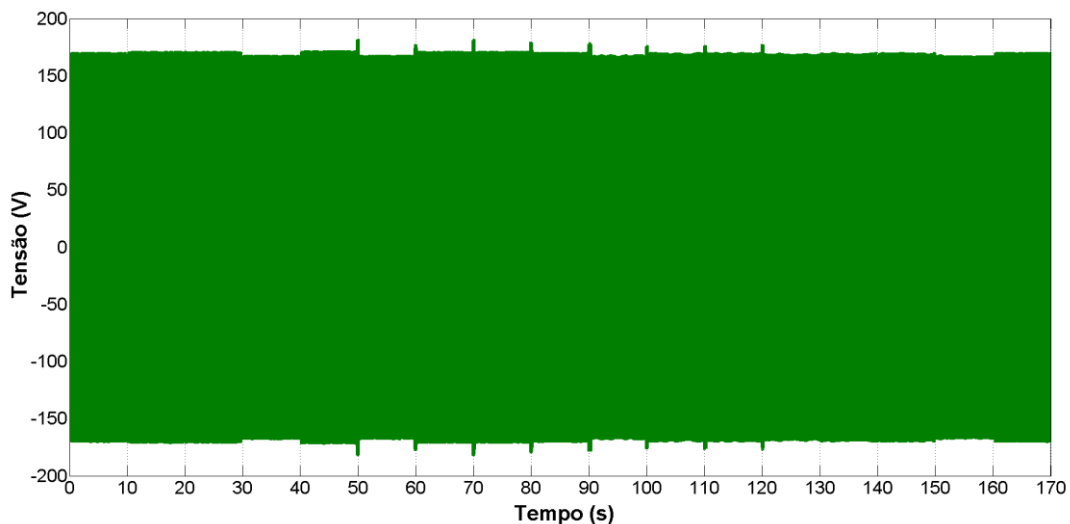
(b) Experimental

Figura 4.10 - Tensões nos barramentos 1 e 2 – valores eficazes – caso 1

Quanto às tensões instantâneas na barra da carga (Barra 2), os resultados computacionais e experimentais para essas grandezas encontram-se apresentadas nas Figuras 4.11(a) e (b).



(a) Computacional



(b) Experimental

Figura 4.11 - Tensão na Barra 2 – valores instantâneos – caso 1

Complementarmente, a Tabela 4.2 fornece os valores eficazes das tensões para os barramentos 1 e 2 nas distintas situações avaliadas.

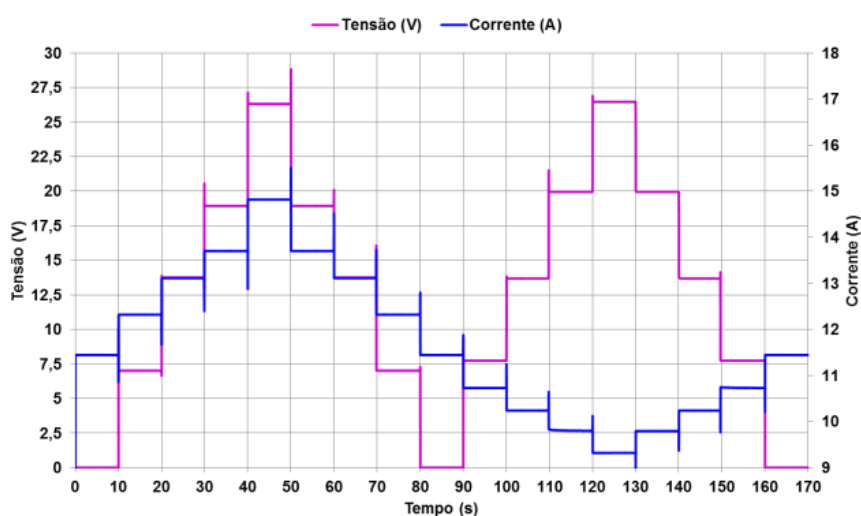
Tabela 4.2 - Tensão nas Barra 1 e 2 – computacional e experimental – caso 1

Tempo [s]	$\Delta V\%$	Computacional		Experimental	
		Barra 1 [V]	Barra 2 [V]	Barra 1 [V]	Barra 2 [V]
0 a 10	0	126,9	124,6	126,6	123,6
10 a 20	-5	120,6	124,8	120,6	123,4
20 a 30	-10	114,2	125,1	113,6	124,2
30 a 40	-15	107,9	123,7	107,6	121,0
40 a 50	-20	101,6	124,6	101,5	124,5
50 a 60	-15	107,9	123,7	107,6	121,0
60 a 70	-10	114,3	125,1	113,6	124,2
70 a 80	-5	120,6	124,8	120,6	123,4
80 a 90	0	126,9	124,6	126,7	123,7
90 a 100	+5	133,3	123,3	132,6	120,9
100 a 110	+10	139,7	123,8	139,7	122,9
110 a 120	+15	146,0	124,0	145,7	122,7
120 a 130	+20	152,4	124,0	151,7	122,7
130 a 140	+15	146,0	124,0	145,7	122,7
140 a 150	+10	139,7	123,8	139,6	123,0
150 a 160	+5	133,3	123,3	132,7	121,0
160 a 170	0	126,9	124,6	126,6	123,7

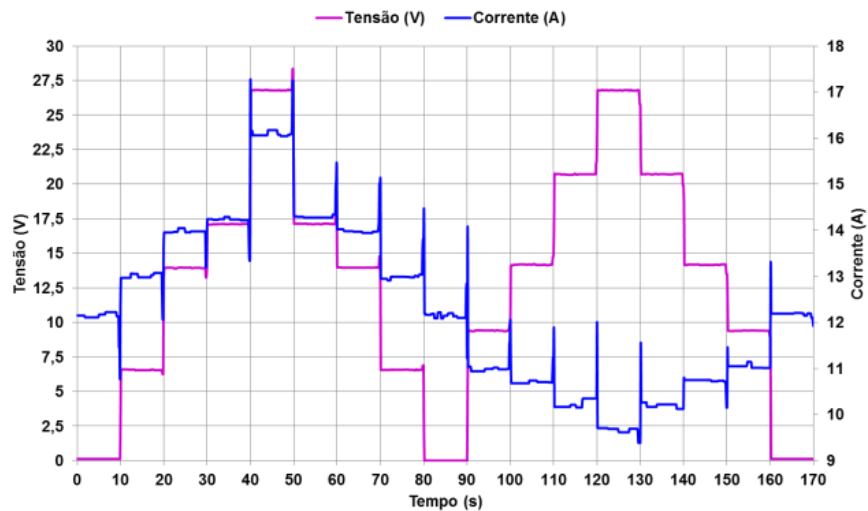
Ao se analisar os resultados supra postos fica evidente que, não obstante a eficácia do processo de regulação implementado, pode-se identificar uma pequena divergência entre as compensações idealizadas e aquelas que efetivamente ocorreram. Isso se deve a quedas de tensão nas unidades eletromagnéticas, as quais promovem, para os parâmetros fornecidos e carregamentos impostos, quedas de tensão nas imediações de 2 V para a condição computacional e 3 V para a experimental.

Somado ao efeito anterior há ainda de se reconhecer que, para as condições de compensação associadas com os tapes de 5% e 15%, tanto para a condição de redução como para a elevação da tensão, há ainda a se considerar a queda de tensão nos reatores de comutação presentes em série com os tapes 1 e 3 do autotransformador.

Quanto às tensões e correntes impostas pelo autotransformador na entrada do transformador série, a qual, para fins desse trabalho é identificada como o seu secundário, essas se encontram fornecidas na Figura 4.12. A primeira das figuras está relacionada com os resultados oferecidos pela plataforma ATPDraw, enquanto que a Figura 4.12(b) evidencia as mesmas grandezas extraídas do protótipo.



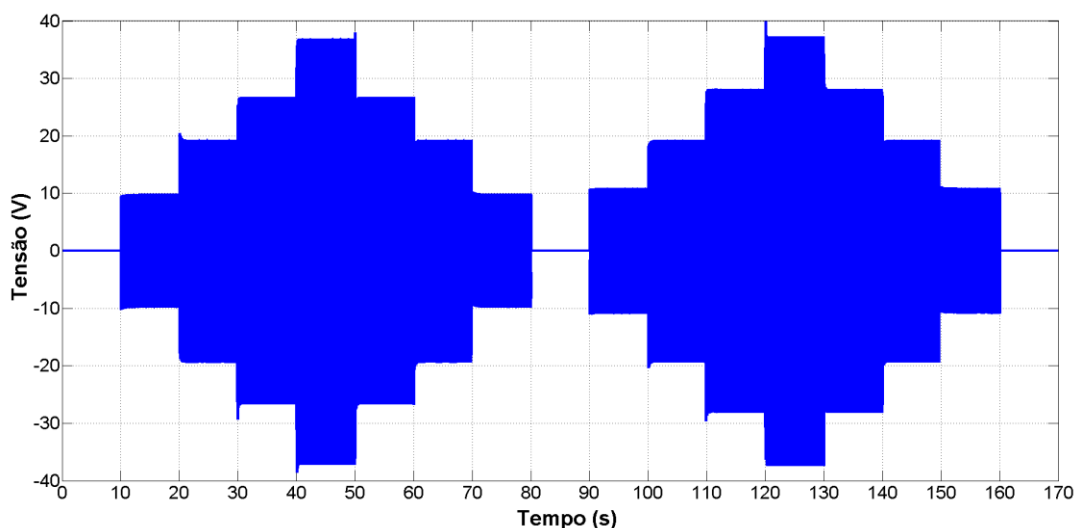
(a) Computacional



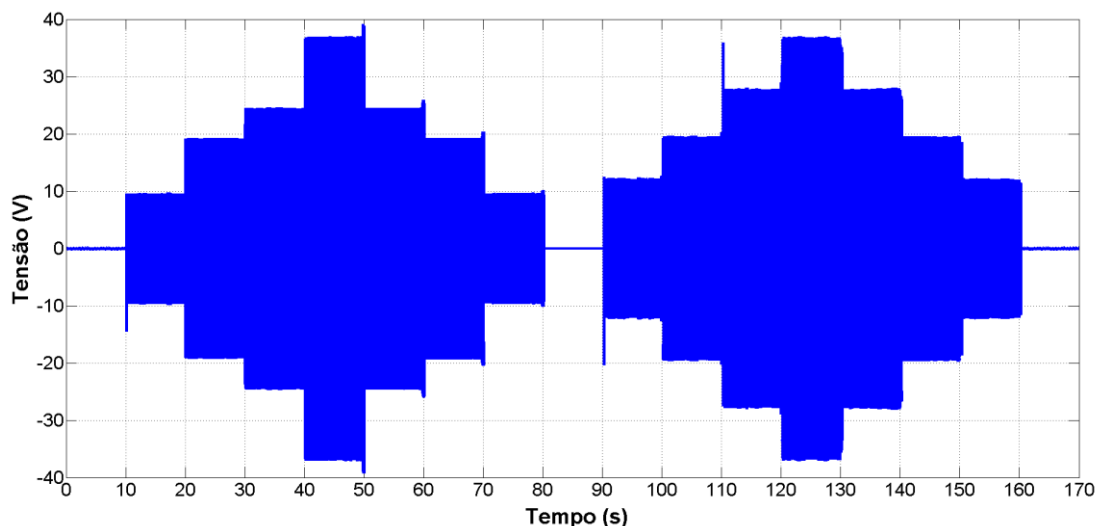
(b) Experimental

Figura 4.12 - Tensões e Correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores eficazes – caso 1

Somado aos resultados anteriores, que refletem as contribuições quanto aos valores eficazes, as Figuras 4.13(a) e 4.13(b) apresentam as tensões instantâneas no secundário do autotransformador para a condição computacional e experimental.



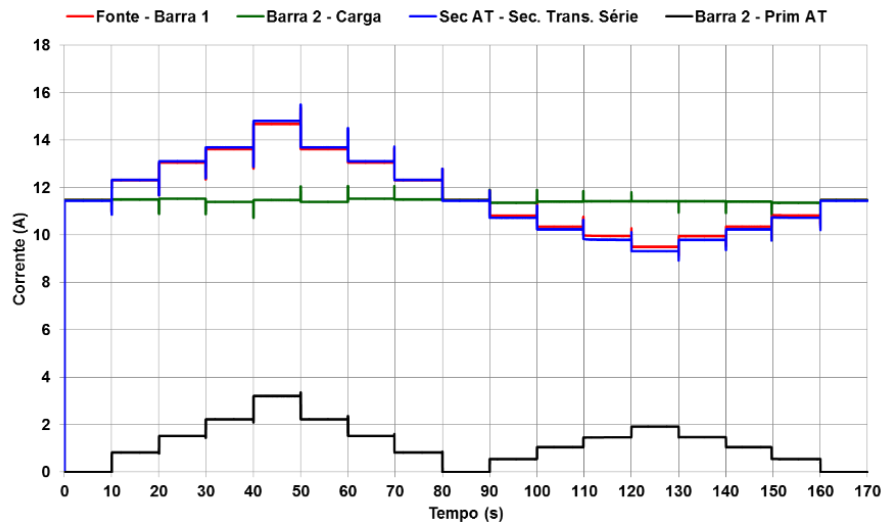
(a) Computacional



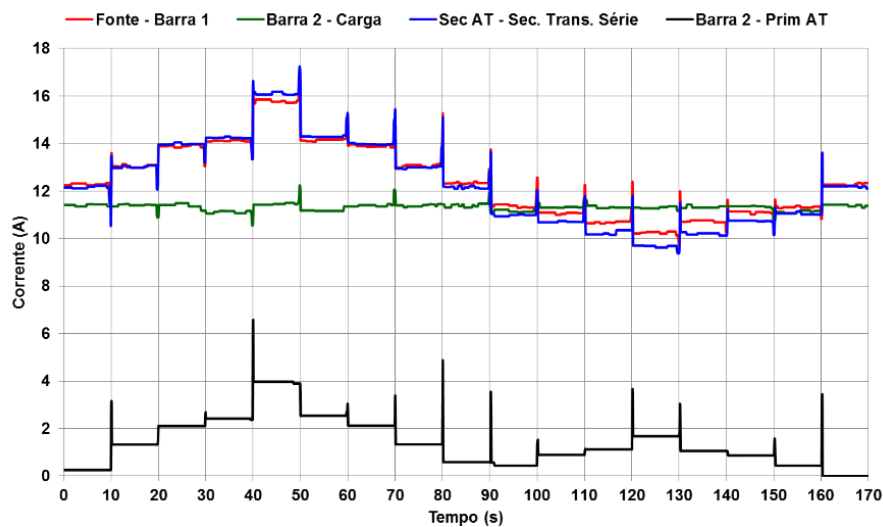
(b) Experimental

Figura 4.13 - Tensões impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores instantâneos – caso 1

Objetivando 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 4.14 mostra as correntes nos diversos pontos da rede elétrica, a saber: entre a fonte e a barra 1; entre a barra 2 e a carga; entre a barra 2 e o primário do autotransformador; e, por fim, entre o secundário do autotransformador e o secundário do transformador série. A Figura 4.14(a) apresenta os resultados atrelados com os estudos computacionais e a Figura 4.14(b) com os valores alcançados através do experimento laboratorial. Vale observar que, nas figuras subsequentes, o termo AT refere-se ao autotransformador.



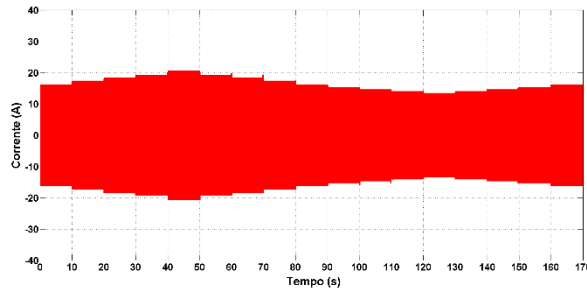
(a) Computacional



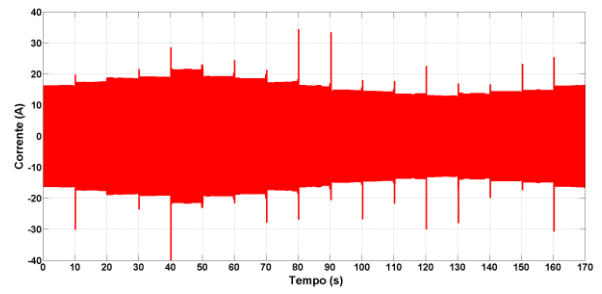
(b) Experimental

Figura 4.14 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores eficazes – caso 1

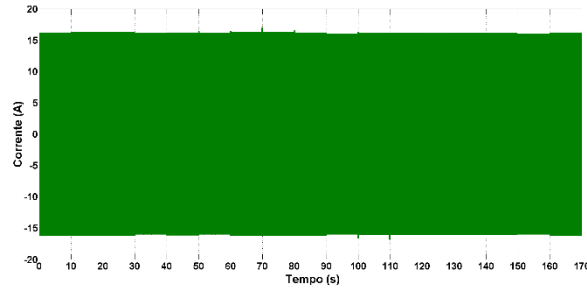
A Figura 4.15 exibe as correntes instantâneas computacionais e experimentais para os seguintes trechos: entre a fonte e a barra 1; entre a barra 2 e a carga; e, por fim, entre o secundário do autotransformador e o secundário do transformador série.



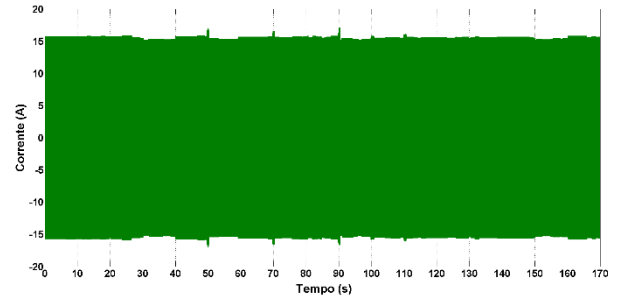
(a) Fonte - Barra 1: Computacional



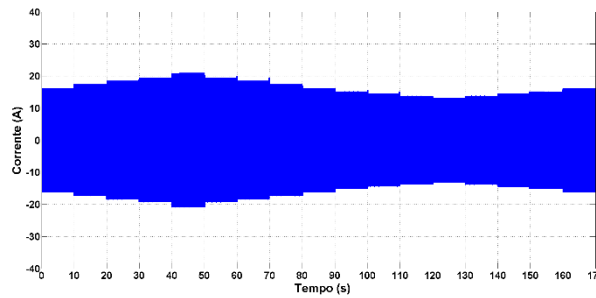
(d) Fonte - Barra 1: Experimental



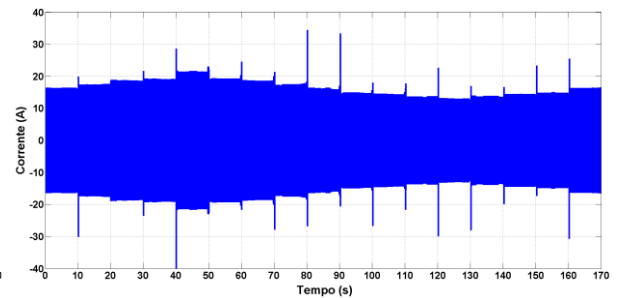
(b) Barra 2 - Carga: Computacional



(e) Barra 2 - Carga: Experimental



(c) Sec. do AT – Sec. Transformador Série:
Computacional

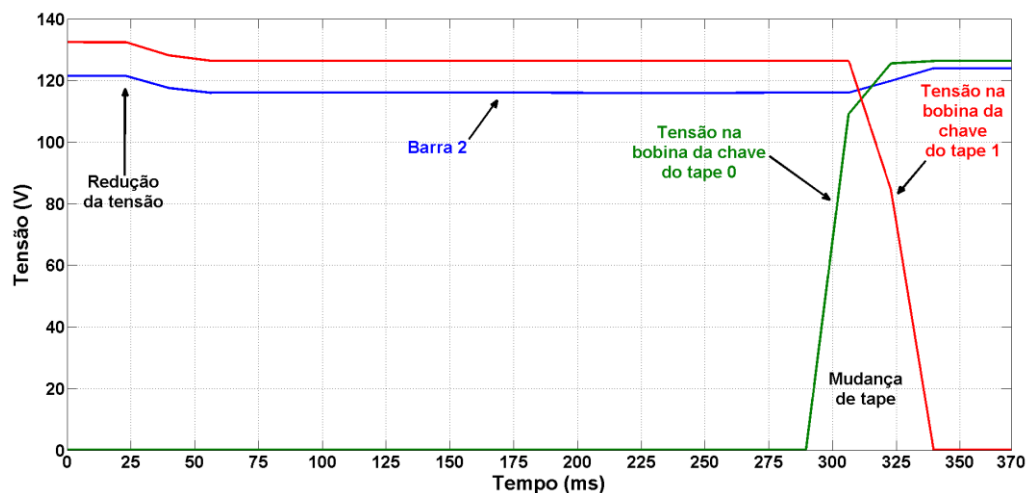


(f) Sec. do AT – Sec. Transformador Série:
Experimental

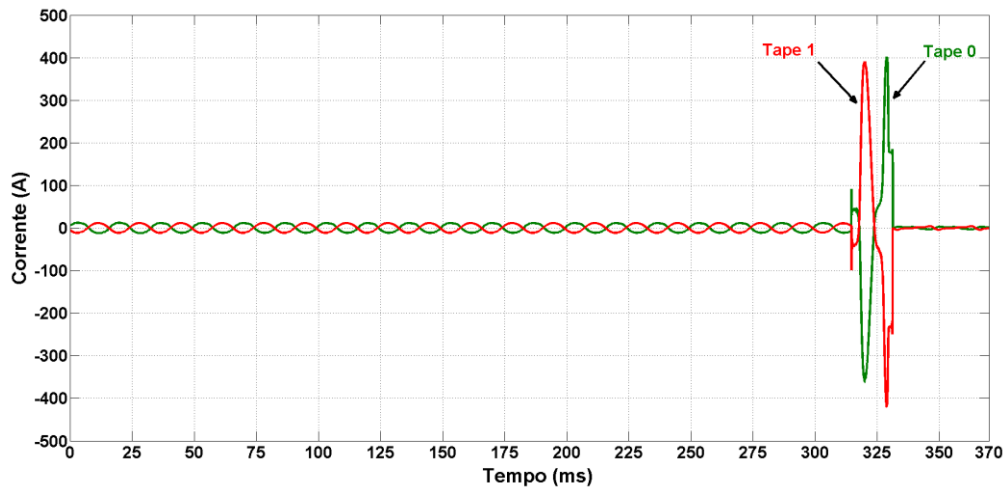
Figura 4.15 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores instantâneos – caso 1

Outro aspecto importante relacionado com o funcionamento do dispositivo regulador contemplado nessa pesquisa refere-se ao tempo de resposta do mesmo quando de sua ação restauradora da tensão. Como enfatizado ao longo do texto, a opção feita foi pelo emprego de chaveamentos discretos oferecidos por contadores acionados mecanicamente. Como decorrência disso, tem-se que, para o protótipo desenvolvido, a comutação entre cada um dos tapes, conforme estabelecido na lógica de operação do controle, necessita de cerca de 310 ms, ou seja, aproximadamente 19 ciclos. Essa constatação pode ser identificada na Figura 4.16 (a), a qual mostra o instante em que ocorreu uma redução da tensão na rede

e o momento para o qual, efetivamente, foi manifestada a adequação da tensão. Como se observa, após a queda da tensão, o controle necessitou do mencionado intervalo de tempo para processar a informação, definir o tape e executar o comando de atuação. Complementarmente, a Figura 4.16 (b) apresenta as corrente nos tapes 0 e 1 do autotransformador para o período em questão. Dessa última figura pode-se identificar as regiões de processamento dos cálculos (de 25 a 285 ms, ou, 16 ciclos) e o intervalo utilizado para a comutação dos tapes propriamente dito (entre 285 e 335 ms, ou 3 ciclos). Muito embora esta ilustração numérica sobre o tempo de resposta, vale lembrar que este depende fortemente do mecanismo de mudança de tapes empregado, portanto, a grandeza indicada reflete o processo empregado, para o caso, contatores comercialmente disponíveis. Naturalmente, outros mecanismos irão impor distintas condições operacionais que permitem ou limitam a atuação do processo de compensação para uma ou outra aplicação.



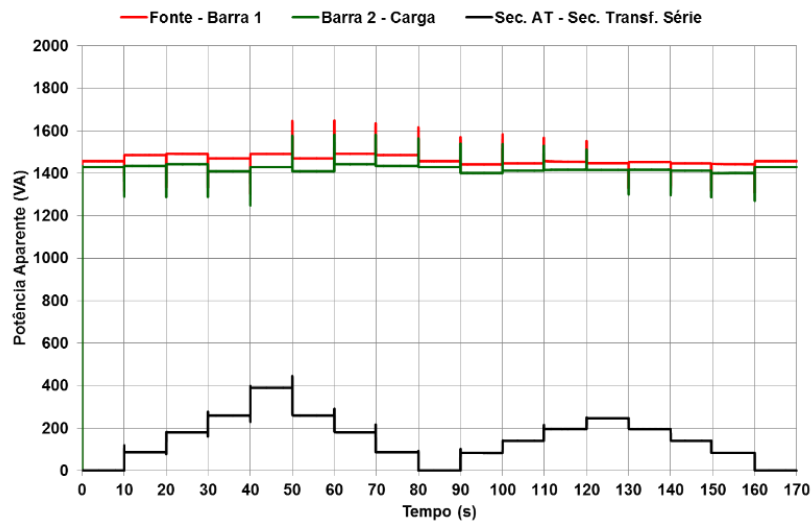
(a) Tensão na Barra 2 e no acionamento das chaves dos tapes 0 e 1



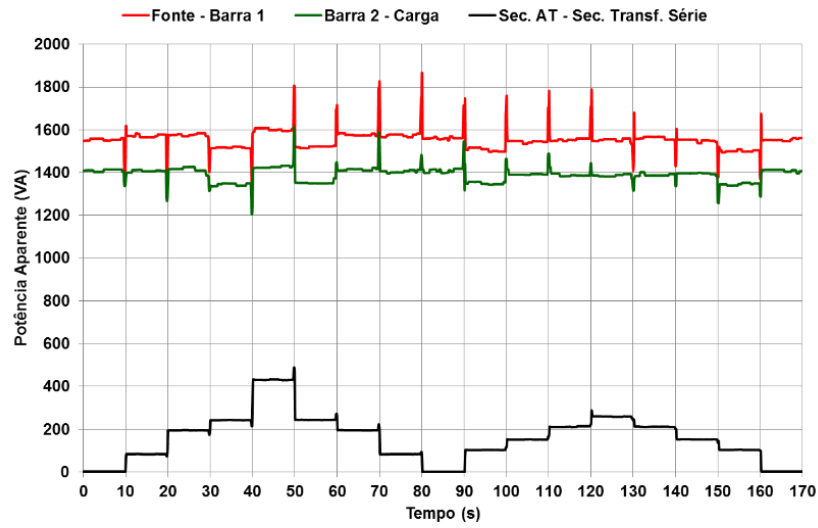
(b) Corrente nas chaves dos tapes 0 e 1

Figura 4.16 - Tempo de resposta do protótipo do RET

Por fim, no que tange às potências aparentes envolvidas no processo de compensação, a Figura 4.17 evidencia tais grandezas para os seguintes trechos: entre a fonte e a barra 1; entre a barra 2 e a carga; e, por fim, entre o secundário do autotransformador e o secundário do transformador série. Na Figura 4.17(a) tem-se os resultados computacionais e na Figura 4.17(b), os experimentais.



(a) Computacional



(b) Experimental

Figura 4.17 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador – caso 1

Complementarmente, a Tabela 4.3 ilustra os valores de relação percentual entre a potência aparente solicitada pelo RET em relação à correspondente grandeza solicitada pela carga, para as diversas variações da tensão de suprimento. Na tabela: S_{carga} indica a potência entregue à carga, S_{RET} corresponde ao complemento de potência injetada/absorvida pelo regulador e $\Delta S[\%]$ expressa o percentual da diferença entre ambas.

Tabela 4.3 - Potências na carga e no regulador proposto – caso 1

$\Delta V\%$	Computacional			Experimental		
	S_{carga} [VA]	S_{RET} [VA]	$\Delta S[\%]$	S_{carga} [VA]	S_{RET} [VA]	$\Delta S[\%]$
0	1429,6	0	0,0	1415	2	0,1
-5	1434,9	86,3	6,0	1406	83	5,9
-10	1443,1	180,2	12,5	1426	196	13,7
-15	1409,8	259,3	18,4	1349	242	17,9
-20	1429,7	389,8	27,3	1425	430	30,2
-15	1409,8	259,4	18,4	1350	243	18,0
-10	1443,1	180,2	12,5	1416	195	13,8
-5	1434,9	86,3	6,0	1402	83	5,9
0	1429,6	0	0,0	1414	2	0,1
+5	1401,4	82,9	5,9	1357	102	7,5
+10	1412,8	140,1	9,9	1394	151	10,8
+15	1416,6	195,5	13,8	1388	210	15,1
+20	1416,0	246,5	17,4	1389	260	18,7
+15	1417,0	195,4	13,8	1386	212	15,3
+10	1412,8	140,1	9,9	1397	152	10,9
+5	1401,1	82,9	5,9	1352	103	7,6
0	1429,7	0	0,0	1413	2	0,1

4.3.2 - Caso 02 – Estudo de desempenho através de variações de carga

As simulações e os estudos experimentais aqui realizados encontram-se atrelados com as análises de desempenho sob condições de inserção e súbitos alívios de cargas nos termos previstos pelo arranjo físico indicado pela Figura 4.18. É importante ressaltar que as cargas, para essa configuração, apresentam-se chaveáveis, propriedade essa decisiva para a produção de distúrbios súbitos atrelados com variações de carga e seus respectivos impactos sobre as tensões de suprimento. Portanto, desta feita, as variações das tensões não encontram-se associadas com programações feitas junto à fonte de alimentação, mas sim, a interdependência física: carga versus tensão.

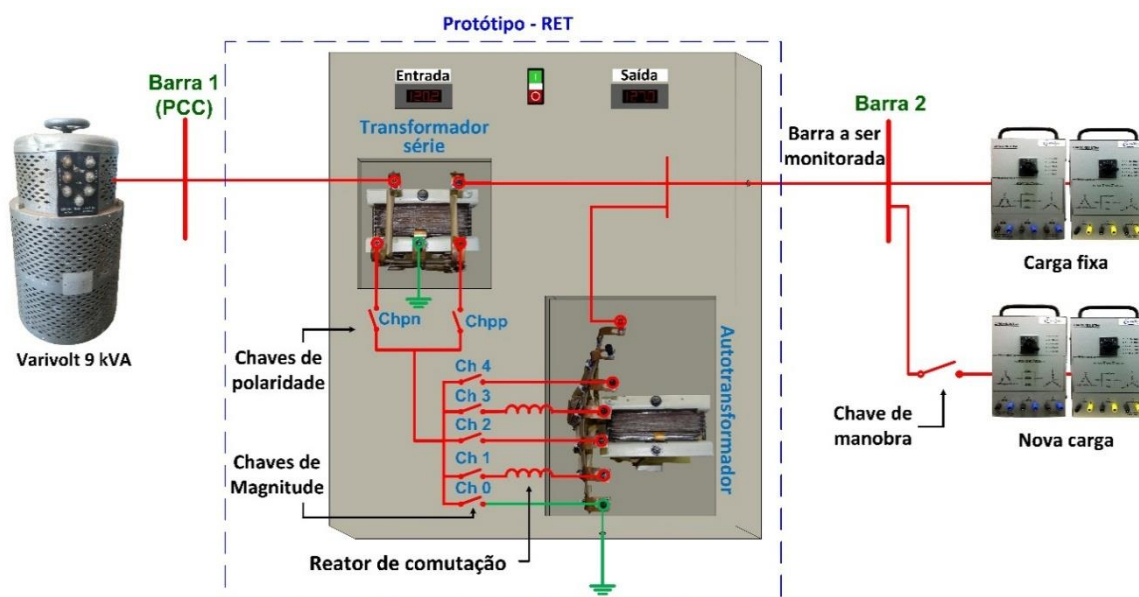


Figura 4.18 - Arranjo laboratorial utilizado para os experimentos - caso 02

Diante do exposto segue os trabalhos aqui realizados encontram-se apoiados em dois fenômenos: um primeiro vinculado com uma inserção de carga na barra 2 (aumento de 200% da carga original) e, um segundo, advindo de um súbito alívio de carga (redução de 66%) na mesma barra.

- **Inserção súbita de carga na barra 2:**

A Tabela 4.4 sintetiza as principais informações sobre o sistema simplificado adotado para os estudos aqui descritos, o qual possui a topologia indicada na Figura 4.18. Estas informações são empregadas quer para os trabalhos investigativos computacionais como experimentais.

Tabela 4.4 - Parâmetros do sistema e do regulador – caso 2: Inserção súbita de carga

Dados	Potência [VA]	Fator de Potência	Tensão [V]	Zcc %	Rcc %
Autotransformador	1500	-	127 com Tapes	3,5	2,27
Transformador Série	1500	-	50:50	3,5	1,73
Carga fixa	1230	0,94	127	-	-
Carga inserida	2450	0,98	127	-	-

A estrutura laboratorial, como indicada, se apresenta constituída por: uma fonte de suprimento na forma de um varivolt de 9 kVA ajustado em 127 V; uma carga inicial RL de 1230 VA e fator de potência 0,94 indutivo; e o protótipo do RET propriamente dito com potência de projeto de 1500 VA.

Os trabalhos aqui explorados envolvem uma situação de funcionamento que compreende três condições de operação:

- No primeiro intervalo, que vai de 0 a 11 s, apenas a carga de 1230 VA se encontra conectada;
- No intervalo de 11 a 37 s um incremento de carga, traduzido na forma de uma combinação RL, totalizando 2450 VA, é inserida na barra 2;
- Por fim, entre o intervalo de 37 a 50 s, o sistema retorna a condição inicial com apenas a carga de 1230 VA conectada.

Estes intervalos de tempo podem ser melhor visualizados na Figura 4.19, a qual mostra o perfil da tensão no consumidor durante todo intervalo de tempo em estudo (sem a atuação do RET). Complementarmente, a Tabela 4.5 fornece os correspondentes valores de tensão para cada intervalo de estudo considerado.

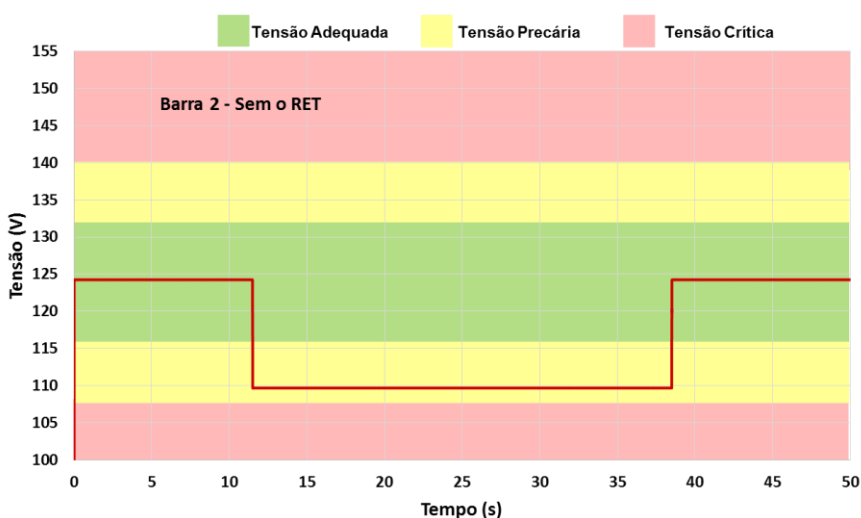
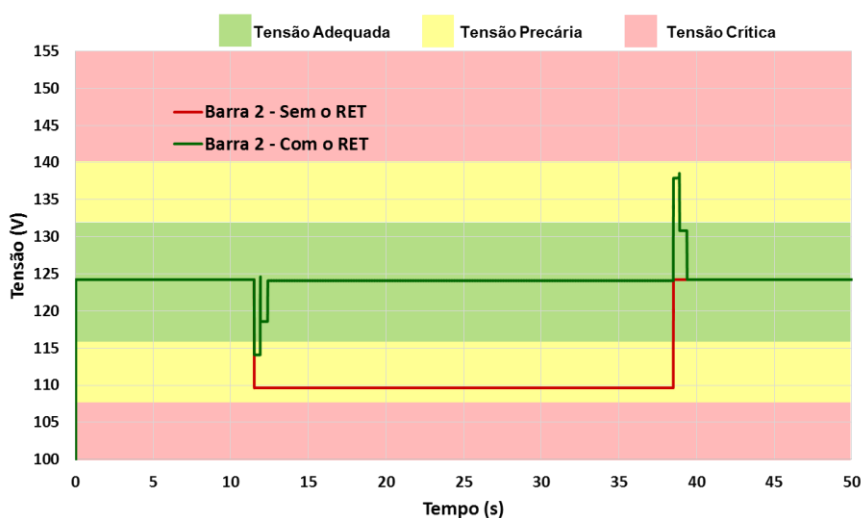


Figura 4.19 - Tensão medida na Barra 2 – sem a atuação do RET – caso 2: Inserção súbita de carga

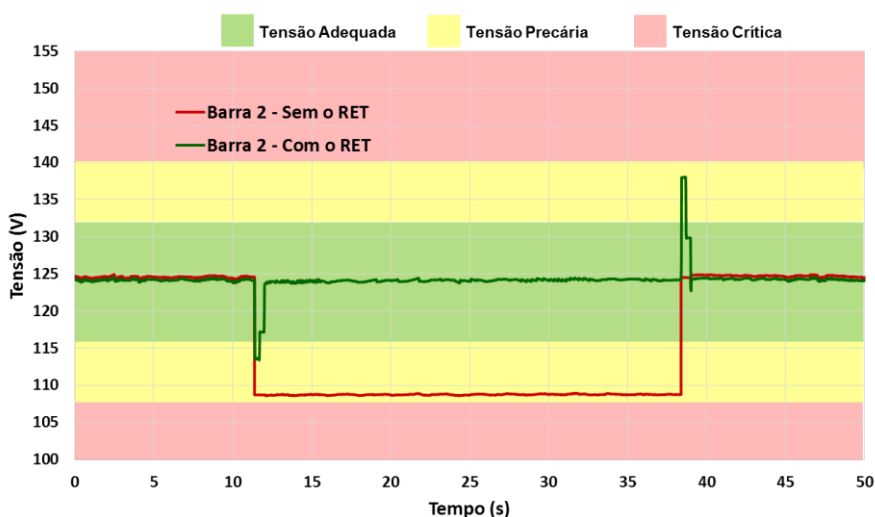
Tabela 4.5 - Tensão medida na barra 2 – sem a atuação do RET – caso 2: Inserção súbita de carga

Intervalos	Tempo [s]	Tensão [V]	$\Delta V\%$
Intervalo 1	0 a 11	124,2	2,2
Intervalo 2	11 a 37	109,6	-14
Intervalo 3	37 a 50	124,2	2,2

A Figura 4.20 ilustra as tensões eficazes registradas computacionalmente e experimentalmente na Barra 2 para as distintas situações impostas, sem e com a atuação do RET. 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. A Figura 4.20(a) mostra os resultados obtidos através da plataforma ATP e a Figura 4.20(b) ilustra o desempenho obtido laboratorialmente. Vale ressaltar que, o valor de tensão medido para a condição “sem o RET” se apresenta abaixo dos 127 V, pois o mesmo se encontra conectado à rede, mas sem a atuação dos tape, provocando assim, junto com a impedância da rede, uma queda na tensão. Portanto, nos intervalos 1 e 3, a tensão na barra da carga se encontra com uma redução de aproximadamente 3 V, quando comparada com a tensão nominal da rede, devido as quedas nas unidades eletromagnéticas tanto para a condição computacional como para a experimental.



(a) Computacional



(b) Experimental

Figura 4.20 - Tensão no Barra 2 – Sem e com o RET – caso 2: Inserção súbita de carga

Complementarmente, a Tabela 4.6 fornece os valores eficazes das tensões para a Barra 2 para as distintas situações avaliadas.

Tabela 4.6 - Tensão na Barra 2 – computacional e experimental – caso 2: Inserção súbita de carga

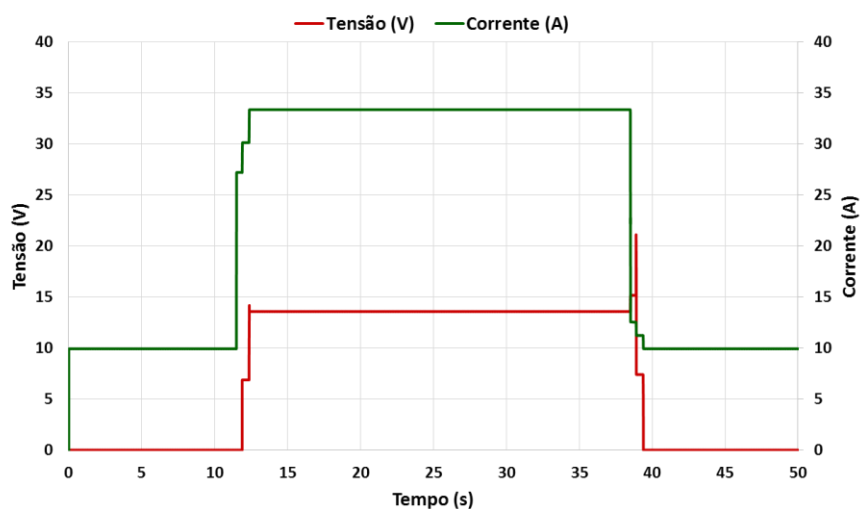
Tempo [s]	$\Delta V\%$	Computacional		Experimental	
		Sem RET [V]	Com RET [V]	Sem RET [V]	Com RET [V]
0 a 11	-2,2	124,2	124,2	124,1	124,0
11 a 37	-14	109,6	124,1	109,3	124,2
37 a 50	-2,2	124,2	124,2	124,1	124,0

Ao se analisar os resultados supra postos fica evidente que, não obstante a eficácia do processo de regulação implementado, pode-se identificar uma pequena divergência entre as compensações idealizadas e aquelas que efetivamente ocorreram. Como já foi mencionado anteriormente, isso se deve a quedas de tensão nas unidades eletromagnéticas.

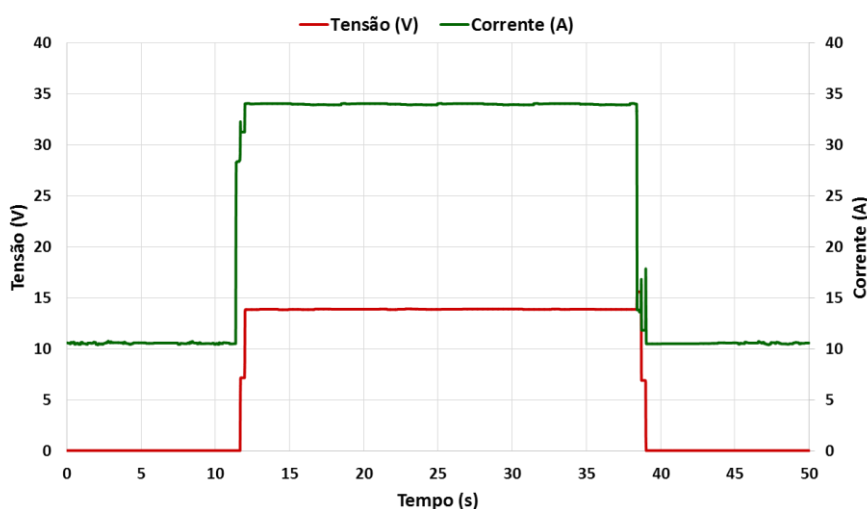
Pode-se constatar também, que a tensão para a condição experimental apresentou um pequeno nível de ruído provocado pelo varivolt utilizado como fonte supridora.

Quanto às tensões e correntes impostas pelo autotransformador na entrada do transformador série, a qual, para fins desse trabalho é identificada como o seu

secundário, essas se encontram fornecidas na Figura 4.21. A primeira das figuras está relacionada com os resultados oferecidos pela plataforma ATPDraw, enquanto que a Figura 4.21(b) evidencia as mesmas grandezas extraídas do protótipo.



(a) Computacional

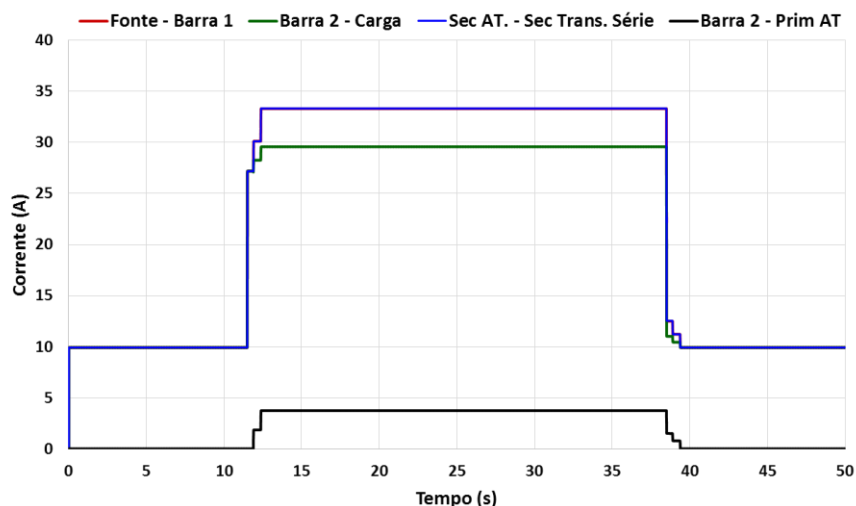


(b) Experimental

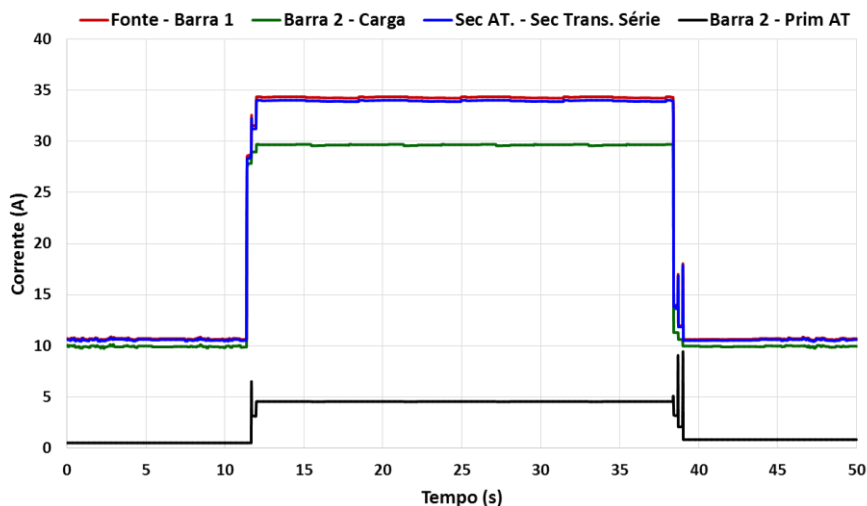
Figura 4.21 - Tensões e Correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores eficazes – caso 2: Inserção súbita de carga

Objetivando 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 4.22 mostra as correntes nos

diversos pontos da rede elétrica, a saber: entre a fonte e a barra 1; entre a barra 2 e a carga; entre o secundário do autotransformador e o secundário do transformador série; e, por fim, entre a barra 2 e o primário do autotransformador. A Figura 4.22(a) apresenta os resultados atrelados com os estudos computacionais e a Figura 4.22(b) com os valores alcançados através do experimento laboratorial.



(a) Computacional



(b) Experimental

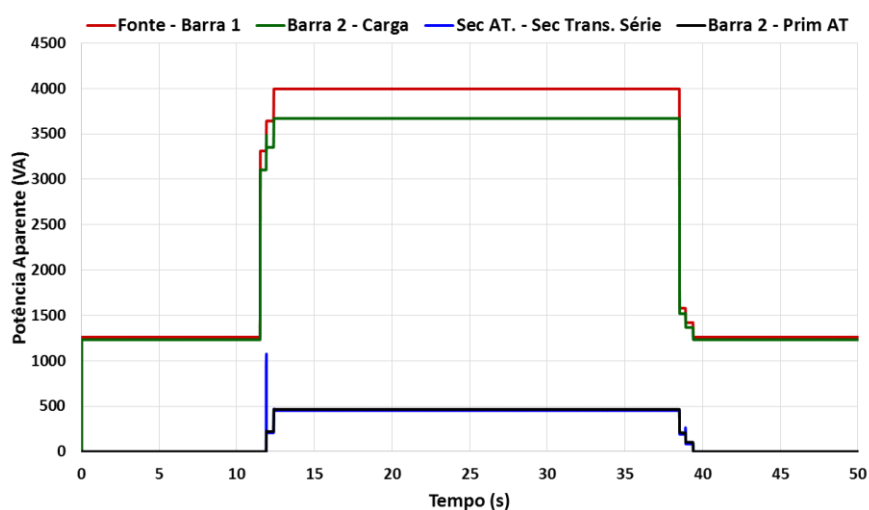
Figura 4.22 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores eficazes – caso 2:
Inserção súbita de carga

De modo complementar, a Tabela 4.7 fornece os valores eficazes das corrente para os trechos indicados.

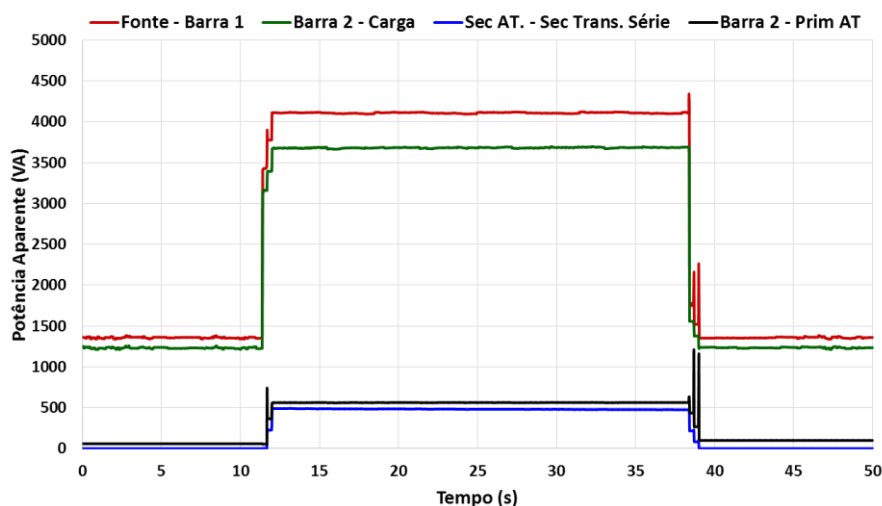
Tabela 4.7 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – caso 2: Inserção súbita de carga

Tempo [s]	Computacional				Experimental			
	Fonte – Barra 1 [A]	Barra 2 – Carga [A]	Sec. AT – Sec. Traf. Série [A]	Barra 2 – Prim. AT [A]	Fonte – Barra 1 [A]	Barra 2 – Carga [A]	Sec. AT – Sec. Traf. Série [A]	Barra 2 – Prim. AT [A]
0 a 11	9,9	9,9	9,9	0	10,6	10,2	10,6	0,4
11 a 37	33,3	29,6	33,3	3,7	34,6	29,6	34,6	5,0
37 a 50	9,9	9,9	9,9	0	10,5	9,8	10,5	0,7

Por fim, no que tange às potências aparentes envolvidas no processo de compensação, a Figura 4.23 evidencia tais grandezas para os mesmos trechos já apresentados anteriormente para as corrente. Na Figura 4.23(a) tem-se os resultados computacionais e na Figura 4.23(b), os experimentais.



(a) Computacional



(b) Experimental

Figura 4.23 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador – caso 2: Inserção súbita de carga

Complementarmente, a Tabela 4.8 ilustra os valores de relação percentual entre a potência aparente solicitada pelo RET em relação à correspondente grandeza solicitada pela carga, para as três variações da tensão de suprimento. Na tabela: S_{carga} indica a potência entregue à carga, S_{RET} corresponde ao complemento de potência injetada/absorvida pelo regulador e $\Delta S[\%]$ expressa o percentual da diferença entre ambas. No estudo computacional, a inexistência de potência no RET para a condição sem variação se justifica pela presença da chave TACs no primário do autotransformador.

Tabela 4.8 - Potências na carga e no regulador proposto – caso 2: Inserção súbita de carga

$\Delta V\%$	Computacional			Experimental		
	S_{carga} [VA]	S_{RET} [VA]	$\Delta S[\%]$	S_{carga} [VA]	S_{RET} [VA]	$\Delta S[\%]$
0	1232,6	0	0,0	1253,3	59,6	0,4
-5,6	3669,8	452,2	12,3	3525,5	631,0	17,9
0	1232,6	0	0,0	1253,3	59,6	0,4

- **Alívio súbito de carga na barra 2:**

De modo similar aos estudos de inserção de carga, a Tabela 4.9 sintetiza as principais informações sobre o sistema simplificado adotado para os estudos de alívio de carga, o qual possui a mesma topologia indicada na Figura 4.18. Estas informações são empregadas quer para os trabalhos investigativos computacionais como experimentais.

Tabela 4.9 - Parâmetros do alimentador radial utilizado – caso 2: Alívio súbito de carga

Dados	Potência [VA]	Fator de Potência	Tensão [V]	Zcc %	Rcc %
Autotransformador	1500	-	127 com Tapes	3,5	2,27
Transformador Série	1500	-	50:50	3,5	1,73
Carga inicial	3680	0,97	127	-	-
Carga desligada	2450	0,98	127	-	-

A estrutura laboratorial é constituída pelos mesmos equipamentos do caso anterior, a diferença agora está no consumidor, cuja carga inicial é de 3680 VA com fator de potência de 0,97 indutivo, representado por um circuito RL paralelo.

Os trabalhos aqui explorados também envolvem uma situação de funcionamento que compreende três condições de operação:

- No primeiro intervalo, que vai de 0 a 20 s, a carga de 3680 VA se encontra conectada;
- No intervalo de 20 a 70 s ocorre um alívio de carga de 2450 VA da barra 2, e, por fim;
- Entre o intervalo de 70 a 90 s o sistema retorna a condição inicial com a carga de 3680 VA conectada.

Estes intervalos de tempo podem ser visualizados na Figura 4.24, que mostra o perfil da tensão do consumidor durante todo intervalo de tempo em estudo. Complementarmente, a Tabela 4.10 fornece os correspondentes valores de tensão para cada intervalo de estudo considerado.

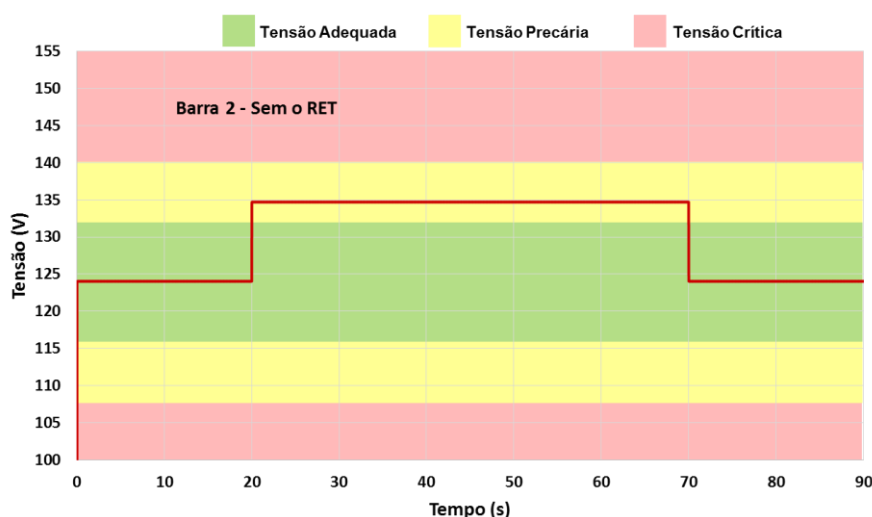


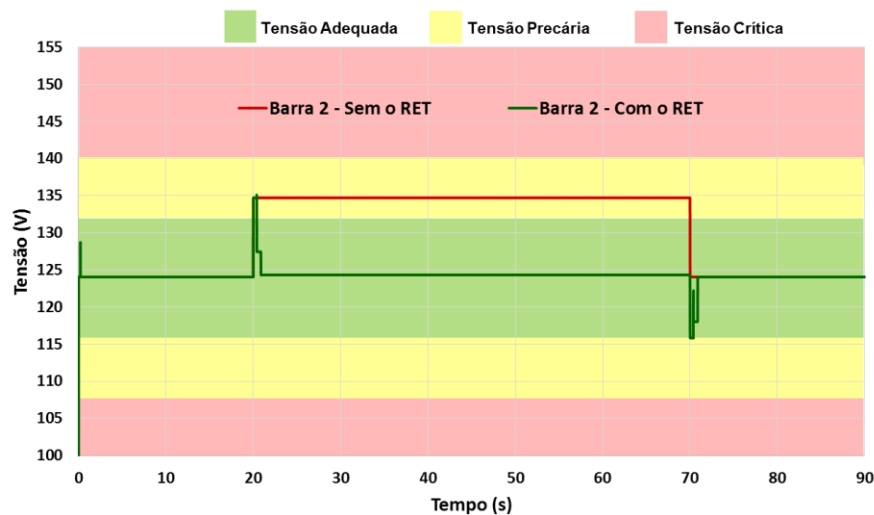
Figura 4.24 – Tensão medida na Barra 2 – sem a atuação do RET - caso 2: Alívio súbito de carga

Tabela 4.10 - Tensão medida na barra 2 – sem a atuação do RET - caso 2: Alívio súbito de carga

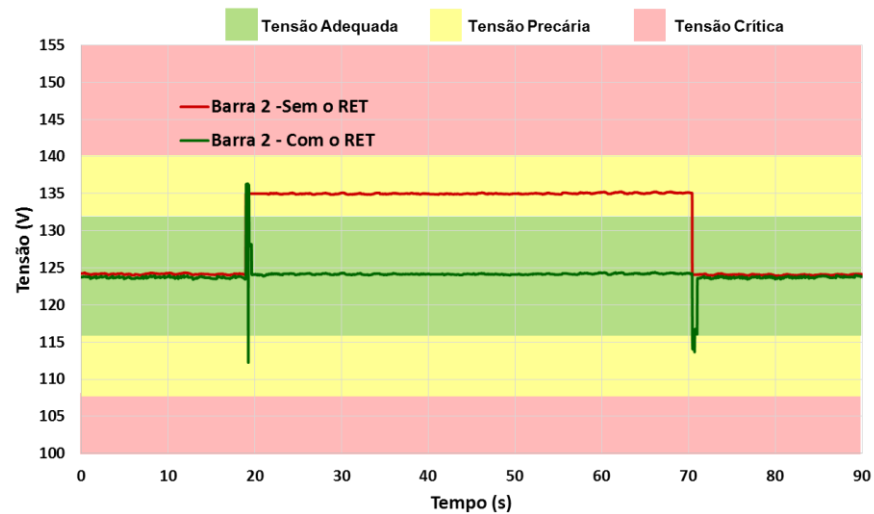
Intervalos	Tempo [s]	Tensão [V]	$\Delta V\%$
Intervalo 1	0 a 20	124,0	-2,3
Intervalo 2	20 a 70	134,7	6
Intervalo 3	70 a 90	124,0	-2,3

Devido a presença do RET no sistema, e como já foi constatado no caso anterior, a tensão na carga se equivale a condição inicial de 124 V e o regulador de tensão se encontra no tape 0, ou seja, sem compensação.

A Figura 4.25 ilustra as tensões eficazes registradas computacionalmente e experimentalmente na Barra 2 para as distintas situações impostas, sem e com a atuação do RET. 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. A Figura 4.25(a) mostra os resultados obtidos através da plataforma ATP e a Figura 4.25(b) ilustra o desempenho obtido laboratorialmente. Tanto para a condição computacional como para a experimental, houve a regulação por parte do RET de modo a manter a tensão na carga o mais próximo dos 127 V quando da ocorrência do alívio de carga.



(a) Computacional



(b) Experimental

Figura 4.25 - Tensão na barra 2 – Com e sem o RET - caso 2: Alívio súbito de carga

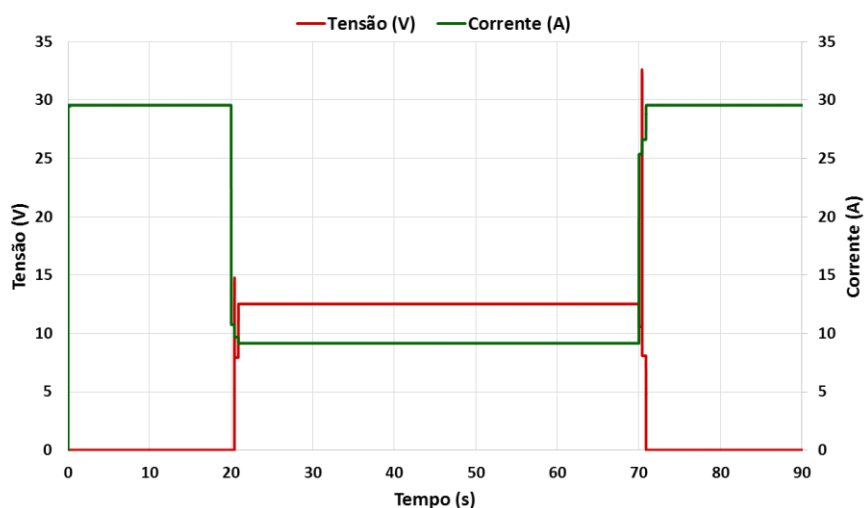
Complementarmente, a Tabela 4.11 fornece os valores eficazes das tensões para o barramento 2 nas distintas situações avaliadas.

Tabela 4.11 - Tensão na Barra 2 – computacional e experimental - caso 2: Alívio súbito de carga

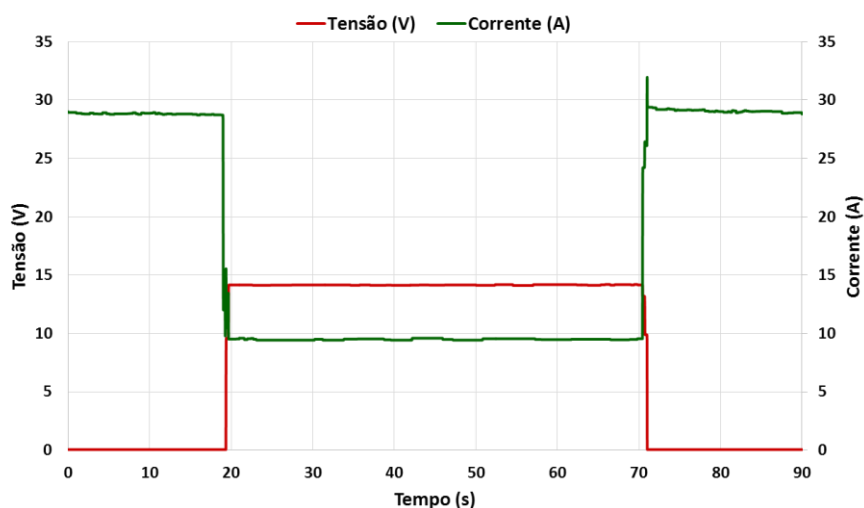
Tempo [s]	$\Delta V\%$	Computacional		Experimental	
		Sem RET [V]	Com RET [V]	Sem RET [V]	Com RET [V]
0 a 20	-2,3	124,0	124,0	123,8	123,8
20 a 70	6	134,7	124,3	134,9	124,1
70 a 90	-2,3	124,0	124,0	123,8	123,8

De modo similar aos demais casos, pode-se identificar uma pequena divergência entre as compensações idealizadas e aquelas que efetivamente ocorreram. Como já foi mencionado anteriormente, isso se deve a quedas de tensão nas unidades eletromagnéticas e nas impedâncias do sistema.

Quanto às tensões e correntes impostas pelo autotransformador na entrada do transformador série, essas se encontram fornecidas na Figura 4.26. A primeira das figuras está relacionada com os resultados oferecidos pela plataforma ATPDraw, enquanto que a Figura 4.26(b) evidencia as mesmas grandezas extraídas do protótipo.



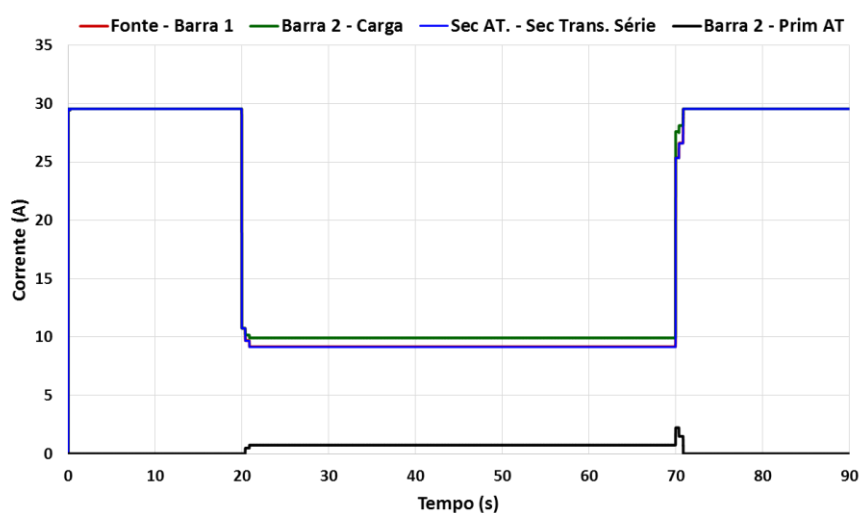
(a) Computacional



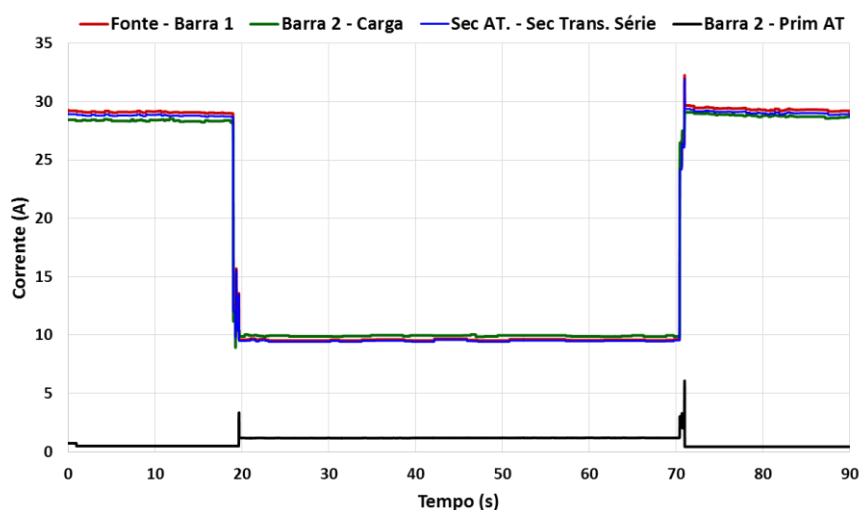
(b) Experimental

Figura 4.26 - Tensões e Correntes impostas pelo autotransformador ao secundário do transformador série – valores eficazes - caso 2: Alívio súbito de carga

Objetivando 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 4.27 mostra as correntes nos diversos pontos da rede elétrica, a saber: entre a fonte e a barra 1; entre a barra 2 e a carga; entre o secundário do autotransformador e o secundário do transformador série; e, por fim, entre a barra 2 e o primário do autotransformador. A Figura 4.27(a) apresenta os resultados atrelados com os estudos computacionais e a Figura 4.27(b) com os valores alcançados através do experimento laboratorial.



(a) Computacional



(b) Experimental

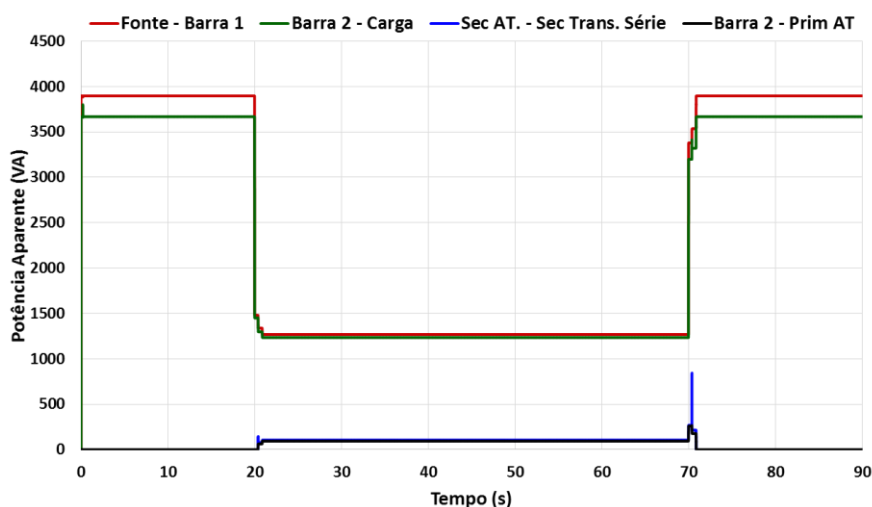
Figura 4.27 - Correntes nos diversos trechos do alimentador – valores eficazes - caso 2:
Alívio súbito de carga

De modo complementar, a Tabela 4.12 fornece os valores eficazes das corrente para os trechos indicados.

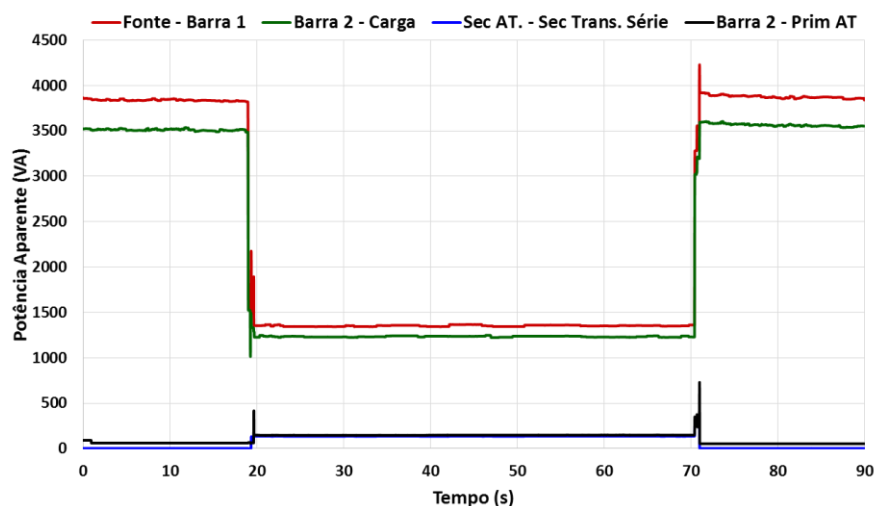
Tabela 4.12 - Correntes nos diversos trechos do alimentador - caso 2: Alívio súbito de carga

Tempo [s]	Computacional				Experimental			
	Fonte – Barra 1 [A]	Barra 2 – Carga [A]	Sec. AT – Sec. Traf. Série [A]	Barra 2 – Prim. AT [A]	Fonte – Barra 1 [A]	Barra 2 – Carga [A]	Sec. AT – Sec. Traf. Série [A]	Barra 2 – Prim. AT [A]
0 a 11	29,5	29,5	29,5	0	29,1	28,3	28,8	0,5
11 a 37	9,2	9,8	9,1	0,7	9,6	9,9	9,4	1,1
37 a 50	29,5	29,5	29,5	0	29,1	28,3	28,8	0,5

No que tange às potências aparentes envolvidas no processo de compensação, a Figura 4.28 evidencia tais grandezas para os mesmos trechos já apresentados anteriormente para as corrente. Na Figura 4.28(a) tem-se os resultados computacionais e na Figura 4.28(b), os experimentais.



(a) Computacional



(b) Experimental

Figura 4.28 - Potências aparentes nos diversos trechos do alimentador - caso 2: Alívio súbito de carga

Complementarmente, a Tabela 4.13 ilustra os valores de relação percentual entre a potência aparente solicitada pelo RET em relação à correspondente grandeza solicitada pela carga, para as três variações da tensão de suprimento.

Tabela 4.13 - Potências na carga e no regulador proposto - caso 2: Alívio súbito de carga

$\Delta V\%$	Computacional			Experimental		
	S_{carga} [VA]	S_{RET} [VA]	$\Delta S[\%]$	S_{carga} [VA]	S_{RET} [VA]	$\Delta S[\%]$
0	3666,8	0	0,0	3836,9	60,2	1,5
8,6	1234,1	103,3	8,7	1350,7	148,3	12,0
0	3666,8	0	0,0	3836,9	60,2	1,5

4.4 - ESTUDOS DE DESEMPENHO COMPUTACIONAL UTILIZANDO O SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS

Os estudos que se seguem visam, sobretudo, evidenciar a operacionalidade do regulador de tensão proposto para uma rede elétrica com características identificadas com um complexo comercial.

Para tanto, dentre uma diversidade de situações passíveis de investigações, e, adicionalmente aos estudos experimentais apresentados na seção anterior, optou-se, desta feita, pela escolha do conhecido sistema IEEE 14 barras para fins dos trabalhos investigativos, de cunho computacional.

Não obstante o emprego de sua topologia e parâmetros clássicos, em sintonia com a concepção original deste sistema, uma alteração relacionada com um dos barramentos foi imposta para melhor caracterização dos efeitos aqui explorados. Esta mudança ocorreu na forma de inserção de um carregamento de 45 MVA à Barra 1, a qual, originalmente, se apresentava apenas como geração. Isto para que os níveis de variações de tensão viessem a ser incrementados e, assim, ressaltar com maior eficiência o processo de restauração das tensões nos termos propostos pelo equipamento sob avaliação.

À luz do exposto segue que o sistema teste se apresenta nos termos indicados na Figura 4.29, onde se constata a presença de: geradores síncronos; compensadores síncronos de reativos; cargas trifásicas tipo impedância constante e definidas pelos seus equivalentes de consumo; linhas de transmissão e transformadores.

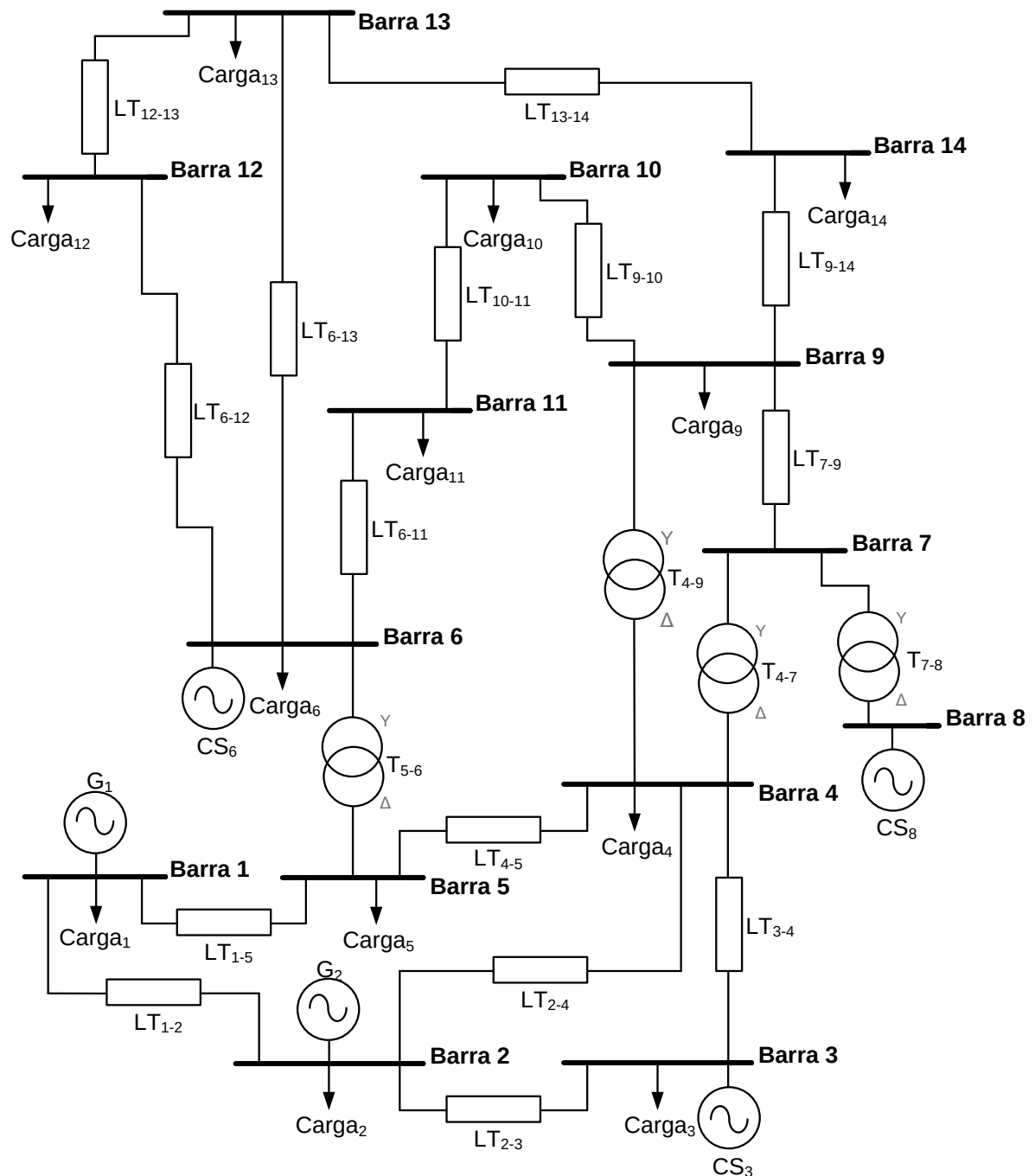


Figura 4.29 - Sistema elétrico IEEE 14 barras

A Tabela 4.14 ilustra os parâmetros dos elementos constituintes do arranjo em pauta.

Tabela 4.14 - Parâmetros dos elementos constituintes do sistema IEEE 14 barras

Parâmetros dos Elementos do Sistema IEEE 14 barras				
Elementos				
Máquinas Síncronas	V _n [kV]	Potência [MVA]	R [Ω]	L [mH]
G ₁	69	615	0	18,438
G ₂	12,8	60	0,246	221,001
CS ₃	69	60	0,246	221,001
CS ₆	13,8	25	0,011	25,257
CS ₈	18	25	0,011	25,257
Cargas P+jQ	V _n [kV]	Potência [MVA]	P [MW]	Q [MVar]
Carga ₁	69	45,00	43,2	12,6
Carga ₂	69	25,14	21,7	12,7
Carga ₃	69	96,10	94,2	19,0
Carga ₄	69	48,97	47,8	3,9
Carga ₅	69	7,77	7,6	1,8
Carga ₆	13,8	13,28	11,2	7,5
Carga ₉	13,8	33,85	29,5	16,6
Carga ₁₀	13,8	10,71	9,0	5,8
Carga ₁₁	13,8	3,94	3,5	1,8
Carga ₁₂	13,8	6,31	6,1	1,6
Carga ₁₃	13,8	14,69	13,5	5,8
Carga ₁₄	13,8	15,72	14,9	5,0
Linhas de Transmissão	V _n [kV]	R [Ω]	L [mH]	C [μF]
LT 1-2	69	0,923	7,473	2,942
LT 1-5	69	2,572	28,17	2,741
LT 2-3	69	2,237	25,00	2,440
LT 2-4	69	2,767	22,27	2,084
LT 2-5	69	2,711	21,96	1,894
LT 3-4	69	3,190	21,60	1,928
LT 5-4	69	0,636	5,318	0,713
LT 6-11	13,8	0,181	1,005	-
LT 6-12	13,8	0,234	1,292	-
LT 6-13	13,8	0,126	0,658	-
LT 7-9	13,8	0	0,556	-
LT 9-10	13,8	0,061	0,427	-
LT 9-14	13,8	0,242	1,366	-
LT 10-11	13,8	0,156	0,970	-
LT 12-13	13,8	0,421	1,010	-
LT 13-14	13,8	0,341	1,758	-
Transformadores	Relação de transformação	Potência [MVA]	Reatância X _L %	Razão de TAPE
T 4-7	69/13,8	50	7%	0,978
T 4-9	69/13,8	20	7%	0,969
T 5-6	69/13,8	45	7%	0,932
T 7-8	18/13,8	40	5%	1

Para este arranjo, com características topológicas malhadas, fato este que lhe confere maior robustez diante das anomalias factíveis de manifestação numa rede elétrica, foi adotado um conjunto de diversas situações anômalas de funcionamento, como perdas de linha e de unidades geradoras, rejeições de carga e curtos-circuitos em diversos pontos do sistema. Após uma série de estudos avaliativos realizados no sistema, concluiu-se que a barra que experimentou índices mais severos de variações de tensão de curta e longa duração, foi a de número 14.

Admitindo-se que a Carga₁₄ suprida por essa barra necessite de uma regularização da tensão nos termos aqui almejados, e sabendo que o RET só atua em sistemas radiais, optou-se pelo dimensionamento e instalação do regulador eletromagnético de tensão (RET) neste ponto do sistema elétrico. Em outros termos, posto que exista a necessidade de se manter uma operação contínua de alguns equipamentos conectados à Barra 14, os estudos em foco visam avaliar o comportamento dos perfis de tensões disponibilizadas a tais cargas perante a instalação de tal equipamento regulador de tensão.

No que se refere ao dimensionamento do RET diante das condições impostas pela rede e da carga a que se pretende atender, a Tabela 4.15 sintetiza as principais informações paramétricas do equipamento. A potência adotada de 3 MVA para o RET foi tomada por base 20% da potência da carga.

Tabela 4.15 - Parâmetros do RET - sistema IEEE

DADOS	POTÊNCIA [MVA]	TENSÃO [V]	ZCC%	RCC%	I0%
AUTOTRANSFORMADOR	3	7967/TAPES	5	1	0,4
TRANSFORMADOR SÉRIE	3	1:1	5	1	0,4

Quanto aos tapes disponibilizados pelo autotransformador, estes foram selecionados como sendo de: 5%, 10%, 15%, 20% e 25% da tensão nominal do

barramento, os quais disponibilizam valores de tensão que podem ser utilizados de forma aditiva ou subtrativa dependendo da chave de polaridade a ser utilizada.

A Figura 4.30 ilustra a instalação do RET na Barra 14 alimentando a Carga₁₄. Ainda, dentre o vasto número de possibilidades quando a natureza dos distúrbios passíveis de manifestação na rede, optou-se pela escolha de 3 casos, sendo estes identificados na Tabela 4.16 e evidenciados na mencionada figura.

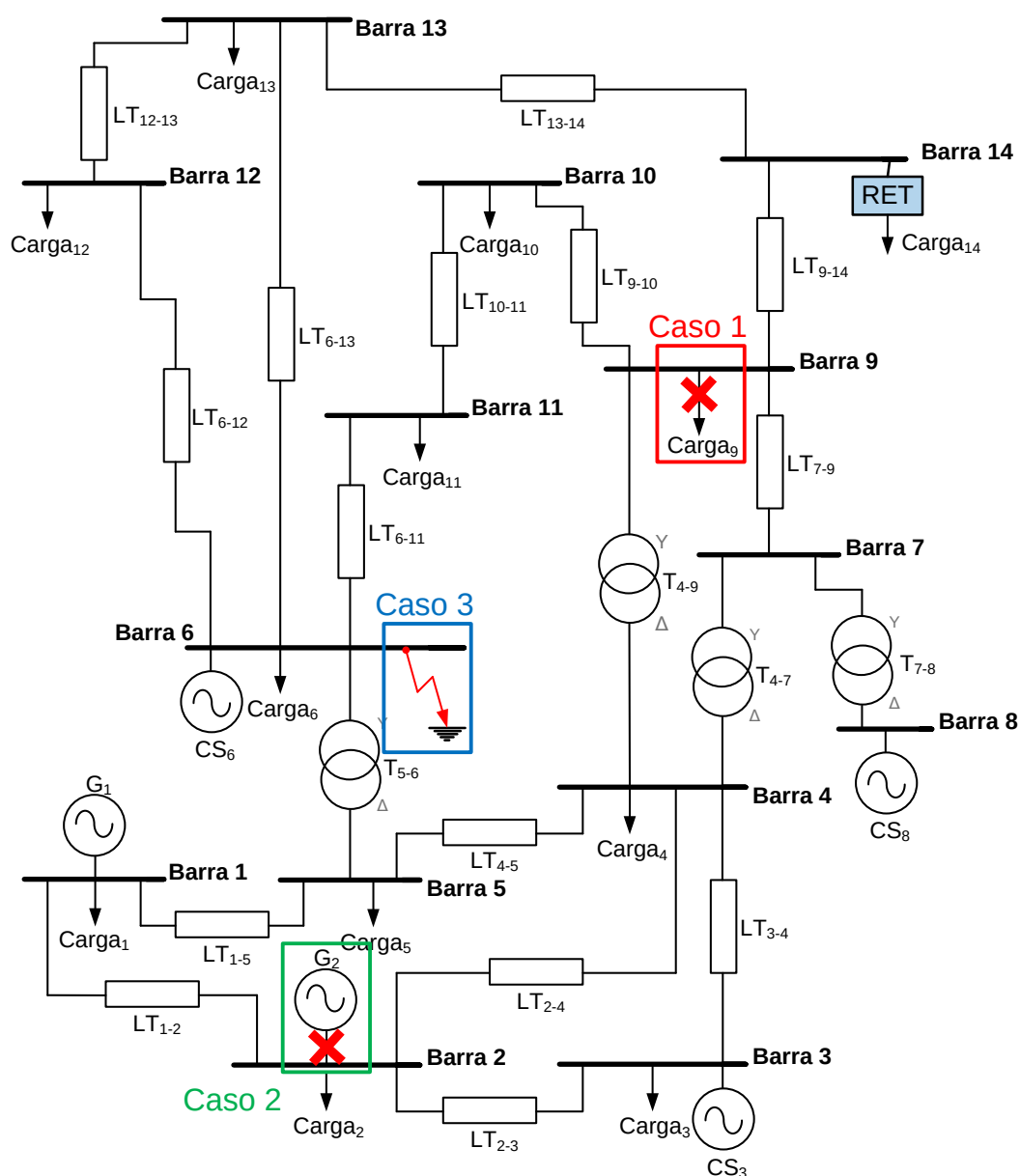


Figura 4.30 - Casos de estudo inseridos no sistema elétrico IEEE 14 barras

Tabela 4.16 – Casos investigados - sistema IEEE

Casos	Fato que originou o distúrbio	Tempo de simulação [s]	Intervalo de duração	Fenômeno
1	Rejeição de carga da Barra 9	3	De 1 a 2 seg.	Elevação
2	Perda de geração na Barra 2	3	De 1 a 2 seg.	Afundamento
3	Curto-circuito trifásico na Barra 6	3	De 1 a 2 seg.	Afundamento

Os resultados obtidos para os estudos ora identificados se apresentam pois na forma de 3 (três) casos, como a seguir:

- **Caso 1** - Rejeição de carga na Barra 9;
- **Caso 2** - Perda de geração na Barra 2;
- **Caso 3** - Curto-circuito trifásico na Barra 6;

➤ **Caso 1: Rejeição de carga na Barra 9**

A Figura 4.31 ilustra a tensão registrada computacionalmente perante a atuação do equipamento RET, inserido na Barra 14, a partir do estabelecimento da rejeição de carga da Barra 9. O resultado evidencia que, apesar do estabelecimento da elevação de tensão na Barra 14, após a inserção do compensador, a tensão do barramento da carga permanece dentro dos limites considerado adequados em relação às diretrizes estabelecidas no módulo 8 do PRODIST. Portanto, a atuação do equipamento mostrou-se eficiente nessa abordagem. A Tabela 4.17 apresenta os valores encontrados.

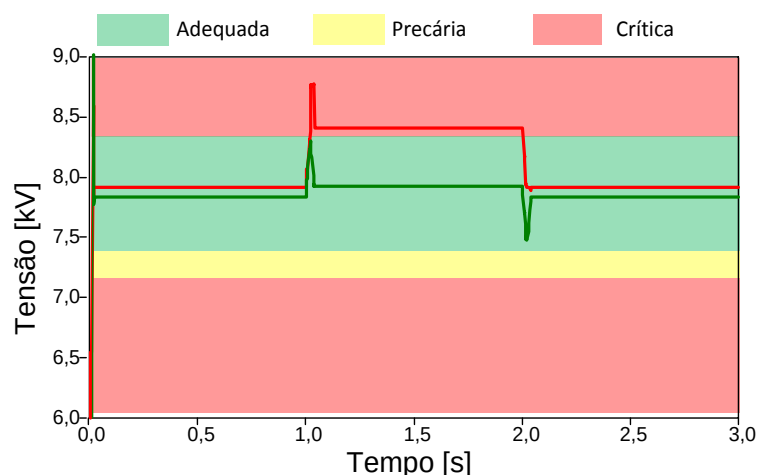


Figura 4.31 - Perfil da tensão da fase A na Barra 14 (vermelha) e na barra da Carga₁₄ (verde), com atuação do RET – Rejeição de carga na Barra 9

Tabela 4.17 – Valores da tensão da fase A na barra 14 – rejeição de carga na barra 9

Tempo	Tensão [V] – Barra 14	Tensão [V] – Carga ₁₄
0 a 1	7913	7830
1 a 2	8410	7933
2 a 3	7913	7830

➤ Caso 2: Perda de geração na Barra 2

Na Figura 4.32 é apresentado o perfil da tensão da fase A na Barra 14 resultante da perda de geração ocorrida na Barra 2. Novamente, fica claro que, existe eficácia na atuação do equipamento regulador para a Carga₁₄, o qual restaura a tensão ao seu valor adequado de suprimento para a carga. A Tabela 4.18 apresenta um resumo do desempenho indicado na Figura 4.32.

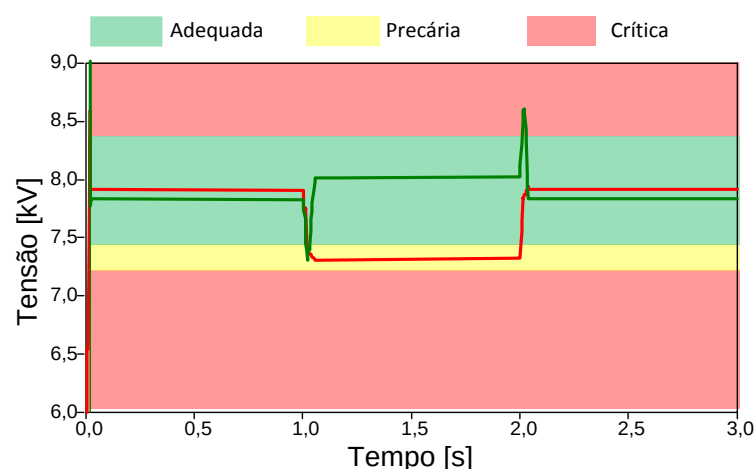


Figura 4.32 - Perfil da tensão da fase A na Barra 14 (vermelha) e na barra da Carga₁₄ (verde), com atuação do RET – Perda de geração na Barra 2

Tabela 4.18 – Valores da tensão da fase A na Barra 14 – perda de geração na barra 2

Tempo	Tensão [V] – Barra 14	Tensão [V] – Carga ₁₄
0 a 1	7913	7830
1 a 2	7210	8013
2 a 3	7913	7830

➤ Caso 3: Curto-circuito trifásico na Barra 6

A Figura 4.33 apresenta o perfil da tensão para o estudo associado com o curto-circuito trifásico na Barra 6. Para este caso, é evidenciado que o nível de afundamento de tensão atinge proporções superiores ao caso anterior. Uma vez inserido o RET, mais uma vez fica ratificada a restauração dos níveis de tensão aos patamares adequados. A Tabela 4.19 sintetiza os resultados obtidos.

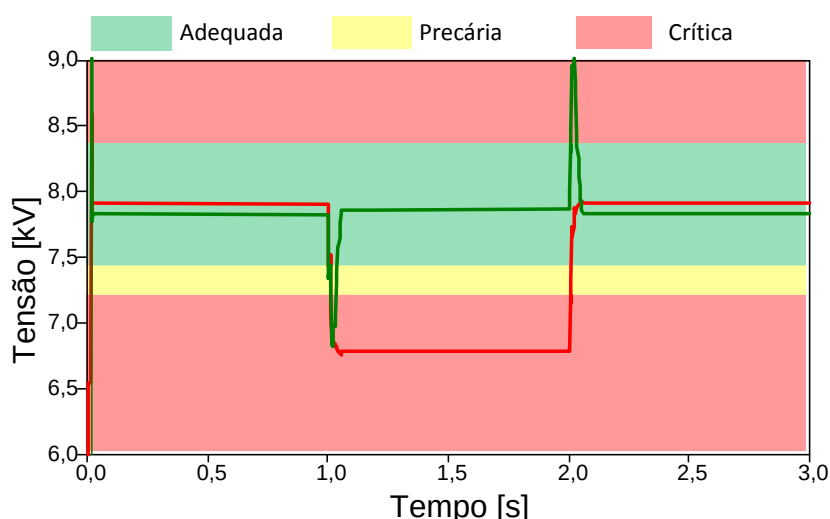


Figura 4.33 - Perfil da tensão da fase A na Barra 14 (vermelha) e na barra da Carga₁₄ (verde), com atuação do RET – Curto-circuito trifásico na Barra 6

Tabela 4.19 – Valores da tensão da fase A na Barra 14 – curto-circuito trifásico na barra 6

Tempo	Tensão [V] – Barra 14	Tensão [V] – Carga ₁₄
0 a 1	7913	7830
1 a 2	6786	7862
2 a 3	7913	7830

Complementando as informações relacionadas com a operação do sistema diante das anomalias investigadas, e ainda, visando obter indicativos sobre os níveis de potências requeridas pelo RET e carga, tem-se, na Figura 4.34, os resultados atrelados com o restaurador de tensão propriamente dito. Os valores

indicados enfatizam, com clareza, que as potências requeridas pelo compensador se apresentam em proporções bastante inferiores à da carga. A Tabela 4.20 ilustra os valores envolvidos no processo de compensação.

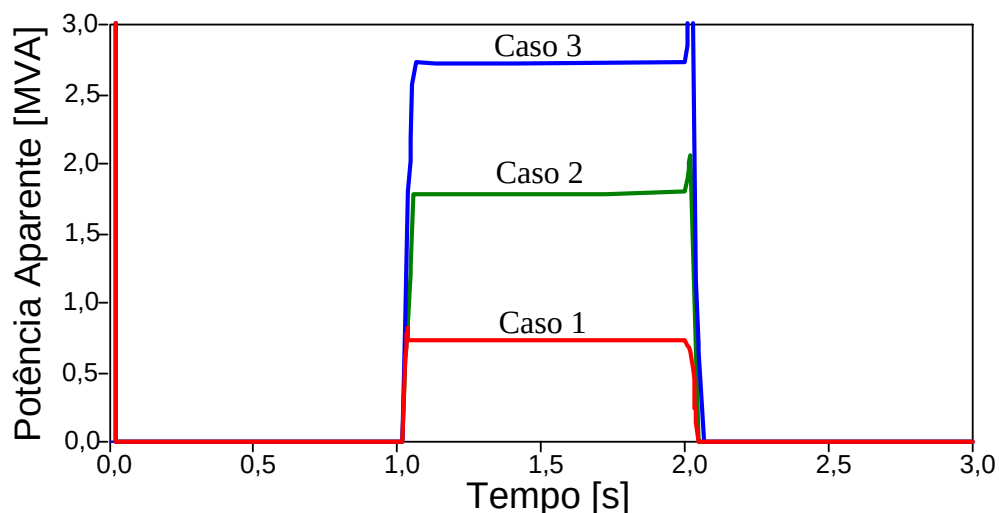


Figura 4.34 - Potência aparente solicitada pelo RET para fins de compensação de tensão – 3 casos de análise

Tabela 4.20 – Potência aparente solicitada pelo RET para fins de compensação de tensão – 3 casos de análise

	Potência do RET [MVA]	Potência da Carga ₁₄ [MVA]	Potência % do RET
Rejeição de Carga na Barra 9	0,74	15,72	4,7
Perda de geração da Barra 2	1,79	15,72	11,4
Curto-circuito na Barra 6	2,72	15,72	17,3

Por fim, é mostrado através da Figura 4.35 que a potência aparente da carga manteve-se constante para todo o período de simulação dos casos, evidenciando, assim, que a atuação do equipamento mantém o suprimento da carga em questão sem qualquer alteração significativa.

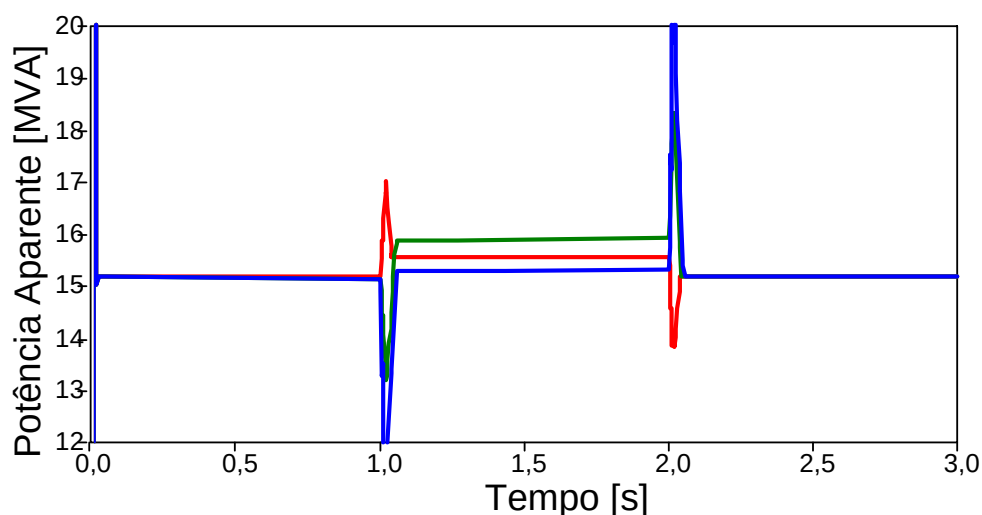


Figura 4.35 - Potência Aparente na barra da Carga₁₄

A Tabela 4.21 resume os valores encontrados para as tensões na Barra 14 para cada um dos fenômenos ocorridos, em que pese o regime anterior, durante e após a manifestação do distúrbio em pauta. Também, são indicados os desempenhos associados com a operação sem e com a inserção do RET.

Tabela 4.21 – Característica e magnitude do fenômeno manifestado na barra 14

Casos	Distúrbio	Fenômeno ocorrido na Barra 14	Tensão sem o RET	Tensão com o RET
1	Rejeição de carga da Barra 9	Elevação	1,06	0,99
2	Perda de geração na Barra 2	Afundamento	0,90	1,01
3	Curto-circuito trifásico na Barra 6	Afundamento	0,85	0,99

4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse Capítulo dedicou-se ao estabelecimento de um processo de validação do dispositivo regulador de tensão em foco. Para tanto, foram idealizados, num primeiro momento, dois procedimentos, um associado com a montagem de um arranjo laboratorial através do qual foram impostas variações para as tensões de suprimento, e um segundo, reproduzindo, num ambiente experimental, situações operativas responsáveis que resultam em reduções ou elevações de tensão do consumidor.

Para a primeira categoria dos testes, o arranjo utilizado consistiu na montagem de um alimentador constituído por uma fonte controlada de tensão, o regulador e um conjunto de cargas estáticas. Através da imposição na forma de degraus programados de tensão, foram então realizados os ensaios de desempenho visando à correlação entre as respostas advindas do simulador ATP e da estrutura física. Para tanto, através da seleção de um conjunto de variações de tensão, compreendendo uma faixa de 0% a 20% (subtensões e sobretensões), em degraus sucessivos de 5 em 5%, foram realizados e confrontados os resultados teóricos e experimentais, os quais se mostraram consistentes no sentido de evidenciar a operação do dispositivo e o sucesso no processo da compensação.

Outra constatação importante refere-se ao tempo de resposta do dispositivo. Como premissa estabelecida para os trabalhos, a opção feita por esta tese apoia-se em acionamentos mecânicos proporcionados por contadores comandados pelo sistema de controle concebido e construído. Como relatado, em função dessas características, o tempo de resposta obtido foi da ordem de 310 ms, valor esse devidamente justificado nas análises feitas. Apesar de se mostrar relativamente lento para fins do controle das variações de tensão denominadas por curta duração, é importante destacar que a ação do dispositivo de compensação se mostra bastante superior àqueles proporcionados por reguladores com mecanismos a tambor ou outro princípio.

Um outro aspecto meritório de destaque refere-se às relações percentuais entre as potências entregues à carga e aquelas exigidas do dispositivo regulador. Como visto, a este último encontram-se atreladas potências, positivas ou negativas, em proporções significativamente inferiores aos valores exigidos pela carga.

Para a segunda categoria dos testes, o arranjo utilizando consistiu na montagem de um alimentador constituído por uma fonte de tensão, o regulador e um conjunto de cargas estáticas variáveis. Os estudos aqui realizados contemplaram análises de desempenho sob condições de inserção e súbitos alívios

de cargas, propriedade essa decisiva para a produção de distúrbios súbitos atrelados com variações de carga e seus respectivos impactos sobre as tensões de suprimento. Neste contexto foram investigadas duas situações: uma primeira vinculada com uma inserção de carga na barra 2 (aumento de 200% da carga original) e, uma segunda, associada com um súbito alívio de carga (redução de 66%) na mesma barra. Os resultados teóricos e experimentais, mais uma vez, se mostraram consistentes no sentido de evidenciar a operação do dispositivo e o sucesso no processo da compensação.

Por fim, uma terceira etapa de avaliação foi realizada, desta feita empregando-se tão apenas os recursos computacionais e a realização de estudos da ação do compensador diante de ocorrências manifestadas num arranjo elétrico típico. O sistema utilizado foi o clássico arranjo conhecido por sistema IEEE – 14 barras. Os estudos realizados focaram análises de desempenho sob condições de inserção e súbitos alívios de cargas, propriedade essa decisiva para a produção de distúrbios súbitos atrelados com variações de carga e seus respectivos impactos sobre as tensões de suprimento. Neste contexto foram exploradas distintas situações operacionais, a exemplo de: rejeições de carga, perda de gerações e curto-circuitos. Os estudos foram realizados sem e com a inserção do restaurador de tensão, nos termos aqui contemplados. Os resultados computacionais foram absolutamente consistentes no sentido de evidenciar a operação do dispositivo e o sucesso no processo da compensação.

4.6 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTE CAPÍTULO

As principais contribuições oferecidas por este capítulo são:

- Caracterização paramétrica das unidades de potência do regulador e construção de um protótipo de RET em escala reduzida;
- Realização de testes avaliativos de desempenho do protótipo empregando-se para tanto um arranjo laboratorial;

- Avaliação de desempenho do regulador diante de um complexo elétrico com características mais reais, para o caso, o conhecido sistema IEEE 14 barras.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Não obstante as considerações e comentários próprios feitos ao longo de cada capítulo considera-se essencial, neste momento, destacar as principais constatações, resultados e limitações obtidos dos estudos realizados ao longo desta pesquisa, proporcionando, deste modo, uma visão ampla e sucinta das atividades realizadas.

O trabalho foi iniciado com uma síntese dos principais conceitos associados com o problema da qualidade da tensão, focando, de modo especial, aspectos relacionados com a compatibilização dessa grandeza aos requisitos impostos pelos agentes reguladores. Diante dessa conjuntura, foi realizado um extensivo trabalho sobre o estado da arte dos recursos atualmente disponibilizados para os fins aqui postos, quando então foram identificados e comparados os princípios físicos, tipos de dispositivos e propriedades operacionais intrínsecas a cada um. À luz desses estudos foi possível traçar um horizonte de trabalhos que se apresentou como cerne da presente pesquisa.

Tendo por foco a utilização de tecnologias de cunho eletromagnético, em que pese a maior isenção de recursos da eletrônica de potência, fato esse atrelado com a busca de meios mais simples, confiáveis, econômicos, manutenção reduzida, dentre outros, foram então explorados os equipamentos comerciais em uso na atualidade que se encontram fundamentados no processo de compensação direta da tensão via unidades de potência totalmente eletromagnéticas.

Adicionalmente, foram também tecidos comentários sobre tecnologias alternativas (*phase shifter*), muito embora se reconheça que as mesmas não tenham sido identificadas como de produção de série por fabricantes nacionais e internacionais.

Em atenção aos objetivos postos, com destaque à simplicidade construtiva e operacional, nacionalização, custos, etc., foi então feita uma proposta de arranjo físico e de controle de um regulador eletromagnético de tensão monofásico, o qual se apresenta com uma base de sustentação apoiada nos mencionados reguladores de ângulo de fase, sem, todavia, explorar tais propriedades operativas. Isso se deu, sobremaneira, ao fato que apenas correções dos valores das tensões eficazes apresentaram-se como metas a serem atingidas, e não o controle de potências ativa ou reativa.

O regulador proposto mostrou-se constituído 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, e um arranjo de controle compatível com recursos tradicionalmente disponibilizados no mercado. Estes atributos, indubitavelmente, se mostram compatíveis com os requisitos almejados quando da concepção do dispositivo ora tratado.

Objetivando, sobretudo, oferecer meios para uma avaliação simples da eficácia operacional do dispositivo regulador, e ainda, prover meios para um pré-dimensionamento de suas unidades de potência e de controle, foram ainda realizados trabalhos associados com o desenvolvimento de uma modelagem do complexo, baseado em desenvolvimentos feitos em uma dissertação de mestrado em andamento. Para tanto, fundamentando-se nos recursos oferecidos pela representação no domínio da frequência, o equipamento em pauta representado neste contexto, fato este decisivo para uma melhor compreensão e parametrização do dispositivo diante das necessidades impostas pela sua respectiva rede de

conexão e fenômenos responsáveis por variações de tensão e violações dos padrões estabelecidos pela ANEEL.

A partir das bases físicas e operacionais concebidas, o compensador ora considerado foi, na sequência, objeto de representação no simulador ATP. Para tanto, através de recursos internos disponibilizados na biblioteca dessa plataforma, foi estabelecida a estratégia de modelagem do equipamento, em que pese sua representação via técnicas de modelagem no domínio do tempo, opção feita visando à realização de estudos investigativos focando o desempenho do regulador e respectiva rede de conexão sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente de operação.

De um modo geral, as unidades de potência do RET, por possuírem estruturas físicas e construtivas similares a de transformadores, apoiaram-se em recursos pré-existent na biblioteca do ATP. Não obstante tais modelos, a compatibilização ao produto desta pesquisa exigiu adequações e elaboração de cartões especiais, como discutidos no Capítulo III. Complementarmente, a inserção da estratégia de controle elaborada empregou a rotina MODELS para o processo decisório e a TACS para os chaveamentos que se fizerem necessários. Por fim, o modelo computacional foi obtido e avaliado através de estudos iniciais de desempenho. Para tanto foi empregada a configuração de uma rede elétrica simplificada na qual foram impostas condições operacionais caracterizadas na forma de elevações e reduções da tensão do supridor, em degraus sucessivos de 5% em 5%. A potencialidade da proposta e sua eficácia aos propósitos aqui estabelecidos foram ratificadas através dos casos avaliados nessa primeira fase dos estudos.

Na continuidade dos trabalhos, foram estabelecidas as diretrizes para o processo de validação do dispositivo regulador através de dois procedimentos experimentais. Para os primeiros testes, o arranjo utilizando consistiu na montagem de um alimentador formado por uma fonte controlada de tensão, o regulador e um conjunto de cargas estáticas. Através da imposição, na forma de

degraus programados de tensão, foram então realizados os ensaios de desempenho visando à correlação entre as respostas advindas do simulador ATP e da estrutura física. Para tanto, através da seleção de um conjunto de variações de tensão, compreendendo uma faixa de 0% à 20% (reduções e elevações de tensão), em degraus sucessivos de 5 em 5%, foram realizados e confrontados os resultados teóricos e experimentais, os quais se mostraram consistentes no sentido de evidenciar a operação do dispositivo e o sucesso no processo da compensação.

Na segunda categoria dos testes, o arranjo utilizando consistiu na montagem de um alimentador constituído por uma fonte de tensão, o regulador e um conjunto de cargas estáticas variáveis. Os estudos aqui realizados contemplaram análises de desempenho sob condições de inserção e súbitos alívios de cargas, propriedade essa decisiva para a produção de distúrbios súbitos atrelados com variações de carga e seus respectivos impactos sobre as tensões de suprimento. Neste contexto foram investigadas duas situações: uma primeira vinculada com uma inserção de carga na barra 2 (aumento de 200% da carga original) e, uma segunda, associada com um súbito alívio de carga (redução de 66%) na mesma barra. Os resultados teóricos e experimentais, mais uma vez, se mostraram consistentes no sentido de evidenciar a operação do dispositivo e o sucesso no processo da compensação.

Por fim, visando elucidar a eficácia do processo de compensação para um arranjo com características mais próximas da realidade dos sistemas elétricos, foram conduzidos trabalhos, de cunho eminentemente computacional, empregando-se para tanto o clássico sistema conhecido por IEEE 14 barras. A este foram impostas distintas condições operativas que resultaram em expressivos impactos sobre as tensões e, uma vez inserido recursos de compensação, nos moldes aqui propostos, mais uma vez foi comprovada a adequação do RET aos objetivos aqui almejados.

Como última observação, muito embora o reconhecimento do sucesso da proposta, 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 a questão da inversão de fluxos de potências;
- Proposição de mecanismos eletrônicos para a 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. Wiley-IEEE Press, October 8, 1999.
- [2] PRODIST, ANEEL - **Agência Nacional de Energia Elétrica - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Revisão 4, fevereiro 2012.
- [3] NAHVI, M.; EDMINISTER, J. A. **"Schaum's Outline of Theory and Problems of Electric Circuits"**. 4TH. ed. Mcgraw Hill, 2002.
- [4] HAFFNER, S. et al. **"Alocação de Banco de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Visando Eliminar Violações de Tensão"**. Controle & Automação, v. 20, n. 4, p. 546-563, 2009.
- [5] NAGENDRA, P. et al. **"A Novel Approach for Global Voltage Stability Assessment of a Power System Incorporationg Static Var Compensator"**. European Transaction on Electrical Power, v. 22, p. 1016-1026, 2012.
- [6] JACOBSON, D. A. N. **"Comparison of Thyristor Switched Capacitor And Voltage Source GTO Inverter Type Compensators For Single Phase Feeders"**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 2, p. 776-781, 1992.
- [7] ALVES, J. E. R.; PILOTTO, L. A. S.; WATANABE, E. H. **"Thyristor-Controlled Reactors Nonlinear and Linear Dynamic Analytical Models"**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, n. 1, p. 338-346, 2008.
- [8] 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. 2007. p. 1-6.

- [9] 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.
- [10] BARBOSA JR, J. A. F. et al. **"A Case Study of Transient and Dynamic Performance of Saturated Core Reactor Static Var Compensator"**. Renewable Energy and Power Quality Journal, paper 353, v. 7, p. 1-6, 2009.
- [11] BARBOSA JR., J. A. F. et al. **"Avaliação Técnica e Econômica para o Uso de Reatores Saturados em Substituição aos Lineares em um Sistema de Transmissão em AT"**. Ninth Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission - CLAGTEE. Mar Del Plata, Argentina. 2011. p. 1-6.
- [12] WEEDY, B. M.; CORRY, B. J. **"Electric Power Systems"**. Fourth Edition. ed. United Kingdom, 2004.
- [13] FERREIRA, A. C.; SOUZA, L. M.; WATANABE, E. H. **"Variable speed synchronous condenser using doubly-fed induction machine"**. Revista Controle & Automação, v. 15, n. 2, p. 172-180, 2004.
- [14] 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.
- [15] BARRADO, J. A.; GRINÓ, R.; VALDERRAMA-BLAVI, H. **"Power-Quality Improvement of a Stand-Alone Induction Generator Using a STATCOM with Battery Energy Storage System"**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, n. 4, p. 2734-2741, 2010.
- [16] SANTOS, C. H. R. R. **"Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência"**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG. Novembro de 2003.
- [17] XI, Z.; PARKHIDEH, B.; BHATTACHARYA, S. **"Improving Distribution System Performance with Integrated STATCOM and Super capacitor Energy Storage"**

- System".** Power Electronics Specialists Conference - PESC 2008. North Carolina State Univ: IEEE. June 2008. p. 1390-1395.
- [18] PERERA, L. B.; LEDWICH, G.; GHOSH, A. **"Multiple distribution static synchronous compensators for distribution feeder voltage support. IET Generation"**. Transmission & Distribution, v. 4, n. 4, p. 285-293, 2011.
- [19] FREITAS, W.; FRANÇA, A. M. **"Modelagem e Análise Dinâmica de Dispositivos DSTATCOM Usando o Simpowersystems para Matlab/Simulink"**. Revista Controle & Automação, v. 16, n. 2, p. 187-199, 2005.
- [20] 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. 1997. p. 1-6.
- [21] MANUAL de instruções para Regulador de Tensão Monofásico TB-R1000. Toshiba Leading Innovation. <http://www.toshiba.com.br/>.
- [22] CONTROLE para Regulador de Tensão Monofásico TB-R1000. Toshiba Leading Innovation. <http://www.toshiba.com.br/>.
- [23] LIMA, R. R. et al. **"Projeto e implementação de um novo regulador de tensão em sistemas de distribuição de energia de 13,8 kV"**. III Congresso International de Distribución Eléctrica. Buenos Aires, Argentina. 2006. p. 1-6.
- [24] REGULADOR de Tensão Monofásico COOPER – VR 32, Manual do fabricante. Cooper Power Systems. www.cooperpower.com.
- [25] REGULADOR de Tensão Monofásico ITB RAV-2, Manual do fabricante. ITB Equipamentos Elétricos. www.itb.ind.br.
- [26] HINGORAL, N. G.; GYUGYI, L. **"Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems"**. 1. ed. Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1999.
- [27] IRAVANI, M. R.; MARATUKULAM, D. **"Review of semiconductor-controlled (static) Phase Shifters for power system applications"**. Power Systems, IEEE Transactions, v. 9, n. 4, p. 1833-1839, Nov 1994.

- [28] IRAVANI, M. R.; DANDENO, P. L.; MARATUKULAM, D. "**Applications os static phase shifters in power systems**". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 3, July 1994.
- [29] SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. "**Flexible ac transmission systems (FACTS)**". London, United Kingdom, v. 1, 2000.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] PIRES, I. A.; CARDOSO FILHO, B. J.; SILVA, S. M. "**Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada para Mitigação de Afundamentos de Tensão**". Revista Controle & Automação, v. 23, n. 2, p. 164-178, 2012.
- [34] 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.
- [35] GALASSI, M. "**Projeto e Construção de um Restaurador Dinâmico de Tensão**". Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado. São Paulo. 2006.
- [36] DE JESUS, D. M. F.; SAMESIMA, M. I. "**Avaliação de Desempenho do Restaurado Dimâmico de Tensão (DVR) na Compensação de Afundamentos e Elevações de Tensão**". XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Rio de Janeiro. 2007. p. 1-6.

- [37] SIDELMO, M. S. **"Análise e Implementação de um Restaurado Dinâmico de Tensão"**. Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado. Belo Horizonte - MG. Dezembro de 2003.
- [38] DIVAN, D. et al. **"Impact of Voltage Sag Correction in Critical Manufacturing Applications"**. Power Quality Applications - PQA. North America – Portland, Oregon. Jun 2002. p. 1-7.
- [39] MINIDYSC, ProDySc e MegaDySC, Manual do fabricante. Softswitching Technologies. <http://www.softswitch.com/sst/index.do>.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. **"Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems"**. IEEE Press and Wiley Interscience, New York, USA, 2002.
- [43] RESENDE, J. W. Apostila **"Compensadores Estáticos e Suas Aplicações"**. Disciplina do curso de pós graduação em Engenharia Elétrica, intitulada **"Carga Elétricas Não Convencionais Indústrias"**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2011.
- [44] SILVA, T. V. **"Uma proposta para o controle eletrônico de reguladores eletromagnéticos através do reforço série de tensão"**. Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. Uberlândia - MG. 2012.
- [45] VASCONCELOS, L. E. **"Modelagem e Estudos de Desempenho do Regulador Eletromagnético de Tensão no Domínio da Frequência"**. Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. Uberlândia-MG. (Em fase final de redação).
- [46] ALTERNATIVE Transients Program (APT) Rule Book. Julho de 1987.
- [47] JORDÃO, R. G. **"Transformadores Eletricos I"**. São Paulo: Edgard Blucher, v. 1, 2010.

ANEXOS

Anexo A

MODEL CONTROLE

INPUT

```
V2    --Tensão na barra da carga (Barra 3)
V      --Tensão na barra da fonte (Barra 1)
```

OUTPUT

```
Ch1    --Chave do TAPE 1 (1-fechado; 0-aberto)
Ch2    --Chave do TAPE 2 (1-fechado; 0-aberto)
Ch3    --Chave do TAPE 3 (1-fechado; 0-aberto)
Ch4    --Chave do TAPE 4 (1-fechado; 0-aberto)
Ch5    --Chave do TAPE 5 (1-fechado; 0-aberto)
Ch0    --Chave do TAPE 0 - chave de terra (1-fechado; 0-aberto)
Chpp   --Chave de polaridade positiva do transformador série
Chpn   --Chave de polaridade negativa do transformador série
```

DATA

```
freg      {dflt:60}      --Frequência do sistema - 60Hz
vref      {dflt:127}     --Tensão de referência do sistema (V)
Lsup1b    {dflt:130}     --Limite superior da tensão de referência (V)
Linflc    {dflt:123}     --Limite inferior da tensão de referência (V)
```

VAR

```
Ch1      --Chave do TAPE 1 (1-fechado; 0-aberto)
Ch2      --Chave do TAPE 2 (1-fechado; 0-aberto)
Ch3      --Chave do TAPE 3 (1-fechado; 0-aberto)
Ch4      --Chave do TAPE 4 (1-fechado; 0-aberto)
Ch5      --Chave do TAPE 5 (1-fechado; 0-aberto)
Ch0      --Chave do TAPE 0 (1-fechado; 0-aberto)
Chpp     --Chave de polaridade positiva do transformador série
Chpn     --Chave de polaridade negativa do transformador série
period   --Período de um ciclo de 60 Hz
ponto    --Variável auxiliar de controle para o cálculo da tensão eficaz
ponto2   --Variável auxiliar de controle para o cálculo da tensão eficaz
Vinst    --Tensão instantânea
Vrms     --Valor eficaz da tensão do barramento 1
Vrms1    --Variável auxiliar para o cálculo de Vrms1
Vrms2    --Variável auxiliar para o cálculo de Vrms2
Vrms3    --Valor eficaz da tensão do barramento 3
ct       --variável de identificação do zero da tensão
ct_p     --valor anterior de ct
ativ     --ativação do chaveamento
seq      --tipo da sequência de chaveamento
seq_p    --valor anterior da variável sequencia
tempof1  --tempo para o chaveamento em zero de tensão
tempof2  --tempo para o chaveamento em zero de tensão
lib      --liberação do delay do próximo chaveamento
dal      --delay do próximo chaveamento
dal1     --tempo onde o chaveamento está liberada - tape
dal2     --tempo onde o chaveamento está liberada - transformador série
dal3     --tempo para o fechamento do primeiro tape após a variação da tensão
reg1     --regulação da tensão 1
reg3     --regulação da tensão 3
tensao   --tensão de referencia
```

HISTORY

```
ct {dflt:0} --memoriza os pontos anterior a mudança de polaridade
tm {dflt:0} --memoriza o tempo anterior a mudança de polaridade
seq {dflt:0} --memoriza a sequência de chaveamento anterior
```

Anexos

TIMESTEP MAX: 0.00001
MIN: 0.00001

INIT

```
period:=(1/freq)/timestep
ponto:=0
ponto2:=0
Vinst:=0
Vrms1:=0
Vrms2:=0
Vrms3:=Vref
Vrms:=Vref
seq:=0
Chpp:=1
Chpn:=0
ativ:=1
tempof1:=0
tempof2:=0
lib:=1
dal:=0.38
dal1:=0.3
dal2:=600
dal3:=0
reg1:=0
reg3:=0
tensao:=Vref
```

---- Prodinst - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 1 kv (220/127)-----

```
Vad_s:=133
Vad_i:=116
Vpr1_s:=140
Vpr1_i:=133
Vpr2_s:=116
Vpr2_i:=109
Vcr1_s:=140
Vcr1_i:=109
```

ENDINIT

EXEC

-----Cálculo da tensão instantânea-----

```
Vinst:=V/sqrt(2)
```

----- calculo da tensão eficaz para meio ciclo (Vrms)-----
----- Tensão na Barra 1 -----

```
IF ponto < period THEN
  Vrms1:=Vrms1+V**2
  ponto:=ponto+1
ELSE
  Vrms:=sqrt(Vrms1/(period))
  ponto:=0
  Vrms1:=0
ENDIF
```

----- Tensão da carga - Barra 3-----

```
IF ponto2 < period THEN
  Vrms2:=Vrms2+V2**2
  ponto2:=ponto2+1
ELSE
  Vrms3:=sqrt(Vrms2/(period))
  ponto2:=0
  Vrms2:=0
ENDIF
```

-----Calculo da regulação de tensão na barra 1(reg1) e 3(reg3)-----

```
reg1:=((Vrms-Vref)/Vref)*100
reg3:=((Vrms3-Vref)/Vref)*100
```

-----Definindo o Vrms até 0,2s-----

```
IF t < 0.2 THEN
  Vrms:=Vref
ENDIF
```

-----Encontrando o zero da tensão-----

```
IF V2 <= 0 THEN
  ct:=0
ELSE
  ct:=1
ENDIF
ct_p:=prevval(ct)  --leitura do valor anterior da variável de controle
```

-----Controle dos Tapes-----

```
IF t > dal1+0.1 THEN
  IF ativ = 0 THEN
    IF chpn = 1 THEN
      IF seq_p=0 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=1
      ENDIF
      IF seq_p=1 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
        seq:=0
      ENDIF
      IF seq_p=1 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=2
      ENDIF
      IF seq_p=2 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
        seq:=1
      ENDIF
      IF seq_p=2 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=3
      ENDIF
      IF seq_p=3 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
        seq:=2
      ENDIF
      IF seq_p=3 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=4
      ENDIF
      IF seq_p=4 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
        seq:=3
      ENDIF
    ENDIF
    IF Chpp = 1 THEN
      IF seq_p=0 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
        seq:=1
      ENDIF
      IF seq_p=1 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
        seq:=2
      ENDIF
      IF seq_p=1 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=0
      ENDIF
      IF seq_p=2 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
        seq:=3
      ENDIF
      IF seq_p=2 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=1
      ENDIF
      IF seq_p=3 AND Vrms3 < Linflc THEN
        ativ:=1
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
```

```

        seq:=4
    ENDIF
    IF seq_p=3 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=2
    ENDIF
    IF seq_p=4 AND Vrms3 > Lsup1b THEN
        ativ:=1
        seq:=3
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
seq_p:=prevval(seq)
IF seq <> seq_p THEN
    da11:=t+da1
    da13:=da11
ENDIF

```

-----Definição das chaves dos tapes-----

```

IF ct <> ct_p THEN
    tempof1:=(t+((1/freq)/4)-timestep)
ENDIF
IF ativ = 1 THEN
    IF t >= da13 THEN
        IF tempof1 >= da13 THEN
            IF t>= tempof1 THEN
                IF seq=0 THEN          -- TAPE 0 Ex(0%)
                    Ch1:=0
                    Ch2:=0
                    Ch3:=0
                    Ch4:=0
                    Ch5:=0
                    Ch0:=1
                    ativ:=0
                ENDIF
                IF seq=1 THEN          -- TAPE 1 EX(5%)
                    Ch1:=1
                    Ch2:=0
                    Ch3:=0
                    Ch4:=0
                    Ch5:=0
                    Ch0:=0
                    ativ:=0
                ENDIF
                IF seq=2 THEN          -- TAPE 2 EX(10%)
                    Ch1:=0
                    Ch2:=1
                    Ch3:=0
                    Ch4:=0
                    Ch5:=0
                    Ch0:=0
                    ativ:=0
                ENDIF
                IF seq=3 THEN          -- TAPE 3 EX(15%)
                    Ch1:=0
                    Ch2:=0
                    Ch3:=1
                    Ch4:=0
                    Ch5:=0
                    Ch0:=0
                    ativ:=0
                ENDIF
                IF seq=4 THEN          -- TAPE 4 EX(20%)
                    Ch1:=0
                    Ch2:=0
                    Ch3:=0
                    Ch4:=1
                    Ch5:=0
                    Ch0:=0
                    ativ:=0
                ENDIF
            ENDIF
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

-----Polaridade do transformador série-----

Anexos

```
IF Vrms3 > Vref*1.015 THEN
  IF seq_p=1 THEN
    da12:=t+da1
  ELSE
    da12:=600
  ENDIF
ENDIF
IF tempof1 >= da12 THEN
  IF t>= tempof1 THEN
    Chpp:=0
    Chpn:=1
  ELSE
    Chpp:=1
    Chpn:=0
  ENDIF
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

153

