



## IMPLEMENTAÇÃO DE UM REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAP

Mauro Sandro dos Reis

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Maurício Aredes

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2013

IMPLEMENTAÇÃO DE UM REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTADOR  
ELETRÔNICO DE TAP

Mauro Sandro dos Reis

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

---

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

---

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D. Sc.

---

Prof. Samir Ahmad Mussa, D.Sc.

---

Prof. Maria Dias Bellar, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2013

Reis, Mauro Sandro dos

Implementação de um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Tap/Mauro Sandro dos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XV, 159 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Maurício Aredes

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 148-155.

1. Eletrônica de Potência. 2. Comutador Eletrônico de Taps. 3. Regulação de Tensão. 3. Reguladores de Tensão. I. Aredes, Maurício. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais Marlene e Otacilio.*

*A minha esposa Djeine.*

*As minhas filhas Camila, Joana e Lara.*

*As minhas irmãs Graciele e Nairane.*

"Quanta é a verdade que um espírito suporta, quanta é a verdade que ele ousa? Essa foi pra mim, e cada vez mais, a tábua para medir valores. Engano - a crença no ideal - não é cegueira, engano é covardia... Toda a conquista, todo o passo adiante no conhecimento é consequência da coragem, da dureza em relação a si mesmo, da decência consigo mesmo..."

F. Nietzsche - Ecce Homo

# Agradecimentos

Esse trabalho só foi possível devido à contribuição de muitas pessoas, a elas gostaria de expressar minha gratidão:

Ao professor Mauricio Aredes, por sua orientação e pela oportunidade de ter desenvolvido esse trabalho em um dos mais bem equipados laboratórios desse país.

A minha esposa Djeine Dalla Corte, por ter lido cada frase que escrevi nesse trabalho. A Denise Ana Basso Andrigheto, por ter revisado o trabalho pré-banca.

Ao Vitor Lemos Maia, Luiz Eduardo Altoé Lirio e Eduardo Leandro, pelas intermináveis discussões teóricas.

Ao Tiago Americano do Brasil, Eduardo Netto, Marina Curi, Allan Guedes, Diego Silva, Magidiel Silva, Jefferson Menas por terem trabalhado no protótipo experimental.

Aos meus amigos Mamour Sop Ndiaye, João Amim e Rita Cavaliere pelo companheirismo, pelo apoio e estímulo no decorrer desses anos de luta.

Aos colegas e funcionários do Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão pelas contribuições no decorrer desse processo.

Ao CNPQ, FAPERJ e EDP Bandeirante Energia e EDP Escelsa energia pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## IMPLEMENTAÇÃO DE UM REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAP

Mauro Sandro dos Reis

Dezembro/2013

Orientador: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

O trabalho apresenta um estudo sobre Reguladores de Tensão com Comutadores Eletrônicos de *Tap*. Inicialmente é feito um estudo dos RTs com comutadores eletromecânicos de *tap*, a fim de determinar sua evolução nas últimas décadas, limitações de operação relacionadas à velocidade e a necessidade periódica de manutenção. Os RTs com comutadores eletrônicos são apresentados como uma solução para os principais problemas relacionados aos comutadores eletromecânicos. Após isso, se faz uma análise das configurações topológicas dos comutadores no estado sólido, com o objetivo de desenvolver modelos matemáticos que permitam a determinação das possíveis combinações de semicondutores de potência. Também é desenvolvida uma modelagem que permite determinar as possíveis configurações de *taps* para cada variação topológica. Utilizando os modelos desenvolvidos determina-se uma metodologia construtiva, que permite definir a melhor faixa de operação, resolução mínima e valores das derivações que garantem uma maximização do desempenho do RT. Por meio do protótipo implementado foi possível testar os conceitos fundamentais relacionados aos comutadores eletrônicos de *taps*, estabelecer os limites operacionais do RT atuando fora de sua região de regulação e os eventuais erros de regulação.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC TAP-CHANGER

Mauro Sandro dos Reis

December/2013

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

The paper presents a study on Voltage Regulators with Implementation of an electronic tap-changer. Initially, a study is made of RT with electromechanical switches tap in order to determine its evolution in recent decades, the operating limitations related to speed and the necessary periodic maintenance. RT with tap-changer is presented as a solution to the main problems related to electromechanical switches. After that, an analysis is made of the topological configurations of the switches in the solid state, with the goal of developing mathematical models that allow the determination of the possible combinations of power semiconductors. A model which determines the possible configurations of taps for each topological change is also developed. Using the developed models it's possible to determine a constructive methodology, which allows to define the best operating range, minimum resolution and derivation values that ensure maximization of RTs performance. With the implemented prototype, was possible to test the fundamental concepts related to electronic switches taps, establish the operating limits of the RT acting outside its region of regulation and regulatory errors.

# Sumário

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Regulação de tensão utilizando comutadores de tap's.....	3
1.2 Revisão Bibliográfica.....	4
1.3 Identificação do Problema.....	10
1.4 Contribuições do Trabalho .....	12
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
<b>2 REGULADORES DE TENSÃO COM COMUTADORES DE TAP'S</b> .....	<b>15</b>
2.1 Comutadores de Taps .....	15
2.2 Reguladores Automáticos de Tensão .....	17
2.2.1 Descrição Geral do Regulador de Tensão .....	18
2.3 Reguladores do Tipo A e do Tipo B .....	18
2.4 Regulador de Tensão com Comutador Mecânico de Taps.....	21
2.5 Limitações e Dificuldades de Operação em Carga .....	23
2.6 Evolução dos Comutadores de Tap's.....	24
2.7 Comutação Assistida por Tiristor.....	25
2.8 Reguladores de Tensão com Tap Eletrônico.....	26

2.8.1	Diferentes configurações de enrolamentos utilizados em comutadores de tap's	26
2.8.2	Circuito com Comutador Baseado em Tiristores .....	28
2.9	Topologia Escolhida para Análise e Implementação .....	30
2.9.1	Representação básica de um regulador de tensão Tipo A .....	31
<b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>35</b>
<b>3</b>	<b>MODELAGEM DO COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPS .....</b>	<b>35</b>
3.1	História da Álgebra Booleana .....	36
3.2	Princípios e definições adotados no processo de modelagem.....	36
3.2.1	Resolução do regulador de tensão .....	37
3.2.2	Série numérica das relações de transformação do RT.....	37
3.2.3	Ganho do Regulador de Tensão .....	38
3.2.4	Ganho Zero .....	38
3.2.5	Função de Ganho, Taps Reais e Taps Virtuais.....	39
3.2.6	Princípio da Continuidade .....	40
3.3	Modelagem matemática dos compensadores do tipo S-DVR.....	41
3.3.1	Modelo matemático para um RT de Tap único.....	41
3.3.2	Tabela verdade do comutador de um único tap.....	45
3.3.3	Condição incluindo o zero de compensação.....	47
3.4	Modelo com álgebra booleana modificada .....	48
3.5	Desenvolvimento do conceito do T0 .....	50

3.5.1	Regra para a obtenção das probabilidades de combinações das chaves semicondutoras.....	51
3.6	Regulador com dois enrolamentos de regulação separados.....	52
3.6.1	Topologia do Regulador do tipo S-DVR com duas bobinas de regulação separadas .....	52
3.6.2	Modelo matemático para dois taps separados .....	53
3.7	Generalização das combinações de chaves e Tap's do RT com uma derivação e x bobinas de regulação.....	58
3.8	Modelo matemático para dois Tap's em uma única bobina.....	59
3.8.1	O Termo $\alpha$ .....	60
3.9	Restrições topológicas na soma de taps.....	61
3.10	Generalização do modelo para m ramos em uma única bobina .....	62
3.11	Generalização para n enrolamentos de regulação com m derivações .....	66
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>68</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE REGULADORES .....</b>	<b>68</b>
4.1	Reguladores de Tensão com Excitação Variável – Tipo A.....	69
4.2	Determinando a Região de Operação do RT do Tipo A .....	70
4.2.1	Assimetria do RT Operando com Excitação Variável.....	73
4.2.2	Avaliação da Perda e do Ganho de Compensação .....	75
4.2.3	Determinação da Resolução Mínima do RT – T1 .....	78
4.3	Determinação dos Tap's Reais e Funções de Ganho - $\varphi$ .....	80

4.3.1	Obtenção da faixa dinâmica de compensação a partir das funções de ganho	82
4.3.2	Maximização da faixa dinâmica de compensação.....	83
4.3.3	Maximização da confiabilidade.....	88
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>89</b>
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO.....</b>	<b>89</b>
5.1	Estratégia de controle do Regulador com Topologia S-DVR.....	89
5.2	Análise de regulação segundo o Prodist.....	96
5.3	Análise da sensibilidade das tensões nas derivações .....	100
5.4	Tempo de desligamento das chaves semicondutoras .....	103
5.5	Compensação de variações momentâneas de tensão.....	104
5.6	Análise do RT operando como Tipo A com Carga Indutiva.....	107
5.7	Impacto do tempo de desligamento do Tiristor em carga indutiva.....	108
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>115</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE UM RT COM TOPOLOGIA S-DVR.....</b>	<b>115</b>
6.1	Montagem da bancada experimental.....	116
6.2	Autotransformador .....	117
6.3	Circuitos de instrumentação e controle .....	119
6.4	Chave estática.....	120
6.5	Troca de Tap's.....	122
6.6	Operação do Regulador de Tensão com Excitação Variável .....	124
6.7	Teste com carga resistiva .....	124
6.8	Compensação fora da Faixa Dinâmica do Equipamento .....	133

6.9	Teste com carga Indutiva .....	136
<b>CAPÍTULO 7.....</b>		<b>144</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>144</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>148</b>
	Apêndice A .....	156
	A.1 Combinações de chaves semicondutoras para dois enrolamentos de Regulação .....	156
	Apêndice B .....	157
	B.1 Álgebra Booleana.....	157

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM TRANSFORMADOR COM COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAP'S.....	16
FIGURA 2.2 - TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE CHAVES CA. ....	17
FIGURA 2.3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO REGULADOR DE TENSÃO – (A) TIPO A E (B) TIPO B [25].....	19
FIGURA 2.4 – CONEXÃO DO REGULADOR DE TENSÃO COMO REDUTOR – TIPO A.....	20
FIGURA 2.5 – CONEXÃO DO REGULADOR DE TENSÃO COMO ELEVADOR – TIPO A.....	20
FIGURA 2.6 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO REGULADOR DE TENSÃO DO TIPO A GERAL.....	21
FIGURA 2.7 – CIRCUITO DE MUDANÇA DE TAPS COM O REATOR DE EQUALIZAÇÃO JUNTO AO REATOR DE COMUTAÇÃO.....	22
FIGURA 2.8 – TRANSFORMADOR COM COMUTADOR ELETROMECAÂNICO DE TAPS EM CARGA ( <i>ON-LOAD TAP CHANGER</i> ) [17] .....	23
FIGURA 2.9 – COMUTAÇÃO ASSISTIDA POR TIRISTOR: (A) COMUTADOR CONVENCIONAL, (B) COMUTADOR ASSISTIDO POR TIRISTOR [23]. ....	25
FIGURA 2.10 - ESTRUTURAS DE ENROLAMENTOS PARA COMUTADORES DE TAPS [12].....	27
FIGURA 2.11 – REGULADOR DE TENSÃO DE SETE NÍVEIS COM COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPS BASEADO EM TIRISTORES TIPO SCR. ....	29
FIGURA 2.12 – ESTRUTURA IMPLEMENTADA.....	31
FIGURA 2.13 - TENSÕES PRESENTES NO RT.....	32
FIGURA 2.14 – ENROLAMENTO DOS TAPS. ....	33
FIGURA 3.3 - MODO ZERO DE COMPENSAÇÃO: (A) CHAVES C1 E C3 E (B) CHAVES C2 E C4 CONDUZINDO. .	48
<b>FIGURA 3.6 – TOPOLOGIA COM <i>M</i> TAPS SEPARADOS.....</b>	<b>58</b>
FIGURA 3.8 – CONFIGURAÇÃO COM QUATRO DERIVAÇÕES EM UM MESMO ENROLAMENTO.....	62
FIGURA 3.11 – RETA NUMÉRICA RELATIVA AO ALGORITMO DE DETERMINAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DAS CHAVES SEMICONDUTORAS DA PARTE INFERIOR DO COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAP'S. ....	65
<b>FIGURA 4.4 – RT OPERANDO COM CURVA DE COMPENSAÇÃO LINEAR E NÃO LINEAR.....</b>	<b>74</b>
FIGURA 4.6 – DIFERENÇA PORCENTUAL ENTRE A CAPACIDADE DE COMPENSAÇÃO DO RT DO TIPO A PARA O RT DO TIPO B.....	77
FIGURA 4.7 – RT COM <i>M</i> BOBINAS DE REGULAÇÃO E <i>N</i> DERIVAÇÕES. ....	81
FIGURA 4.11 – RT COM DUAS BOBINAS DE REGULAÇÃO E DUAS DERIVAÇÕES. ....	87
FIGURA 5.1 – PONTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS PELO CONTROLADOR.....	90
FIGURA 5.2 - REGULADOR DE TENSÃO COM CARGA RESISTIVA .....	91
FIGURA 5.3 - CIRCUITO DE DETECTOR DE AMPLITUDE.....	91
FIGURA 5.4 - CIRCUITO DE DETECTOR DO ÂNGULO DE FASE.....	92
FIGURA 5.5 - CONTROLADOR DO RT.....	93
FIGURA 5.6 – REGULADOR DE TENSÃO COM CARGA RESISTIVA. ....	94
FIGURA 5.7 – (A) TENSÃO DE ENTRADA $V_I$ E TENSÃO REGULADA $V_{REG}$ , (B) TAPS E (C) ERRO DE REGULAÇÃO. ....	95
FIGURA 5.8 – REGULAÇÃO DE TENSÃO SEGUNDO O PRODUST. ....	97
FIGURA 5.9 – VARIAÇÃO DOS TAPS REAIS COM A TENSÃO $V_I$ .....	102
FIGURA 5.10 – TEMPO MORTO NA COMUTAÇÃO ENTRE TAPS DIFERENTES. ....	103
FIGURA 5.11 – COMPENSAÇÃO DE VTCDs COM CARGA $FP=1$ .....	105
FIGURA 5.12 – COMPENSAÇÃO DE VTCDs COM CARGA $FP=1$ E CORRENTE DE 50A.....	106
FIGURA 5.13 – (A) TENSÃO DE ENTRADA $V_I$ E TENSÃO REGULADA $V_{REG}$ , (B) TAPS E (C) ERRO DE REGULAÇÃO, $FP=0.92$ .....	108
FIGURA 5.14 – TEMPO MORTO NA COMUTAÇÃO ENTRE TAPS COM CARGA INDUTIVA, $FP=0,92$ .....	110
FIGURA 5.15 – TEMPO MORTO NA COMUTAÇÃO ENTRE TAPS COM CARGA INDUTIVA, $FP=0,8$ .....	111
FIGURA 5.16 – TEMPO MORTO NA COMUTAÇÃO ENTRE TAPS COM CARGA INDUTIVA, $FP=0,8$ .....	111
FIGURA 5.17 – TEMPO MORTO NA COMUTAÇÃO ENTRE TAPS COM CARGA INDUTIVA, $FP=0,8$ .....	112
FIGURA 5.18 – COMPENSAÇÃO DE VTCDs COM CARGA $FP=0,92$ E CORRENTE DE 50A.....	112
FIGURA 5.19 – COMPENSAÇÃO DE VTCDs COM CARGA $FP=0,7$ E CORRENTE DE 50A.....	113
FIGURA 6.1 - BANCADA EXPERIMENTAL. ....	116
FIGURA 6.2 - FOTOGRAFIA DO PROTÓTIPO DO RT. ....	117

FIGURA 6.3 – BANCADA DE TESTE E PROTÓTIPO DE RT.....	117
FIGURA 6.4 – VISTA FRONTAL E LATERAL DO AUTOTRANSFORMADOR. ....	118
FIGURA 6.5 – VISTA SUPERIOR DO AUTOTRANSFORMADOR.....	118
FIGURA 6.6 - VISTA ESQUEMÁTICA DA LIGAÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR NA BANCADA DE TESTE. ....	119
FIGURA 6.7 - SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE RT .....	120
FIGURA 6.8 - CONFIGURAÇÃO DA CHAVE ESTÁTICA UTILIZADA NO PROTÓTIPO DO RT. ....	121
FIGURA 6.9 - CHAVE ESTÁTICA DO RT. ....	122
FIGURA 6.12 - TENSÃO DE ENTRADA (AMARELA), TENSÃO DE SAÍDA COMPENSADA (VERDE) E CORRENTE (ROXO) PARA OS TAPS 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0, -2.....	129
FIGURA 6.13 - TENSÃO DE ENTRADA (AMARELA), TENSÃO DE SAÍDA COMPENSADA (VERDE) E CORRENTE (ROXO) PARA OS TAPS -4, -6, -8, -10, -12, -14, -16 E -18.....	132
FIGURA 6.14 - TENSÃO DE ENTRADA (AMARELA), TENSÃO DE SAÍDA COMPENSADA (VERDE) E CORRENTE (ROXO) PARA O TAP -20. ....	133
FIGURA 6.15 - TENSÃO DE ENTRADA (AMARELA), TENSÃO DE SAÍDA COMPENSADA (VERDE) E CORRENTE (ROXO) PARA O TAP 20, ABAIXO DO LIMITE DE COMPENSAÇÃO.....	134
FIGURA 6.16 - TENSÃO DE ENTRADA (AMARELA), TENSÃO DE SAÍDA COMPENSADA (VERDE) E CORRENTE (ROXO) PARA O TAP -20, ACIMA DO LIMITE DE COMPENSAÇÃO.....	135
FIGURA 6.17 - TENSÃO DE ENTRADA (AMARELA), TENSÃO DE SAÍDA COMPENSADA (VERDE) E CORRENTE (ROXO) PARA UM VTCD, (A) CARGA RESISTIVA E (B) CARGA INDUTIVA COM $FP=0,89$ .....	136
FIGURA 6.18 – FORMAS DE ONDA DO RT REFERENTES A REGULAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE 163V, 165V, 166V, 169V, 170V, 172V, 173V E 175V.....	138
FIGURA 6.19 - FORMAS DE ONDA DO RT REFERENTE A REGULAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE 176V E SOBRETENSÕES DE 179V, 181V, 183V, 184V, 187V E 189V.....	139
FIGURA 6.20 - FORMAS DE ONDA DO RT REFERENTES A REGULAÇÃO DE SOBRETENSÕES DE 190V, 192V, 195V, 196V E 199V.....	140

# Capítulo 1

## Introdução

A forte correlação entre qualidade de vida e tecnologia está explícita, seja pelo aumento que esta proporciona na expectativa de vida das pessoas ou por equipamentos e dispositivos que facilitam a execução das mais diversas atividades. Com o aumento da aplicação de soluções tecnológicas no dia a dia, há um constante crescimento na demanda por energia elétrica. Não é só o consumo de energia elétrica nas residências, entretanto, que tem crescido. As indústrias e o comércio também tem aumentado sua demanda por energia. Isso se deve à aceleração da economia, as políticas públicas que incentivam a modernização de processos e uma crescente automatização em todos os segmentos do setor produtivo.

Praticamente 100% da energia elétrica chega até seus consumidores finais por meio de redes de distribuição, as quais representam um segmento do sistema elétrico que pode ser dividido em dois grandes grupos: as redes elétricas primárias e as redes elétricas secundárias. As redes denominadas primárias são constituídas, normalmente,

de circuitos trifásicos a três fios que operam dentro das faixas de 15, 25 e 35kV. Por sua vez, as redes de distribuição secundárias, ou redes de distribuição em baixa tensão, são compostas por circuitos trifásicos a quatro fios e atendem consumidores com potência instalada inferior a 50kW. Os consumidores entre 50kW e 2.500kW deverão, a princípio, ser atendidos em tensão primária da rede de distribuição (redes primárias).

Esta pesquisa tem como universo de estudo as redes elétricas primárias, visando a dar conta da necessidade de se obter um controle de tensão mais apurado. O controle de tensão pode ser dividido em dois grupos de problemas distintos: aqueles que tratam da variação na amplitude da tensão em longa duração e as variações de tensão de curta duração. Esses fenômenos causam a queima dos eletrodomésticos e a parada de máquinas e de processos industriais, o que traz prejuízos econômicos consideráveis. Dentro da classe de equipamentos que possibilitam o controle de tensão serão estudados os Reguladores de Tensão (RT), por serem largamente utilizados na rede elétrica de distribuição. Esse dispositivo, usualmente, é constituído por um autotransformador e um comutador de *taps*.

A variação de tensão de suprimento dos consumidores dependerá do estado operacional do sistema de distribuição, bem como da localização geográfica do consumidor dentro do sistema. Dessa forma, o controle de tensão visa a garantir que os consumidores disponham de tensão dentro dos níveis estabelecidos pela resolução 676, de 19 de dezembro de 2003 da Aneel, a qual objetiva assegurar a todos os clientes, ao longo da rede elétrica, o fornecimento de tensão dentro de limites adequados. Nessa resolução são estabelecidos os níveis considerados aceitáveis, precários ou críticos para a tensão fornecida (Tensão de Atendimento, TA). Também são estabelecidos os

indicadores e limites para os tempos em que a tensão permanece fora dos níveis aceitáveis [1].

Para manter a regulação de tensão dentro dos limites estabelecidos nas normas, existe uma diversidade de métodos tradicionalmente empregados [2], dos quais se pode citar:

- construção de novos alimentadores para transferência de cargas;
- aplicação de capacitores em subestações e/ou em alimentadores de distribuição;
- redimensionamento dos condutores ou número de fases em seções dos alimentadores;
- instalação de novas subestações e alimentadores;
- elevação do nível da tensão primária;
- balanceamento das cargas nos alimentadores;
- utilização de reguladores de tensão em subestações ou ao longo de alimentadores da rede de distribuição.

## 1.1 Regulação de tensão utilizando comutadores de *tap's*

Dentre os métodos apresentados para promover a manutenção da tensão dentro dos limites determinados pela resolução 676/2003, o Regulador de Tensão (RT) foi a metodologia escolhida na delimitação do tema desta tese. Esses dispositivos vêm sendo amplamente utilizados e propiciam um bom desempenho na regulação de tensão em regime permanente [3], entretanto os reguladores de tensão com comutador eletrônico de *taps* apresentam uma dinâmica superior [4] [5].

O RT eletromecânico é utilizado desde a década de 40 [6]. Esse método tradicional de regulação pode ser caracterizado pela sua dinâmica lenta de compensação, fato que o torna impróprio para a compensação de Variação de Tensão de Curta Duração, VTCD [3].

Dentro das redes primárias de distribuição estudou-se, de forma geral, os RTs e suas implicações no controle de tensão. Este tipo de equipamento é destinado a manter a tensão em uma rede de distribuição dentro de uma determinada faixa operacional [3]. O objetivo desta pesquisa é apresentar uma proposta de modelagem para os reguladores de tensão, especificamente no circuito do comutador de *taps* e nas suas relações com o circuito magnético. Cabe ressaltar que o comutador eletrônico de *taps* é composto por chaves estáticas (arranjo de semicondutores de potência que permite a condução de corrente de forma bidirecional). Pretende-se, também, apresentar uma contribuição no que diz respeito à metodologia construtiva e à lógica do controle. Serão mostradas, ao longo do trabalho, as contribuições relativas à operação do regulador em excitação variável, e as vantagens e desvantagens proporcionadas por essa configuração topológica.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi realizada para iniciar os estudos referentes aos reguladores de tensão com comutadores eletrônicos de *tap's*. Inicialmente é feito um apanhado histórico/bibliográfico mostrando a evolução dos RTs; após, são apresentados os resumos dos principais trabalhos publicados em temas relacionados ao assunto.

A tecnologia de Reguladores de Tensão com Comutação Eletromecânica de Taps é muito utilizada há várias décadas e, portanto, bem conhecida no mundo inteiro [7]. Ao longo do tempo, o projeto destes equipamentos modificou-se de modo a atender normas gerais de operação, as quais estabelecem os requisitos de desempenho elétricos e mecânicos para os *load tap changers* (LTCs) ou *on-load tap changers* (OLTCs) [8], [9]. Apesar disso, esses dispositivos continuam a apresentar uma dinâmica de

compensação lenta [3] e sua manutenção é complexa e onerosa, e uma tentativa para minimizar o custo e maximizar a confiabilidade pode ser vista em [7], porém a manutenção dos reguladores eletromecânicos continua sendo considerada um ponto crítico [10], [11].

Apesar de algumas vantagens obtidas pelos comutadores eletromecânicos nos últimos anos, eles ainda têm duas desvantagens básicas: a estrutura complicada e a existência de arcos durante o processo de troca de *tap's*. Estas desvantagens, por sua vez, levam a um sistema pesado, volumoso e lento, com um número limitado de operações [12]. Em um esforço para eliminar essas desvantagens, e levando em conta o avanço da tecnologia das chaves eletrônicas de potência, uma extensa pesquisa concentrou-se na concepção e desenvolvimento de comutadores utilizando interruptores eletrônicos [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]. Este tipo de comutador pode ser classificado em dois grupos: assistidos por tiristor [17], [22], [23] e comutadores no estado sólido, [5], [14], [16].

O comutador eletrônico de taps pode ser empregado para substituir o mecânico. Em 1986 foi feita a primeira utilização desse tipo de dispositivo em campo [5]. Basicamente, os reguladores de tensão com comutador eletrônico de taps são construídos trocando o sistema eletromecânico por um correspondente no estado sólido. Para que isso seja possível, as chaves eletrônicas devem ser bidirecionais, uma vez que os dispositivos comerciais são unidirecionais. Pode-se encontrar na literatura diversas topologias que combinam tiristores e/ou diodos para a obtenção de chaves eletrônicas bidirecionais [17], [15], [18]. Os comutadores assistidos por tiristor empregam um SCR durante o processo de troca de *taps*. Dessa forma, o arco elétrico, devido à comutação de taps, é reduzido, porém o sistema continua a utilizar um seletor mecânico nas

mudanças de *taps*. Mesmo que o nível de manutenção e reparações seja reduzido, o processo de troca de *taps* continua lento [12]. O RT eletrônico pode levar apenas 8,33ms para acessar qualquer derivação, enquanto o RT eletromecânico chega a levar de 4s a 42s.

Existem diversas topologias de reguladores de tensão com comutadores eletrônicos de *taps*. Em [14], foi desenvolvido um regulador baseado em tiristores (SCR) que utiliza modulação do tipo DCM (Discrete Cycle Modulation), porém a estratégia de controle é complexa e pode gerar sub-harmônicos e *flickers* [19]. Em [19], é apresentada uma otimização no número de *taps* que compõe a topologia, utilizando uma diferente e complexa disposição de enrolamentos e chaves. Dessa forma, podem ser obtidos 63 degraus de tensão (um degrau de tensão é o menor nível de compensação de um regulador), com 6 chaves em série conduzindo, o que aumenta as perdas de forma considerável. A topologia S-DVR12 (*Step Dynamic Voltage Regulator*) é uma configuração apresentada em [24], com 8 *tap's* e 12 chaves (bidirecionais), quando se obtém apenas 31 degraus (incluindo o nível sem regulação), porém com 4 chaves em série no caminho de corrente, o que implica menores perdas de condução. A topologia S-DVR20, composta por 12 pares de tiristores conectados em antiparalelo e capacidade de 41 níveis de compensação [20], será o objeto da análise deste trabalho. Um estudo inicial foi apresentado em [25], em que são abordados alguns aspectos relativos à análise combinatória das chaves e *tap's*. Neste trabalho serão expandidos os conceitos definidos em [25] no que se refere ao S-DVR operando em excitação variável. Excitação variável ou do tipo A é um modo de operação do regulador quando a tensão não regulada está sobre a bobina principal [26].

Em [16] é analisada a lógica de comutação e as características operacionais necessárias à implementação de um comutador eletrônico de *tap's*. A lógica de comutação proposta e analisada nesse artigo é utilizada em grande parte dos trabalhos subsequentes. Também é explicado o comportamento das correntes nos *tap's* durante as trocas e em cenários com e sem fator de potência unitário. Em [16] os comutadores eletrônicos são divididos em duas categorias, sendo a primeira uma extensão da própria lógica de comutação do eletromecânico, quando a troca de *tap's* é realizada em duas etapas, incluindo a inserção de uma indutância ou resistência para limitar a circulação de correntes entre os enrolamentos de regulação envolvidos na comutação. Isso resulta em uma topologia que é constituída pelo dobro das chaves normalmente requeridas. A segunda proposta descarta a utilização de impedância e estados intermediários durante a troca de *tap's* e diminui o número de chaves pela metade, em comparação com a topologia convencional. Dessa forma, contribui para a redução dos custos do comutador e serve de base para as topologias subsequentes, incluindo a deste trabalho.

Em [24], foram propostas três configurações de S-DVR (*Step Dynamic Voltage Regulator*). As topologias denominadas S-DVR6, S-DVR8 e S-DVR12 são instituídas utilizando tiristores tipo SCR para desempenharem o papel do comutador eletromecânico. Os arranjos das bobinas de regulação e suas ligações aos semicondutores de potência dão origem as três topologias, as quais se diferenciam entre si pelo número de níveis de compensação. Os enrolamentos de compensação são seccionados e se conectam entre si usando as chaves de potência; assim, permitem que suas tensões possam ser subtraídas, fato que contribui para a obtenção de um grande número de níveis de tensão, mesmo com poucas derivações. A topologia S-DVR6 utiliza seis chaves estáticas bidirecionais conectadas a dois *tap's*, os quais permitem

seis níveis de compensação mais o nível zero. Já a topologia S-DVR8 emprega oito pares de tiristores ligados em antiparalelo, conectados a dois enrolamentos de compensação. Essa topologia é apresentada como uma variação da S-DVR6, permitindo a mesma quantidade de níveis de compensação, porém com redundância de alguns valores, o que torna essa configuração mais confiável. Por sua vez, a topologia S-DVR12 une os conceitos desenvolvidos na S-DVR6 e S-DVR8 em uma configuração que permite uma faixa mais ampla de compensação – 31 níveis (15 positivos, 15 negativos e o ponto de não compensação).

Em [12] foi apresentado um método de otimização para reguladores de tensão com comutadores eletrônicos de *tap's*. O objetivo desse trabalho é estabelecer critérios para a concepção do comutador eletrônico de forma que o custo final do regulador seja minimizado. Nesse artigo também são apresentadas seis configurações que associam o comutador eletrônico, os enrolamentos de regulação e o(s) enrolamento(s) principal(ais), de tal forma que todas as topologias de reguladores de tensão possam ser obtidas. A metodologia de otimização concentra-se no número de *tap's* e chaves eletrônicas para estabelecer a configuração ideal do comutador. As topologias mais viáveis são estudadas no que respeita a sua implementação e possibilidade de acessar todos os *tap's*. A função custo desenvolvida tem como finalidade selecionar a configuração topológica que garante o menor custo com a maior faixa de regulação. Nesse contexto, a topologia com três derivações e seis chaves semicondutoras é verificada como a que garante a minimização da função custo e desempenho.

Em [27] são apresentadas as diferenças entre o controle de um comutador eletromecânico de *tap's* e o controle de um comutador eletrônico de *tap's*. Nesse trabalho é apresentado de forma detalhada o controle dos reguladores eletromecânicos.

Também são expostas as diferenças nos requisitos entre o controle do comutador convencional e do comutador eletrônico de *tap's*. A estratégia de controle foi desenvolvida para um RT que utiliza um transformador, considerando que os *tap's* estão localizados no secundário; além disso, o regulador pode ser considerado do Tipo A ou com excitação variável. O controle modificado para atender os requisitos dos comutadores eletrônicos é desenvolvido empregando os seguintes blocos: medição de tensão RMS instantânea (meio ciclo), banda morta, bloco discretizador, circuito de detecção de passagem por zero e bloco de amostragem e retenção. O compensador implementado utiliza uma parcela proporcional e outra integral.

Em [21], foi mostrada a relevância do estudo dos comutadores eletrônicos de *tap's* dentro do contexto de intermitência das fontes renováveis de energia. Nesse artigo observa-se uma comparação entre as soluções eletromecânicas, comutação assistida por tiristores e comutadores eletrônicos. Nesse contexto, a última opção surge como solução inquestionável dentro do atual cenário das linhas de distribuição. Esse trabalho levanta as questões sobre a localização das chaves semicondutoras e as implicações de essas operarem ao lado de baixa e alta tensão dos comutadores, ficando evidente que a operação do comutador em baixa tensão acarreta sérios problemas relacionados às perdas. Os autores relatam a implementação de um comutador eletrônico a tiristores, em uma configuração de 5 chaves estáticas, ligadas a enrolamentos de  $\pm 2,5\%$  e  $\pm 5\%$ , operando em uma tensão de 35kV. A inversão de polaridade dos *tap's* é conseguida usando enrolamentos específicos para cada polaridade. Dessa forma, o número de chaves semicondutoras é reduzido. O autor mostra que o problema relacionado à troca de *tap's*, no que diz respeito à sobreposição de correntes, é minimizado pelas indutâncias de dispersão e resistência dos enrolamentos.

### 1.3 Identificação do Problema

A grande maioria dos equipamentos ligados ao sistema elétrico é projetada para operar dentro de certos limites de tensão. Devido à queda de tensão existente em cada parte do sistema de alimentação, os clientes mais distantes da subestação recebem a tensão mais baixa.. Com o crescimento dos sistemas de distribuição, há um aumento direto da necessidade de inclusão de dispositivos de regulação de tensão, seja para resolver problemas relacionados à queda de tensão nos alimentadores, seja devido ao ciclo de cargas dos consumidores ou o fenômeno crescente de cargas sensíveis na rede.

Com a crescente inserção de cargas sensíveis na rede, as quais são susceptíveis a problemas de qualidade de energia elétrica, como variações na tensão de alimentação, frequência, harmônicos, quedas, picos e impulsos transientes, surge a necessidade de dar conta dos distúrbios de tensão que não fazem parte do escopo do regime permanente. Desse modo, os órgãos regulamentadores cada vez mais apontam para uma contínua necessidade de melhorias na qualidade da energia fornecida pelas concessionárias. Neste sentido, a aplicação dos Reguladores de Tensão têm se mostrado de grande importância na manutenção dos níveis de tensão em um alimentador, dentro dos limites especificados pela resolução 676/2003. Nesta resolução estão indicadas as disposições relacionadas à conformidade dos níveis de energia elétrica em regime permanente.

Atualmente, a maioria dos sistemas de potência tem operado próximo dos seus limites máximos de carga. Este fato tem ocorrido devido ao aumento do consumo, das restrições econômicas e ambientais para a expansão da geração de energia elétrica e da

instalação de novas linhas de transmissão de energia, o que tem comprometido a qualidade da tensão fornecida [28].

A adoção de Reguladores de Tensão com Comutador Eletrônico de *tap's* permite que seja obtida uma regulação de tensão mesmo diante de VTCDs (Variação Transitória de Curta Duração) [3], [4], [5], ou seja, ter-se-á uma regulação de tensão em uma faixa mais ampla, além de uma tensão de melhor qualidade. Isto é possível pelo fato de o comutador, baseado em semicondutores de potência, permitir uma mudança de *tap* de forma direta, sem a necessidade de passar os *taps* de forma sequencial, como ocorre no comutador eletromecânico [27]. Sendo assim, o comutador eletrônico proporcionará a variação direta entre os diferentes *taps*. A dinâmica superior, no que respeita ao tempo necessário a uma troca de *taps*, é uma das principais vantagens do RT com comutador eletrônico. Isso se deve à utilização de chaves semicondutoras ao invés de chaves mecânicas.

Os reguladores de tensão com comutadores eletrônicos de *taps* apresentam uma grande variedade de topologias. Ainda, porém, não se chegou a um consenso sobre qual seria a topologia mais indicada para cada tipo de alimentador e características de consumidor. A grande maioria das topologias não foi estudada de forma sistemática, e a literatura técnico-científica limita-se a explorar alguns aspectos funcionais ou de concepção dos comutadores eletrônicos de *taps*. Dessa maneira, a topologia S-DVR, assim nomeada em [24] e ainda pouco estudada, mostra-se como uma topologia consideravelmente promissora.

Os reguladores de tensão com comutadores eletrônicos de *taps* apresentam duas formas distintas de operação, classificadas como Tipo A ou Tipo B; além disso,

conforme muda o sentido do fluxo de potência no alimentador, pode existir uma alternância desses modos de operação. O Tipo B é um modo com comportamento linear e insusceptível a variações na tensão de entrada (desde que estas estejam dentro dos limites operacionais do RT). Por sua vez, o Tipo A apresenta um comportamento não linear, em que a parcela de compensação é sensível à tensão de entrada. Os estudos relativos às relações combinacionais dos taps e das chaves semicondutoras, operação e sensibilidade do regulador do Tipo A e contribuições na metodologia construtiva, fazem parte do escopo deste trabalho.

## 1.4 Contribuições do Trabalho

O estudo proposto nesta tese abrange os reguladores de tensão com topologia S-DVR, mais especificamente o comutador eletrônico de *tap's*. Também serão estudados os comportamentos relativos à operação como Tipo A e sua comparação em relação ao Tipo B. Será abordada a metodologia construtiva do RT e, por fim, serão analisados os comportamentos referentes ao modelo digital implementado no PSCAD (simulador de circuitos elétricos) e o desempenho do RT operando em excitação variável (Tipo A) em um protótipo experimental.

Em [24], foi mostrada a implementação de um S-DVR aplicada à resolução de problemas de energia e sua descrição qualitativa da topologia. Não foram abordados, porém, os aspectos relativos à modelagem dos estados operacionais das chaves semicondutoras em suas diversas combinações e condições restritivas, sendo esses assuntos o tema do capítulo 3. Nesse sentido, este trabalho deverá auxiliar os engenheiros e projetistas de reguladores de tensão na implementação das lógicas de

disparo, proteção e projetos de circuitos de acionamento dos semicondutores de potência que compõem o comutador.

Quanto ao modo de operação Tipo A, fez-se um estudo e modelagem a fim de determinar sua região de operação e as vantagens e desvantagens que apresenta em relação ao Tipo B. A relação entre a tensão não regulada e a parcela de compensação foram determinadas de tal forma que é possível estimar suas implicações na faixa dinâmica de compensação. Com base nessas informações foi determinada a melhor região de operação para o Tipo A.

Foi proposto um algoritmo para a obtenção dos valores de *tap's* que permitem a maximização da faixa dinâmica do regulador ou um aumento do número dos níveis de compensação repetidos. Com isso, pode-se obter um regulador com uma faixa mais ampla de compensação ou com mais caminhos para um mesmo nível. Esse último contribui para um regulador com maior confiabilidade, enquanto o outro possibilita que o desempenho seja aumentado.

O trabalho também apresenta um protótipo de regulador de tensão com topologia S-DVR operando como Tipo A. O protótipo permite a regulação em média tensão (nominal de 8kV). Nessa bancada de teste pode-se controlar a tensão de entrada do regulador entre 0 e 8kV, sendo possível emular os comportamentos da rede de distribuição referentes às variações na amplitude e carga. O RT tem 41 níveis de compensação, sendo 20 para sobretensões e outros 20 para subtensões, ou seja,  $\pm 10\%$ , com uma resolução de 0,5%. O sistema é dotado de um autotransformador e um comutador eletrônico de *taps*, possibilitando os testes operacionais relativos à troca de taps e regulação de tensão.

Em síntese, as principais contribuições desta tese para os reguladores de tensão do tipo S-DVR são:

- proposta de um sistema de controle que permite o ajuste da sensibilidade do regulador em relação à tensão de entrada;
- proposta de um modelo de comutador que permite investigar a topologia localizando todas as possibilidades de *taps* e combinações de chaves semicondutoras;
- estudo das diversas configurações topológicas dos reguladores de tensão do tipo S-DVR;
- estudo de uma metodologia que utiliza álgebra booleana para modelar comutadores eletrônicos pelo viés das chaves semicondutoras, a fim de determinar seus estados permitidos e suas restrições topológicas;
- modificação da metodologia de análise de circuitos dos comutadores que utilizam álgebra booleana para tratar das pontes H e derivações;
- estudo da curva de compensação dos RTs com topologia S-DVR operando como Tipo A, determinando o comportamento da curva de compensação nas regiões de afundamento e de sobretensão. Elaboração da métrica de avaliação de desempenho do RT nessas regiões;
- elaboração de uma metodologia construtiva que permite a otimização da topologia, a determinação da faixa dinâmica, a relação dos *tap's* e a otimização da resolução mínima do RT.

# Capítulo 2

## 2 Reguladores de Tensão com Comutadores de *tap's*

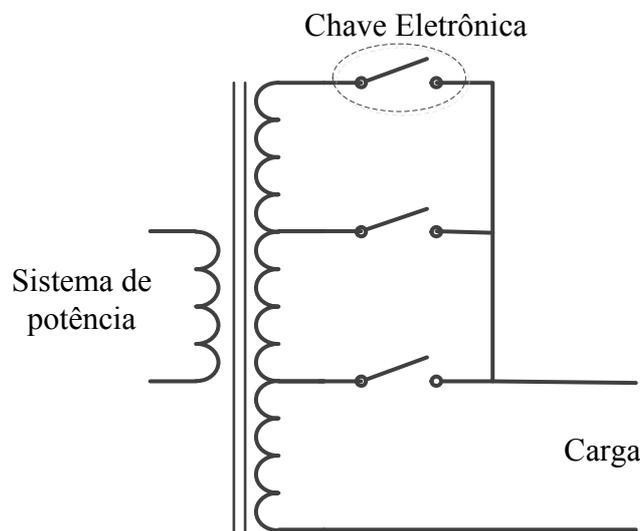
Este capítulo trata do regulador de tensão com comutador de *tap's* com topologia S-DVR. Serão analisadas as características operacionais dos comutadores eletromecânicos, suas limitações e desvantagens no que se refere à velocidade de regulação e necessidade de manutenção periódica. O comutador eletrônico de *tap's* (CET) é apresentado como uma solução às principais limitações do comutador eletromecânico. Será observada a evolução do comutador eletrônico nas últimas três décadas e, por fim, será apresentada a topologia escolhida para estudo e análise experimental.

### 2.1 Comutadores de *Taps*

A Figura 2.1 apresenta um diagrama simplificado de um transformador com comutador eletrônico de *Taps*. Neste caso, as chaves mecânicas são substituídas por chaves eletrônicas que, preferencialmente, são do tipo tiristor SCR (*Silicon Controlled*

*Rectifier*). Isso se deve a sua maior capacidade de suportar altos níveis de tensão e corrente, quando comparado com outros dispositivos semicondutores. O fato de não ser utilizado nenhum componente mecânico melhora o desempenho. O equipamento é capaz de dar uma resposta mais rápida às perturbações do sistema, além de serem simplificados significativamente os procedimentos de manutenção.

As chaves eletrônicas utilizadas nos reguladores na construção dos comutadores eletrônicos de *Tap's* devem ser bidirecionais e são frequentemente chamadas de **chaves estáticas CA**. Uma vez que os dispositivos semicondutores comerciais são unidirecionais, várias topologias de chaves CA são descritas na literatura [17], [15], [19] e [29], sendo a maioria composta por tiristores ou por combinação de tiristores e diodos. Uma modelagem do conjunto de chaves, necessárias à composição do comutador eletrônico de *taps* e sua interação com o circuito magnético, é uma das principais contribuições deste trabalho.



**Figura 2.1 - Diagrama Simplificado de um Transformador com Comutador Eletrônico de *tap's*.**

Na Figura 2.2 são mostrados alguns destes circuitos. Quando se utiliza o SCR, a conexão em antiparalelo da Figura 2.2(a) é a estrutura de chave CA convencional. Os

outros circuitos mostrados na Figura 2.2 são opções para a construção de chaves bidirecionais com tiristores do tipo SCR ou GTO (*gate turn-off thyristor*) utilizando arranjos de diodos. Os GTOs assimétricos possuem maior capacidade de potência do que os do tipo simétrico, entretanto devem ser usados com diodos em série, pois sua capacidade de bloqueio em alta tensão é muito limitada. Os circuitos *snubbers*, para proteção das chaves, foram omitidos em todos os circuitos.

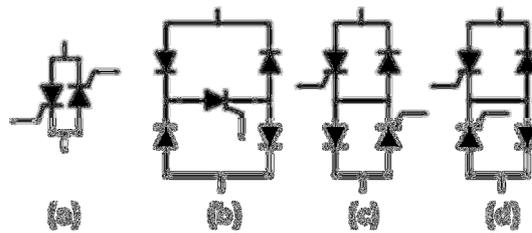


Figura 2.2 - Tipos de Configurações de Chaves CA.

## 2.2 Reguladores Automáticos de Tensão

Nessa seção será apresentada uma breve descrição destes reguladores bem como algumas terminologias e definições utilizadas. Também serão abordadas suas limitações de operação quanto às exigências atuais por melhor qualidade de energia.

Os RTs são equipamentos que possibilitam a manutenção da tensão em um sistema de distribuição, dentro de uma determinada faixa operacional, mesmo quando esta fica submetida a uma variação de tensão fora dos níveis estabelecidos. Além do controle do nível de tensão, o regulador automático possibilita ajustes de largura de faixa, tempo de retardo e faixa de regulação.

Os Reguladores de Tensão são empregados em subestações, alimentadores, alimentadores longos e alimentadores rurais para compensar a queda de tensão excessiva e melhorar o perfil da tensão [30].

### 2.2.1 Descrição Geral do Regulador de Tensão

O tipo mais comum de regulador de tensão utilizado pelas concessionárias de distribuição de energia é aquele constituído por um autotransformador monofásico imerso em óleo isolante, com vários terminais, derivações ou *taps* no secundário, que constituem os chamados degraus de tensão (níveis de compensação). São geralmente denominados *Regulador de Tensão por Degraus* (*Step-Voltage Regulators, SVR*) [31]. Cada *tap* proporciona um nível ou degrau de tensão que é conectado à carga por meio de uma chave automática mecânica, comumente denominada de *comutador de derivação em carga* (*on-load tap-changer*) [8], [9], ou seja, a operação do equipamento é feita sem interrupção no fornecimento de energia.

A topologia básica dos reguladores de tensão por degraus é similar ao de um autotransformador com derivações que podem ser comutadas em carga. Sendo assim, além do acoplamento magnético é estabelecido um acoplamento elétrico, via comutador eletromecânico, ou eletrônico, considerando o caso em estudo. Nesta situação, uma parte da potência é transferida eletromagneticamente (potência transformada) e outra parte é transferida de forma direta.

## 2.3 Reguladores do Tipo A e do Tipo B

A norma ANSI/IEEE C57.15 [32] classifica os reguladores de tensão com comutadores de *tap's* em dois grupos: Tipo A e Tipo B:

- I. Tipo A, ou excitação variável, ocorre quando o enrolamento de excitação (ou principal) está em paralelo com a fonte de alimentação, fazendo com que seja submetido diretamente às variações de tensão da fonte. A Figura 2.3 (a) ilustra o diagrama esquemático simplificado de um Regulador de Tensão do Tipo A [33].

II. Tipo B, ou excitação fixa, ocorre quando o enrolamento de excitação é localizado do lado da carga, de forma que seja submetido à tensão regulada. A Figura 2.3 (b) mostra o diagrama esquemático simplificado de um Regulador de Tensão do Tipo B [33].

Cabe ressaltar que os Enrolamentos de *Taps* da Figura 2.3 estão bobinados sobre o mesmo núcleo magnético que os Enrolamentos de Excitação. Outra premissa que deve ser adotada no decorrer do texto está relacionada à equivalência dos termos Bobina de Regulação ( $L_R$ ), Enrolamento de *Taps* e Enrolamentos de Regulação. Também se adotou o termo Bobina de Excitação como equivalente a Enrolamento de Excitação ou Principal.

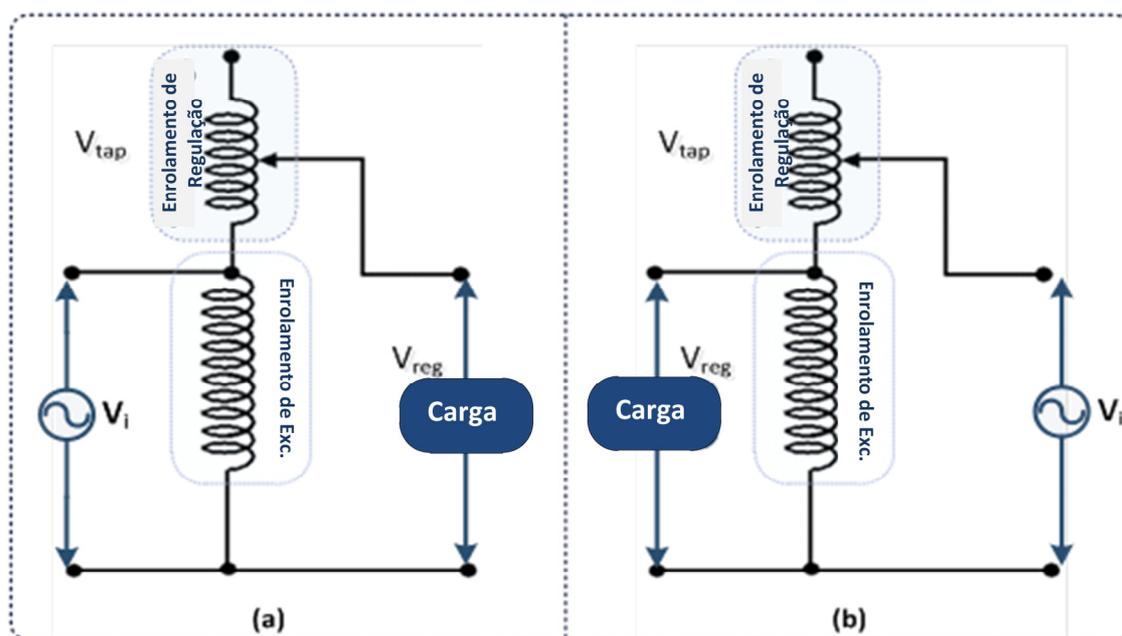


Figura 2.3 - Diagrama Esquemático do Regulador de Tensão – (a) Tipo A e (b) Tipo B [25].

Neste trabalho, em particular, o estudo será direcionado para a operação em excitação variável e sua comparação com o RT operando em excitação fixa. A Figura 2.4 representa o Regulador de Tensão do Tipo A configurado como redutor de tensão.

Nesta situação, a ocorrência de uma elevação de tensão no lado da fonte é regulada de forma a manter a tensão no patamar anterior à ocorrência do distúrbio que acarretou a elevação.

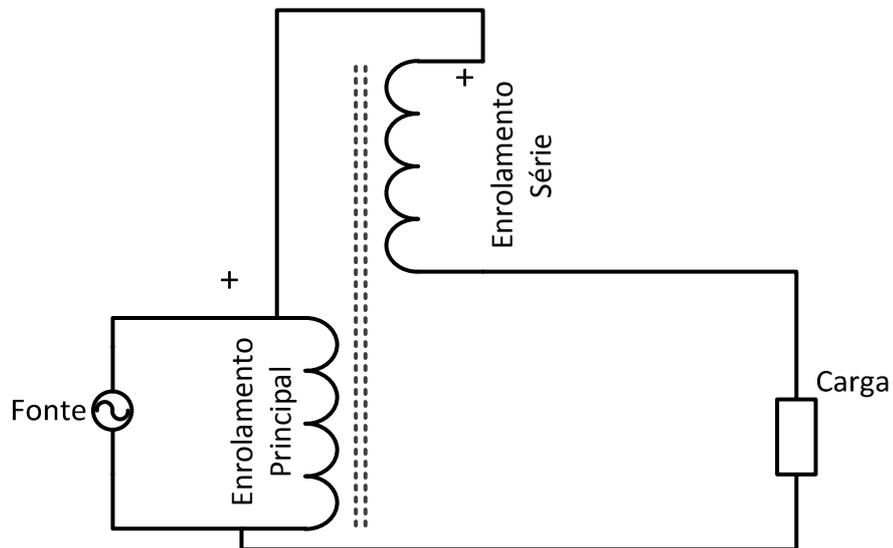


Figura 2.4 – Conexão do Regulador de Tensão como Redutor – Tipo A.

De forma similar, o Regulador de Tensão do Tipo A pode ser configurado como elevador de tensão, conforme ilustrado na Figura 2.5.

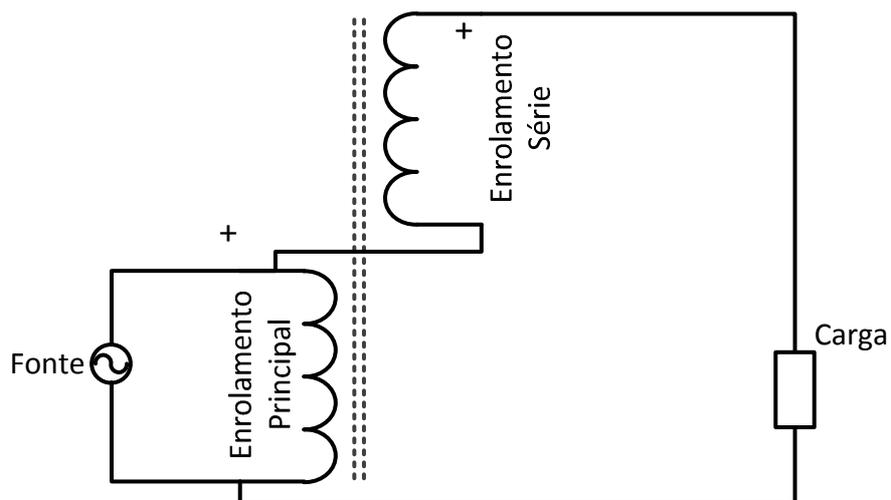


Figura 2.5 – Conexão do Regulador de Tensão como Elevador – Tipo A.

A operação como redutor ou elevador de tensão é definida pela polaridade da bobina série. Dessa forma, pode-se operar nesses dois modos utilizando uma chave seletora, a qual está inserida no circuito da Figura 2.6. Isso torna possível subtrair ou adicionar a tensão do enrolamento série, acarretando na operação de redutor ou elevador da tensão de saída.

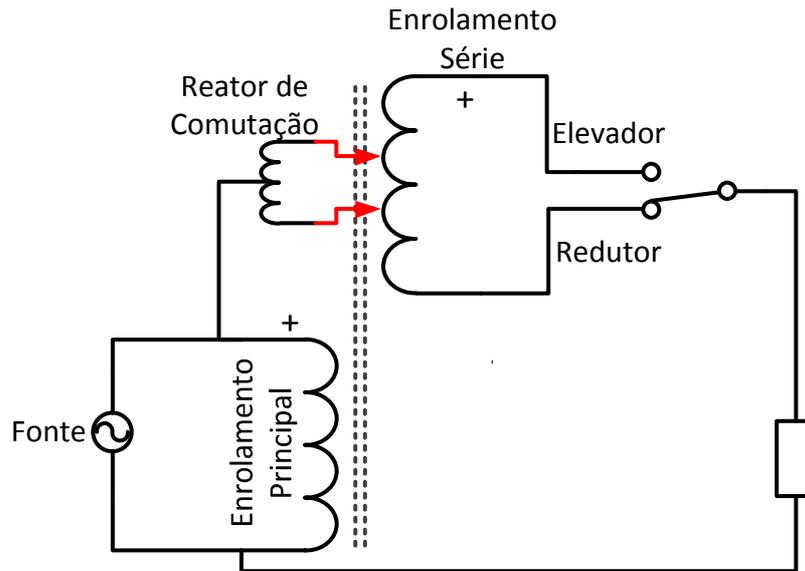
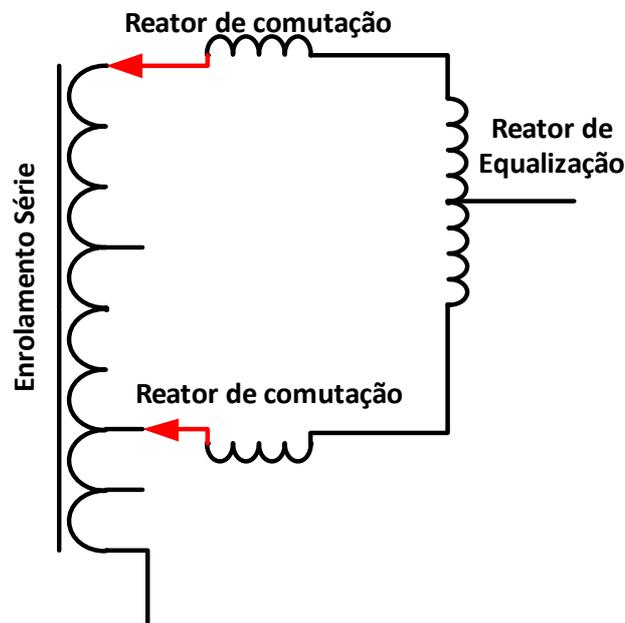


Figura 2.6 – Diagrama Esquemático do Regulador de Tensão do Tipo A Geral.

## 2.4 Regulador de Tensão com Comutador Mecânico de Taps

A união do circuito da Figura 2.4 e Figura 2.5 via chave seletora possibilita que os *tap's* que formam a bobina de regulação sejam utilizados de forma aditiva ou subtrativa. Os *taps* determinam os degraus de tensão a serem considerados no circuito. A ocorrência de uma comutação entre *taps* adjacentes é feita sem que a corrente circulante seja interrompida (*on-load tap-changer*). Isto é possível devido à utilização do reator de comutação [17] que consta no diagrama esquemático da Figura 2.6.

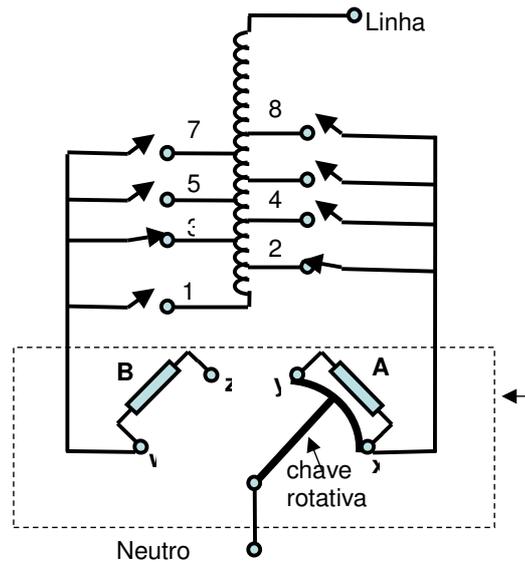
O reator de equalização visa a limitar o desgaste dos contatos durante a troca de *tap* em decorrência da taxa de variação de corrente ( $L_R \frac{di}{dt}$ ). O desgaste dos contatos é evitado colocando-se uma bobina (reator de equalização) entre o reator de comutação e as derivações dos *taps*, conforme Figura 2.7. A inclusão da bobina de equalização possibilita que o valor da corrente de circulação  $I_C$  no reator seja mantido constante, independente da posição que o comutador estiver operando.



**Figura 2.7 – Circuito de Mudança de Taps com o Reator de Equalização junto ao Reator de Comutação.**

A Figura 2.8 ilustra o complexo circuito de um comutador eletromecânico de *taps* em carga. A chave rotativa tem por função garantir a troca de *taps* sem que ocorram interrupções na carga ou curtos circuitos entre as derivações [17]. Nesse circuito, o dispositivo responsável por selecionar os *taps* (*Tap selector*) é representado por um conjunto de chaves que são ligadas às derivações, porém, em geral, funciona como uma engrenagem acionada por motores.

Esta conexão é feita sempre sequencialmente, conforme indica a numeração de *taps* mostrada na Figura 2.8. O comutador mecânico conecta a próxima posição de *Tap* antes de desconectar a posição em que ele se situa. Nesta operação, para se evitar a ocorrência de alta corrente devido ao curto-circuito entre os enrolamentos, são colocados resistores direcionadores (**A** e **B** na Figura 2.8) ou reatores em série [17].



**Figura 2.8 – Transformador com Comutador Eletromecânico de *Taps* em Carga (*on-load Tap changer*) [17].**

## 2.5 Limitações e Dificuldades de Operação em Carga

Há várias décadas a tecnologia dos reguladores de tensão com comutadores eletrônicos de *tap's* vem sendo desenvolvida e utilizada ao redor do mundo [7]. Para atender normas gerais de operação, esses equipamentos foram se modificando. Algumas dessas regras são estabelecidas por órgãos internacionais, como pode ser verificado em [9], [26], [32], [34], [35]. No caso do Brasil, a ANEEL é o órgão responsável pela regulamentação da qualidade de energia e por estabelecer os limites dos níveis de tensão pela resolução 505/2001 [36] reformulada na resolução 676/2003 [1]. De um modo

geral, tanto as resoluções internacionais quanto as nacionais concordam entre si. Dessa forma, os reguladores de tensão são construídos seguindo a mesma metodologia em todo o mundo [7].

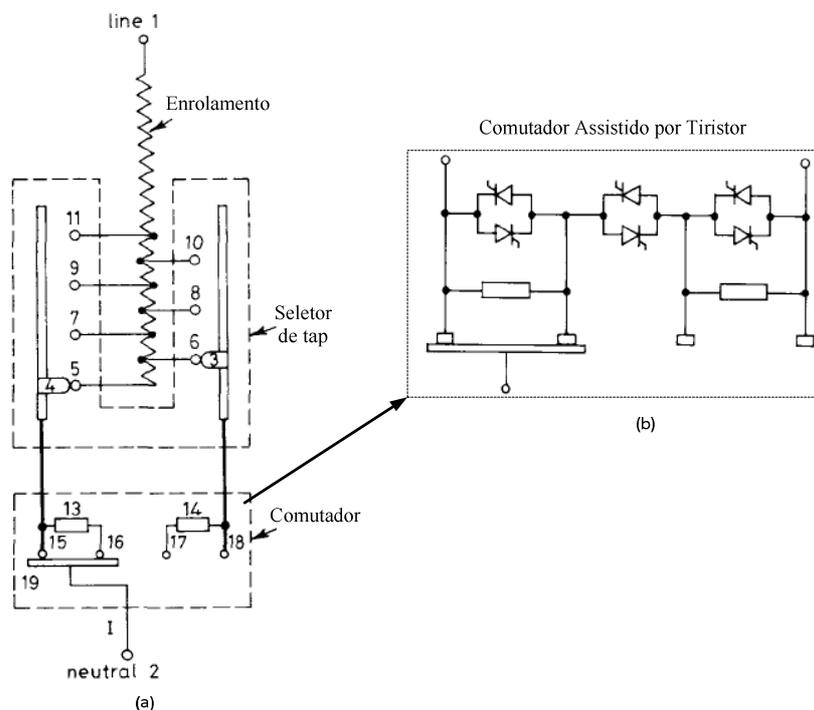
Durante a troca de *taps* surgem arcos elétricos [12] que deterioram os contatos dos comutadores e contaminam o óleo isolante. Estes dois eventos criam a necessidade de manutenção periódica dos comutadores mecânicos [21]. Dessa forma, a manutenção desses dispositivos é considerada muito crítica [7], [11], [37], sendo ela um fator preponderante para o desempenho, confiabilidade, tempo e custos de operação. As causas de degradação do RT, segundo [7], podem ser as seguintes: ambientais, devido à exposição à chuva e sol; “stresses” térmicos, causados pelos ciclos de operação de carga (*load cycling*); umidade interna e perda de óleo e mecânicas, por falhas no sistema de ventilação, motor e outros elementos que compõem o circuito eletromecânico do comutador de *taps*. Dessas, as falhas mecânicas são consideradas as mais graves [10].

## 2.6 Evolução dos Comutadores de *Tap's*

Nas três últimas décadas houve um esforço para eliminar as desvantagens dos comutadores eletromecânicos de *tap's*, sendo o avanço das chaves eletrônicas de potência o grande motivador desse processo. Assim sendo, uma extensa pesquisa centrou-se na concepção e desenvolvimento de comutadores utilizando interruptores eletrônicos [12]. A aplicação de dispositivos de eletrônica de potência desenvolveu-se em duas linhas que podem ser classificadas como: Assistido por Tiristor e Comutadores Eletrônicos de *Tap's*.

## 2.7 Comutação Assistida por Tiristor

A comutação assistida por tiristor utiliza um SCR durante os processos de troca de *tap's*, o que reduz o arco nos contatos. Na Figura 2.9 é apresentado o sistema convencional de troca de *taps*, nomeado apenas como comutador (Figura 2.9 (a)), e o comutador assistido por tiristor (Figura 2.9 (b)). Durante uma troca convencional os contatos 15, 16, 17, e 18 são submetidos a arcos. No comutador assistido por tiristor o arco é suprimido pelo acionamento dos tiristores [23].



**Figura 2.9 – Comutação assistida por tiristor: (a) comutador convencional, (b) comutador assistido por tiristor [23].**

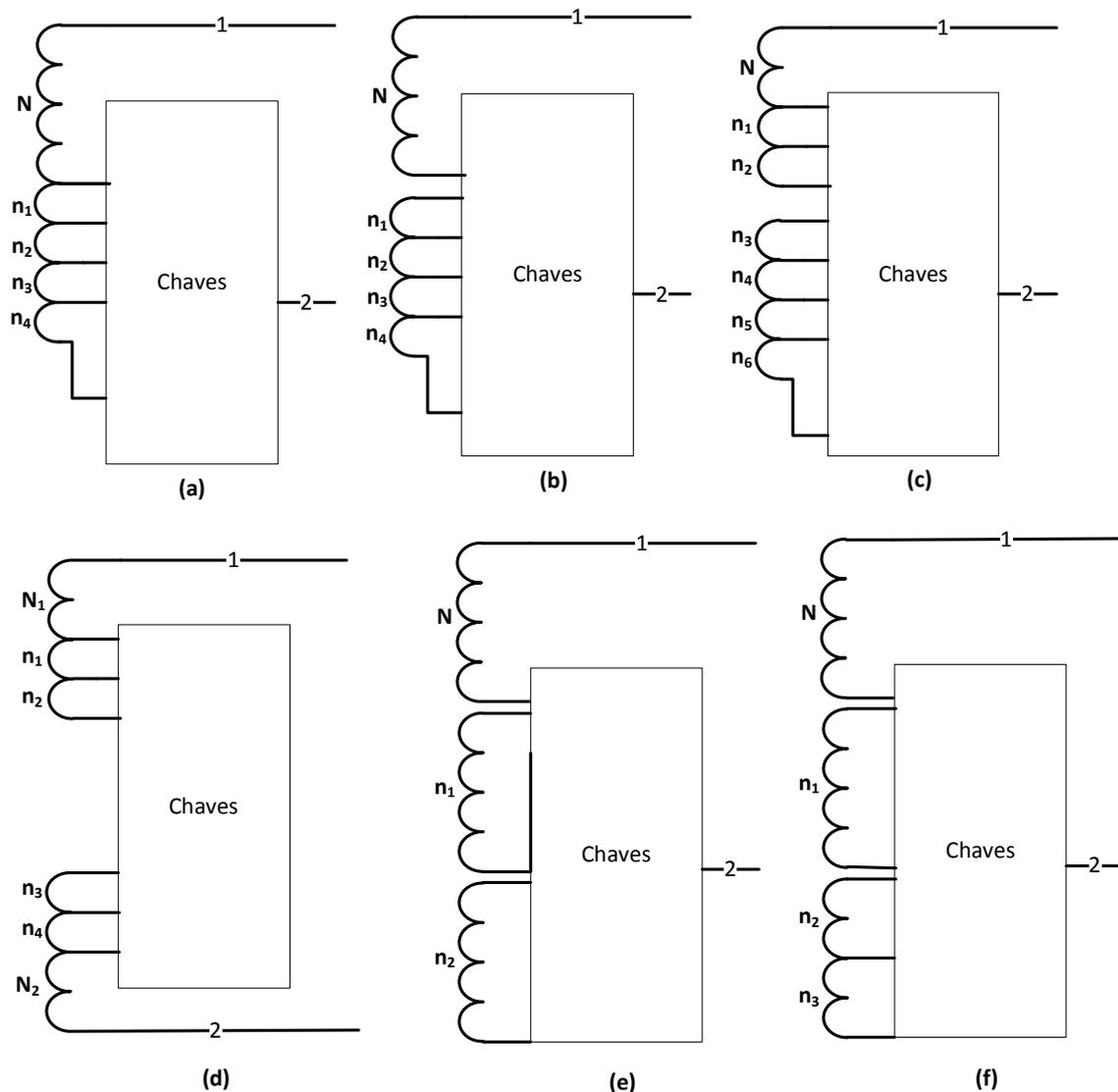
A comutação assistida por tiristor resolve os problemas relacionados ao arco elétrico decorrente da troca de *tap's*. Os reguladores eletromecânicos, contudo, que empregam essa tecnologia, continuam lentos [27], não sendo adequados para a compensação de VTCDs, pois os RT eletromecânicos chegam demorar 40 segundos para compensar uma variação na tensão de entrada.

## 2.8 Reguladores de Tensão com Tap Eletrônico

Apesar do contínuo desenvolvimento dos comutadores mecânicos de *tap's*, eles permanecem com limitações consideráveis e desvantagens. Dessas, pode-se citar: falhas no comutador e arcos e manutenção periódica com custos elevados e com tempos de reação lentos (entre 3 e 40 segundos) [27]. Por isso, um grande esforço está sendo realizado no desenvolvimento de um comutador eletrônico de *tap*. A ideia de um comutador eletrônico de *taps* foi proposta em 1973 por Musgrave em [27]. Apenas em 1986, no entanto, o primeiro protótipo de campo de um regulador de tensão com comutador eletrônico de *Tap* foi posto em operação pela ABB *Components* [5]. Nesse contexto, surge na literatura uma diversidade de propostas que envolvem distintos projetos de transformador, conexões de chaves e técnicas de controle para fornecer o nível de tensão dentro dos limites estabelecidos. Em grande parte dos estudos os problemas abordados estão relacionados à minimização das perdas de condução pelas chaves, crescimento do número de degraus (*steps*) de tensão disponível, aumento da rapidez na resposta a faltas e redução de custos.

### 2.8.1 Diferentes configurações de enrolamentos utilizados em comutadores de *tap's*

Em [12], são apresentadas as configurações de enrolamentos típicas de comutadores convencionais e eletrônicos (Figura 2.10). Os comutadores eletrônicos foram substituídos por um modelo caixa preta, onde  $N$  representa o enrolamento de excitação ou principal e  $n_x$  os enrolamentos de regulação.



**Figura 2.10 - Estruturas de enrolamentos para comutadores de *taps* [12].**

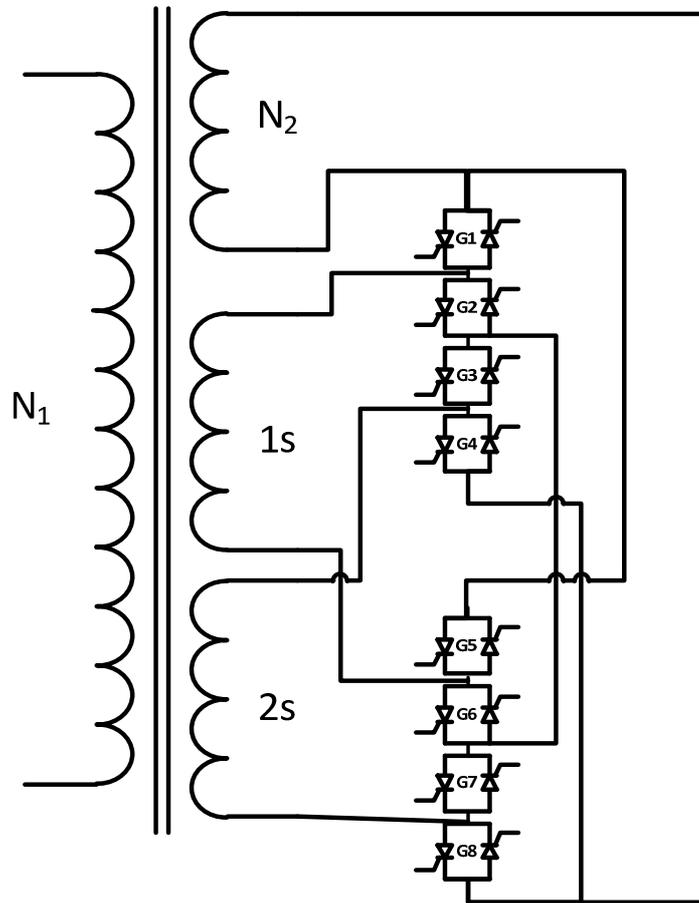
Nas topologias da Figura 2.10 (a), (c) e (d), a bobina principal está ligada aos enrolamentos de regulação [12], ou seja, não se pode subtrair a tensão dessas derivações da bobina principal. Já na Figura 2.10 (b), (e) e (f), os enrolamentos de regulação não estão conectados à bobina principal [12]; dessa forma a operação de subtração de tensão pode ser realizada. Isso possibilita que o número de níveis de tensão seja maior que o número de derivações, uma característica desejável, posto que o número de níveis de compensação é maximizado em relação às topologias convencionais. A topologia (b)

não permite que as derivações sejam subtraídas entre si; por sua vez, a topologia (c) permite que  $n_1$  e  $n_2$  possam ser subtraídas de  $n_{3-5}$ . Já na configuração (e), todas as bobinas de regulação podem ser subtraídas umas das outras, inclusive da principal, enquanto que na configuração topológica (f),  $N$ ,  $n_1$  e  $(n_2, n_3)$  podem ser subtraídas ou somadas entre si, porém  $n_2, n_3$  não. As topologias que apresentam enrolamentos de regulação separados entre si e do enrolamento principal, fazem parte do escopo deste trabalho e terão seus comutadores eletrônicos modelados no próximo capítulo.

## 2.8.2 Circuito com Comutador Baseado em Tiristores

Em [24] são desenvolvidas três variações topológicas da estrutura de taps apresentada em [12] (Figura 2.10 (e) (f)), denominadas S-DVR6, S-DVR8 e S-DVR12. Esse RT com comutadores eletrônicos de *tap's* foi implementado utilizando tiristores tipo SCR para desempenhar o papel do comutador eletromecânico. Os arranjos das bobinas de regulação e suas ligações aos semicondutores de potência dão origem as três topologias, as quais se diferenciam entre si pelo número de níveis de compensação. Os enrolamentos de compensação são seccionados e se conectam entre si utilizando as chaves de potência; dessa forma permitem que suas tensões possam ser subtraídas, fato que contribui para a obtenção de um grande número de níveis de tensão, mesmo com poucas derivações.

A Figura 2.11 mostra um diagrama esquemático de uma fase do regulador de tensão com chaves CA, baseada em conexão antiparalela de *SCR's* [24]. O RT é construído utilizando um transformador com *tap's* no secundário, onde: enrolamento primário  $N_1$ ; enrolamento secundário  $N_2$  com dois enrolamentos de regulação 1S e 2S. O comutador eletrônico é composto de oito chaves CA (G1-G8) que proporcionam sete níveis de regulação.



**Figura 2.11 – Regulador de Tensão de Sete Níveis com Comutador Eletrônico de Taps Baseado em Tiristores Tipo SCR.**

A Tabela 1 mostra os percentuais de tensão a serem corrigidos e as correspondentes chaves a serem acionadas.

**Tabela 1: Nível de compensação por degrau de tensão [24].**

Sobretensão/Afundamento (%)	Número de Degraus de Compensação	Tiristores a serem ativados	Tensão de Saída (na Carga)
+7.5	- 3	G5, G2, G7, G4	$V_s * (N2-3S)/N1$
+ 5.0	- 2	G1, G2, G7, G4	$V_s * (N2-2S)/N1$
+2.5	- 1	G5, G2, G7, G8	$V_s * (N2-1S)/N1$
0	sem regulação	G1, G2, G7, G8	$V_s * (N2)/N1$
- 2.5	+1	G1, G6, G7, G8	$V_s * (N2+1S)/N1$
- 5.0	+ 2	G1, G2, G3, G8	$V_s * (N2+2S)/N1$
- 7.5	+ 3	G1, G6, G3, G8	$V_s * (N2+3S)/N1$

## 2.9 Topologia Escolhida para Análise e Implementação

A topologia com enrolamentos de regulação sem ligação elétrica direta entre si e com o enrolamento principal, mostrou ser a configuração que possibilita o maior número de níveis de tensão dentro das estruturas de enrolamentos apresentados [12]. Por esse motivo, foi a estrutura de taps escolhida para ser estudada e implementada neste trabalho. Dentro dos modos de operação, os RTs operando em excitação variável, ou como Tipo A, também fazem parte deste estudo. A análise dessa forma de operação é motivada pelas características não lineares da curva de compensação e sensibilidade da parcela de regulação à tensão de entrada.

Na Figura 2.12 é apresentada a topologia implementada no estudo. Em [12], essa topologia foi avaliada como a que minimiza a função custo, ou seja, o número de taps obtidos ponderado pelo custo das chaves eletrônicas.

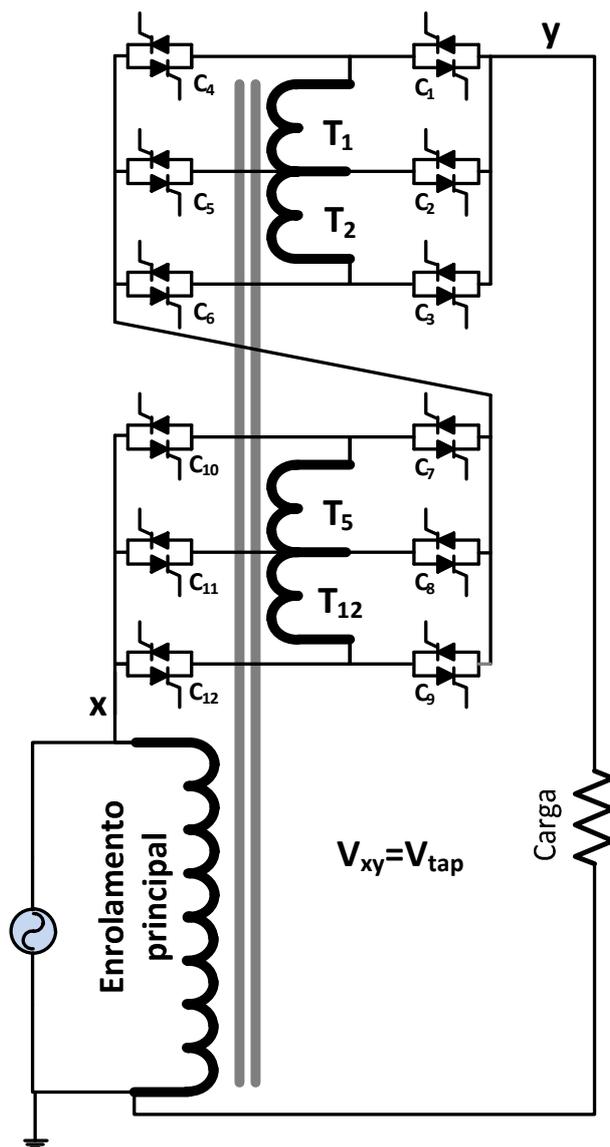


Figura 2.12 – Estrutura Implementada.

### 2.9.1 Representação básica de um regulador de tensão Tipo A

Inicialmente parte-se de que a tensão regulada  $V_{reg}$  é dada pela equação (2.1), sendo a soma da tensão de entrada ou não regulada  $V_i$  com a tensão de regulação ou tensão dos *taps*  $V_{tap}$ , conforme pode ser observado na Figura 2.13.

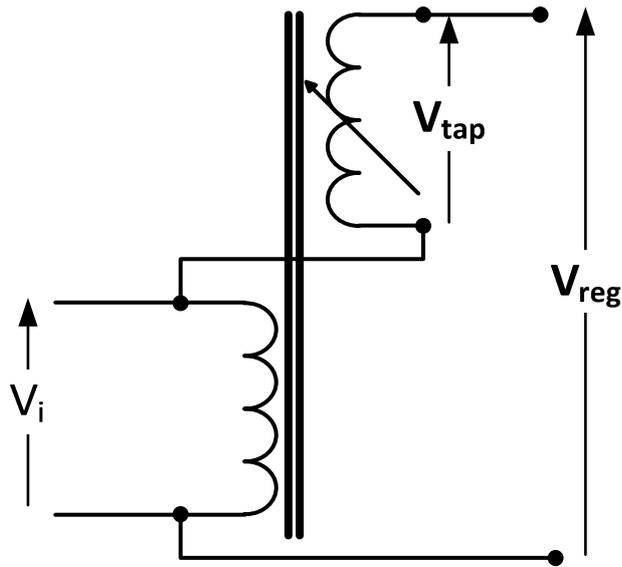


Figura 2.13 - Tensões presentes no RT.

$$V_{reg} = V_i + V_{tap} \quad (2.1)$$

A sensibilidade do RT operando em excitação fixa se deve ao fato de a parcela de compensação ser uma função da entrada  $V_i$ .

$$V_{tap} = f(V_i) \quad (2.2)$$

Como é mostrado na Figura 2.14, existem dois tipos de enrolamentos na topologia em estudo: o de regulação ( $L_{reg1}$  e  $L_{reg2}$ ) e o de excitação ( $L_{exc}$ ). Os de regulação são constituídos por duas bobinas seccionadas entre si, a  $L_{reg1}$  e a  $L_{reg2}$ ; dessa forma, é possível subtraí-las sem curto-circuitar o autotransformador. O enrolamento  $L_{reg1}$  está dividido em dois taps,  $T_1$  e  $T_2$ , e o  $L_{reg2}$  está dividido em  $T_5$  e  $T_{12}$ , onde os índices representam o número de vezes que será multiplicado o menor degrau de regulação em cada *tap*. Enquanto  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_5$  e  $T_{12}$  são *taps reais*, o total de combinações por eles

produzidas chega a 41. Nesse caso, os *taps* decorrentes de combinações dos *taps reais* são denominados *taps virtuais*.

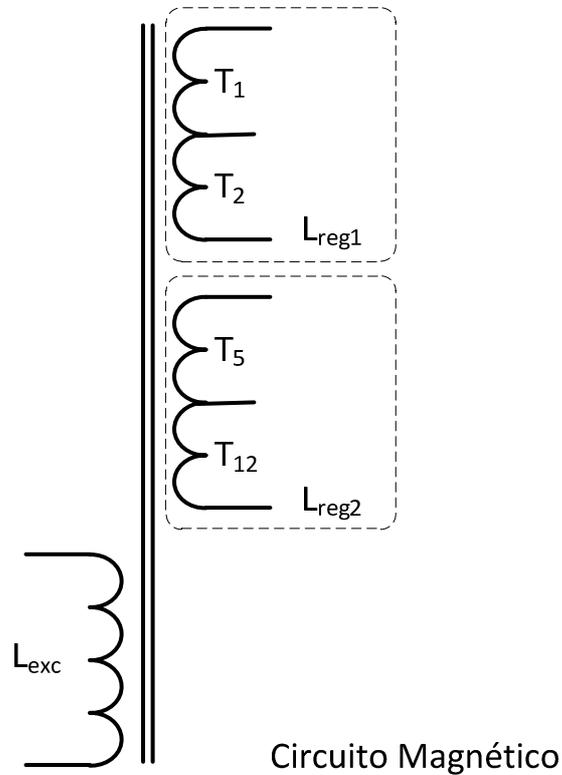


Figura 2.14 – Enrolamento dos *taps*.

As vantagens do RT com comutador eletrônico de *taps*, quando comparados com os comutadores mecânicos, são consideravelmente superiores no que se refere à velocidade de operação e redução na necessidade de manutenção. Decorrente do aumento na velocidade de operação, os dispositivos que utilizam comutadores eletrônicos conseguem compensar VTCD's, o que os torna capazes de atender à demanda das cargas sensíveis. Mediante análise bibliográfica verificou-se a necessidade de um estudo mais sistêmico das topologias de RT com comutadores de *tap's*, principalmente no que diz respeito às chaves semicondutoras e suas relações operacionais com os enrolamentos de regulação. Assim, o tema do próximo capítulo

visa a preencher essa lacuna referente à modelagem dos comutadores eletrônicos de *tap's*, quanto aos desdobramentos de configuração das topologias S-DVR.

# Capítulo 3

## 3 Modelagem do Comutador Eletrônico de Taps

Ao longo da pesquisa bibliográfica desta tese observou-se a inexistência, na literatura científica, da formalização matemática da Topologia S-DVR. Dessa forma, a pretensão deste capítulo é a de introduzir um vocabulário padrão e definir postulados e axiomas que culminarão na formalização de uma teoria consistente dos reguladores/compensadores de tensão do tipo S-DVR, à luz da lógica e livre de paradoxos. Das possibilidades criadas pela formalização, vale ressaltar duas que justificam este esforço: a elaboração de uma metodologia para a construção do S-DVR e a obtenção de uma estratégia de controle para esses reguladores. Também cabe destacar que a busca de uma estrutura lógica e sistemática facilitará o encontro de propriedades, modelos simplificados e a futura obtenção de modelos mais complexos que o aqui exposto.

A formalização da teoria sobre os reguladores apropria-se da álgebra booleana para descrever as combinações das chaves eletrônicas utilizadas no comutador do regulador de tensão. Após isso, faz-se necessário a modificação da álgebra booleana, apropriando-se de sua capacidade de manipulação binária e estendendo o seu conjunto numérico para um conjunto de propriedades binárias. Por sua vez, combinam-se as funções binárias e funções aritméticas que descrevem as propriedades do circuito magnético do regulador de tensão. A criação de uma álgebra booleana modificada e sua combinação com elementos de álgebra linear para tratar de um conjunto de propriedades dos circuitos em questão, dá uma nova conotação a este trabalho possibilitando como contribuição uma ferramenta para análise de circuitos, que surge como uma nova proposta de modelagem de circuito que mistura elementos com propriedades binárias de funcionamento, com propriedades contínuas e discretas.

### 3.1 História da Álgebra Booleana

Em 1847 George Boole publica o livro *The Mathematical Analysis of Logic* e no ano de 1854 o artigo *An Investigation of the Laws of Thought on Which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities*; este último trabalho complementa o livro no que respeita à formulação precisa da lógica matemática e estabelece os fundamentos da álgebra booleana. Após esse período, tem-se o tratado de Ernst Schröder, que aprimora a álgebra booleana no trabalho intitulado *Vorlesungen Über die Algebra der Logik* [38].

### 3.2 Princípios e definições adotados no processo de modelagem

Os princípios e postulados necessários à formulação do modelo do regulador de tensão com topologia S-DVR serão abordados nesta seção, bem como as definições e

princípios utilizados na elaboração da metodologia construtiva. Serão abordados temas como a resolução mínima, faixa dinâmica de compensação e relações matemáticas que dão origem aos níveis de compensação.

### 3.2.1 Resolução do regulador de tensão

A resolução  $T_1$  do RT pode ser definida como a menor relação de transformação. Considerando  $n$  como o número de espiras da bobina principal do RT e  $n_1$  como o número de espiras da derivação com menor nível de compensação, obtém-se a equação (3.1).

$$T_1 := \frac{n_1}{n} \quad (3.1)$$

### 3.2.2 Série numérica das relações de transformação do RT

O conjunto dos valores compreendidos pela faixa dinâmica de compensação é definido como a série numérica das relações de transformação – (3.2). Dessa forma, pode-se afirmar que existe uma série adaptada a cada variação da topologia dos RTs. Cada uma dessas séries permite a construção de uma sequência crescente e decrescente, com espaçamento entre valores constantes e pertencentes ao conjunto dos números racionais.

$$Tap := \{T_1, T_2, \dots, T_{m-1}, T_m\} \quad (3.2)$$

### 3.2.3 Ganho do Regulador de Tensão

Dividindo-se a sequência (3.2) pela resolução do RT ( $T_1$ ) – (3.1), é obtida uma sequência definida como Série dos Ganhos do RT; essa é um subconjunto dos números inteiros sem o zero, **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$A := \frac{Tap}{T_1} = \{1, 2, \dots, m-1, m\} \quad (3.3)$$

### 3.2.4 Ganho Zero

Existe uma situação nos RTs que não está prevista nas séries (3.2) e (3.3). Esse evento relaciona-se à situação de não compensação. Quando a tensão de entrada é igual a tensão de saída, define-se uma relação de transformação denominada  $T_0$  – (3.4).

$$0 := \frac{T_0}{T_1} \quad (3.4)$$

Logo, a série (3.2) é redefinida como segue:

$$Tap := \{T_0, T_1, T_2, \dots, T_{m-1}, T_m\} \quad (3.5)$$

Por consequência da definição de Ganho Zero, (3.4) e adição desse conceito na série das relações de transformação do RT, (3.5), o conjunto dos ganhos do regulador de tensão também recebe a adição do Ganho Zero, (3.6).

$$A := \{0, 1, 2, \dots, m-1, m\} \quad (3.6)$$

### 3.2.5 Função de Ganho, Taps Reais e Taps Virtuais

Nos reguladores com topologia S-DVR o número de derivações do circuito magnético na bobina de regulação é diferente do número de níveis de compensação. Isso ocorre porque nesse tipo de circuito de regulação os níveis de compensação podem ser de dois tipos: níveis presentes no circuito magnético, **Taps Reais** ( $T_R$ ) e níveis de compensação obtidos via operações de soma e/ou de subtração dos **Taps Reais**, denominados **Taps Virtuais** ( $T_V$ ).

Dividindo-se os **Taps Reais** pela relação de transformação mínima ( $T_1$ ) obtém-se as **Funções de ganho**. A **Função de Ganho**  $\varphi(i, j)$  possibilita a criação dos **Taps Virtuais** via operação de subtração ou soma. Os índices  $i$  e  $j$  correspondem à bobina de regulação e às derivações respectivamente.

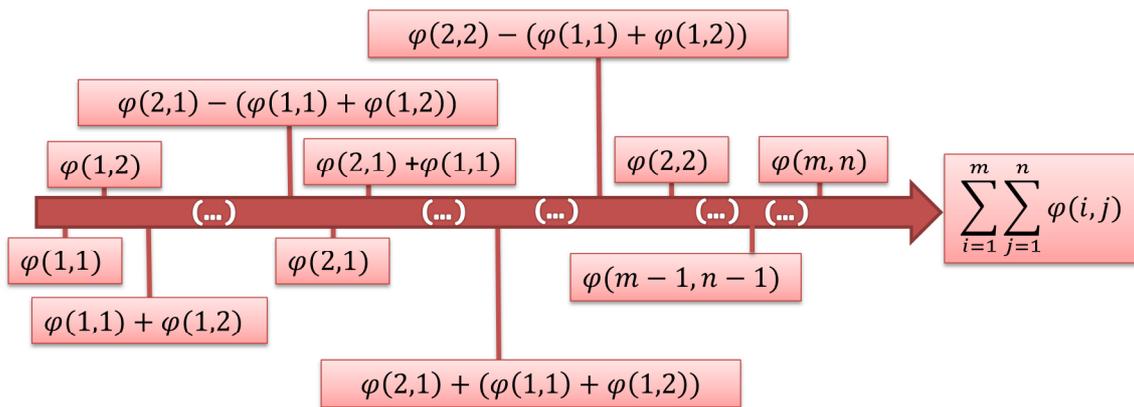


Figura 3.1 - Funções de Ganho e Taps Virtuais.

Na Figura 3.1 estão representadas as Funções de Ganho de um RT ( $\Phi$ ) com  $m$  enrolamentos de regulação e  $n$  derivações por bobina. As Funções de Ganho da Figura

3.1 estão expressas em (3.7), e  $\varphi(1,1)$  determina o menor valor de ganho do regulador de tensão e  $\varphi(m, n)$  o seu maior valor.

$$\Phi = \{\varphi(1,1), \varphi(1,2), \varphi(2,1), \varphi(2,2), \dots, \varphi(m-1, n-1), \dots, \varphi(m, n)\} \quad (3.7)$$

Como  $\varphi(1,1)$  é o menor valor para um ganho, ele corresponde a menor distância entre dois ganhos na reta numérica da Figura 3.1. O último valor da reta dos ganhos corresponde ao somatório de todos os ganhos dos *Taps* Reais.

### 3.2.6 Princípio da Continuidade

A distância entre dois ganhos da série (3.7) e dos valores da Reta Numérica da Figura 3.1 deve ser o próprio  $\varphi(1,1)$  ou um múltiplo desse valor. No desenvolvimento da metodologia construtiva, esse será um dos princípios fundamentais na obtenção das Funções de Ganho e garantirá que a dinâmica de compensação seja contínua ao longo de toda a faixa de compensação.

Existe uma única sequência numérica que determina os ganhos de um regulador de tensão e garante a máxima região de compensação. Esta afirmação é válida desde que o número de derivações e bobinas de regulação mantenha-se constante e seja respeitado o Princípio da Continuidade. Dessa forma, dada uma configuração topológica, só existe uma sequência de ganho que garante maior capacidade de compensação; todos os outros ganhos terão sua capacidade de compensação reduzida e um aumento no número de *Tap's* redundantes.

### 3.3 Modelagem matemática dos compensadores do tipo S-DVR

#### 3.3.1 Modelo matemático para um RT de *Tap* único

O circuito hipotético de um RT com um único *tap* está ilustrado na Figura 3.2. Esse regulador de tensão tem uma função de ganho  $\varphi(1,1)$ , a qual se relaciona com a bobina de excitação por meio da relação de transformação  $T_1$ . Para proporcionar a inversão do caminho da corrente na bobina, existe um arranjo de chaves semicondutoras ligadas em série, *ramos* (Ramo a e Ramo b) e, em paralelo: a essa disposição de componentes dá-se o nome de *Ponte H*. Nessa, as chaves semicondutoras (tiristores no caso) estão ligadas em antiparalelo para garantir a bidirecionalidade da corrente. Os semicondutores estão nomeados como segue:  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  e podem ser compreendidos como variáveis binárias com duas condições de funcionamento ou estados, os quais são definidos como **ligado** ou **desligado**, **conduzindo** ou **não conduzindo**. O enrolamento principal foi omitido nas figuras desse capítulo por não fazer parte da análise.

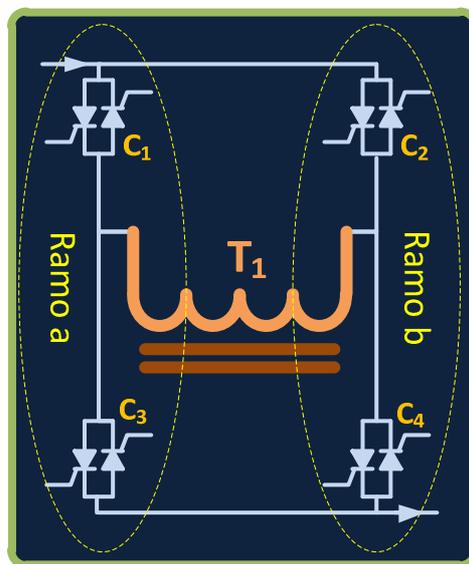


Figura 3.2 - Topologia de comutador eletrônico para um único *tap*.

### 3.3.1.1 Modelo com álgebra booleana

A utilização de álgebra booleana para descrever o circuito do regulador da Figura 3.2, mostra-se uma ferramenta eficaz para modelagem do comutador eletrônico de *taps*, nesse caso do comutador eletrônico do  $T_1$ , circuito formado por  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$ . Estas chaves semicondutoras têm apenas dois estados operacionais. Estes estados são mutuamente exclusivos, ou seja, apenas um deles pode ser assumido a cada instante.

Isso implica que toda a análise deste capítulo se dá em dois estados, ou seja, a chave semicondutora é ideal e, dessa forma, os estados de transição serão desconsiderados.

Para modelar as condições operacionais do regulador de tensão com um único *tap*, deve-se eleger quais serão os fenômenos de interesse e o nível de detalhamento a ser empregado. Em um primeiro momento serão utilizadas apenas as condições em que a tensão de entrada é modificada pelo estado operacional. Isso foi inicialmente descrito em [25]. Também existem as condições em que a tensão de entrada é igual à tensão de saída; essa condição será expressa na forma de equações em um segundo momento. As condições de operação que afetam a amplitude da tensão de entrada podem ser mapeadas como: a tensão de entrada mais a parcela de compensação ou a tensão de entrada menos a tensão de regulação ( $V_i + V_{T_1}$ ,  $V_i - V_{T_1}$ ). Por fim, faz-se necessária a definição das condições proibidas de operação. Esse estado refere-se à possibilidade de ligar as chaves semicondutoras em uma situação de curto-circuito (restrições topológicas). Os estados definidos com restrições topológicas são de grande valia no projeto dos circuitos *gate driver* e na implementação da lógica de disparo das chaves semicondutoras.

### 3.3.1.2 Mapeamento do conjunto de possibilidades do comutador eletrônico de taps

O conjunto de possibilidades de operação das chaves semicondutoras da Figura 3.2 pode ser definido como:  $\{ligado, desligado\}$  ou  $\{ligado, não ligado\}$  ou  $\{1,0\}$ ; qualquer um desses conjuntos binários pode fazer parte na sêxtupla que define as duas constantes da álgebra booleana; nesse caso optou-se por mapear o valor ligado em 1 e o valor desligado ou não ligado em 0 – (3.8):

$$\{1,0\}:\Leftrightarrow\{ligado,desligado\} \quad (3.8)$$

Lê-se a (3.8) como segue: 1 é definido com um outro nome para *ligado* e 0 é definido com um outro nome para *desligado*.

A função booleana que descreve os caminhos da corrente ( $C_{Tap}$ ) no comutador eletrônico de *taps* – Figura 3.2 – está expressa na (3.9). Pode-se dividir a expressão em dois termos: termo 1  $C_1C_4\bar{C}_2\bar{C}_3$  e termo 2 denominado com  $C_2C_3\bar{C}_1\bar{C}_4$ . Essas parcelas estão relacionadas as duas possibilidades de modificar a tensão de entrada ( $V_i$ ) pelo regulador de tensão ( $+V_{T_1}$ ,  $-V_{T_1}$ ). O termo 1 é composto por duas subparcelas: uma está relacionada ao sentido da corrente pela bobina de regulação  $T_1$ , chaves  $C_1C_4$ , e a outra às condições proibidas para a topologia (restrição topológicas), chaves  $\bar{C}_2\bar{C}_3$ . Do mesmo modo, o termo 2 também é composto por duas subparcelas: chaves  $C_2C_3$ , sentido da corrente em  $T_1$  e a condição proibida, chaves  $\bar{C}_1\bar{C}_4$ .

$$C_{Tap} = C_1C_4\bar{C}_2\bar{C}_3 + C_2C_3\bar{C}_1\bar{C}_4 \quad (3.9)$$

Existem duas possibilidades de modificar a tensão de entrada, considerando que a operação binária de disjunção, ou (+), entre os termos  $C_1C_4\bar{C}_2\bar{C}_3$  e  $C_2C_3\bar{C}_1\bar{C}_4$  une essas duas possibilidades em uma única expressão. Os pares de chaves  $C_1C_4$  e  $C_2C_3$  proporcionam que a corrente do sistema circule pela bobina de regulação  $T_1$  nos dois sentidos possíveis. A operação que relaciona os pares de chaves entre si é denominada na álgebra booleana de *conjunção lógica* e implica que as duas chaves estejam acionadas simultaneamente para que a verdade lógica seja atingida. A condição modelada pela conjunção entre o par de chaves  $C_1C_4$  e entre o par de chaves  $C_2C_3$  vem da implicação de estes interruptores estarem em série nas condições de operação: corrente passando por meio da bobina de regulação.

### 3.3.1.3 Restrições topológicas do comutador eletrônico de taps

As variáveis binárias que são barradas em cada termo descrevem as condições proibidas para a topologia do regulador; também determinam a premissa de que apenas uma condição de regulação pode ser assumida a cada instante. Nesse caso, pode-se modelar o comportamento mutuamente exclusivo dos estados de regulação utilizando a operação denominada **ou exclusivo** (*xor*). Dessa forma, pode-se reescrever (3.9) utilizando a operação binária denominada por disjunção exclusiva. Como apenas um dos termos pode ser verdadeiro a cada instante, essa operação modela o comportamento físico do regulador de tensão.

$$C_{Tap} = (C_1 \oplus C_2)(C_3 \oplus C_4) \quad (3.10)$$

### 3.3.2 Tabela verdade do comutador de um único tap

Outra ferramenta de mapeamento das possibilidades de operação de um regulador de tensão é conhecida como tabela verdade, método matemático que permite mapear as condições de operação do comutador eletrônico de *taps*, além de permitir a validação dos modelos boolianos propostos. Nas colunas denominadas como  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  tem-se as chaves do comutador de *taps*. Como cada chave apresenta dois estados pode-se determinar o número de condições associadas a um comutador como  $2^z$ , onde  $z$  corresponde ao número de chaves do comutador; portanto, para esse caso, tem-se 16 ( $2^4$ ) combinações.

Tabela 1 - Tabela verdade de um regulador de único *tap*.

n	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_1 C_4 \bar{C}_2 \bar{C}_3$	$C_2 C_3 \bar{C}_1 \bar{C}_4$	$C_{Tap}$	$C_1 C_4$	$C_2 C_3$
1	0	0	0	0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
2	0	0	0	1	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
3	0	0	1	0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
4	0	0	1	1	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
5	0	1	0	0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
6	0	1	0	1	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
7	0	1	1	0	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	VERDADEIRO
8	0	1	1	1	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO
9	1	0	0	0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
10	1	0	0	1	VERDADEIRO	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO
11	1	0	1	0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
12	1	0	1	1	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO	FALSO
13	1	1	0	0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
14	1	1	0	1	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO	FALSO
15	1	1	1	0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO
16	1	1	1	1	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO

Analisando a Tabela 1 verifica-se a existência de 16 possibilidades para a configuração de 4 chaves semicondutoras, conforme mapeado nas colunas  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$ , porém nem todos os estados são de interesse na operação do circuito. Agrupando as possibilidades utilizando o número de chaves semicondutoras em operação, pode-se

verificar a existência de 5 grupos: *Nenhuma Chave Operando*, *Uma Chave Operando*, *Duas Chaves Operando*, *Três Chaves Operando* e *Quatro Chaves Operando*. Pelo viés da circulação de corrente pode-se agrupar a ponte em três grupos: *Corrente Fluindo para Carga*, *Corrente não Fluindo para Carga* e *Corrente Fluindo Sobre a Bobina de Regulação* (curto-circuito). Também se pode fazer uma análise sobre as possibilidades de regulação ou não. Nesse caso, tem-se a tensão de entrada sendo ou não modificada pelo regulador.

Em uma busca na Tabela 1 pelos cinco grupos ordenados segundo o número de chaves operando, pode-se agrupar as chaves como segue: *Nenhuma Chave Semicondutora Operando* – existe uma possibilidade localizada na linha 1. Essa situação é indesejada, uma vez que não há a circulação de corrente, ou seja, a carga não está alimentada (*Corrente não Fluindo para Carga*). Com *Apenas Uma Chave Operando* tem-se 4 eventos localizados nas linhas 2, 3, 5 e 9. Essa configuração de operação também é indesejada, posto que não possibilita a passagem da corrente pelo regulador. Por sua vez, a condição em que duas chaves semicondutoras estão ligadas simultaneamente pode permitir tanto a passagem da corrente pelo regulador (*Corrente Fluindo para Carga*), como provocar curtos-circuitos nas bobinas de regulação (*Corrente Fluindo Sobre a Bobina de Regulação*). Esse grupo é formado por 6 combinações de chaves, localizadas nas linhas 4, 6, 7, 10, 11 e 13. Qualquer grupo com mais de 2 chaves acionadas simultaneamente (3, 4) provoca curtos-circuitos na derivação. Nessa situação tem-se 4 eventos na tabela com três chaves acionadas simultaneamente – linhas 8, 12, 14 e 15 – e apenas uma configuração com as quatro chaves acionadas concomitantemente – linha 16. Tanto a configuração com três chaves

ativas quanto com quatro são eventos relacionados à *Corrente Fluindo Sobre a Bobina de Regulação* ou curto-circuito.

### 3.3.3 Condição incluindo o zero de compensação

O regulador de tensão com topologia S-DVR é formado por dois elementos de circuito, uma bobina de excitação ou principal, que fica em paralelo com a carga, e outro elemento série responsável pela compensação, o qual é formado pela bobina de regulação e o comutador eletrônico de *taps*. Analisando o elemento série pode-se inferir a existência de três modos distintos: a tensão de entrada é maior que a tensão de saída, a tensão de entrada é menor que a de saída e a condição em que a tensão de entrada é igual à tensão de saída. No modo no qual a tensão de entrada é maior que a tensão de saída tem-se o S-DVR operando como regulador abaixador. Quando a tensão de entrada é menor que a tensão de saída, o RT opera como elevador. Por fim, existe um modo ainda não modelado no comutador eletrônico de *taps*: condição na qual a tensão de entrada é igual à tensão de saída. Tanto o modo elevador quanto o modo abaixador já foram descritos anteriormente, porém se faz necessário compreender o modo em que a tensão não é regulada, ou seja, tensão de saída igual à tensão de entrada.

O modo de operação no qual a tensão não é modificada ou Zero de Compensação é uma condição em que a corrente da carga é desviada da bobina de compensação, passando apenas pelas chaves semicondutoras do comutador eletrônico de *taps* – Figura 3.3. No regulador hipotético de um único *tap* pode ser verificada a existência de duas condições, as quais permitem, de forma independente e mutuamente exclusiva, o desvio da corrente da carga – Figura 3.3 (a) e (b). Essas condições já haviam sido previstas na tabela verdade do regulador de *tap* único – Tabela 1.

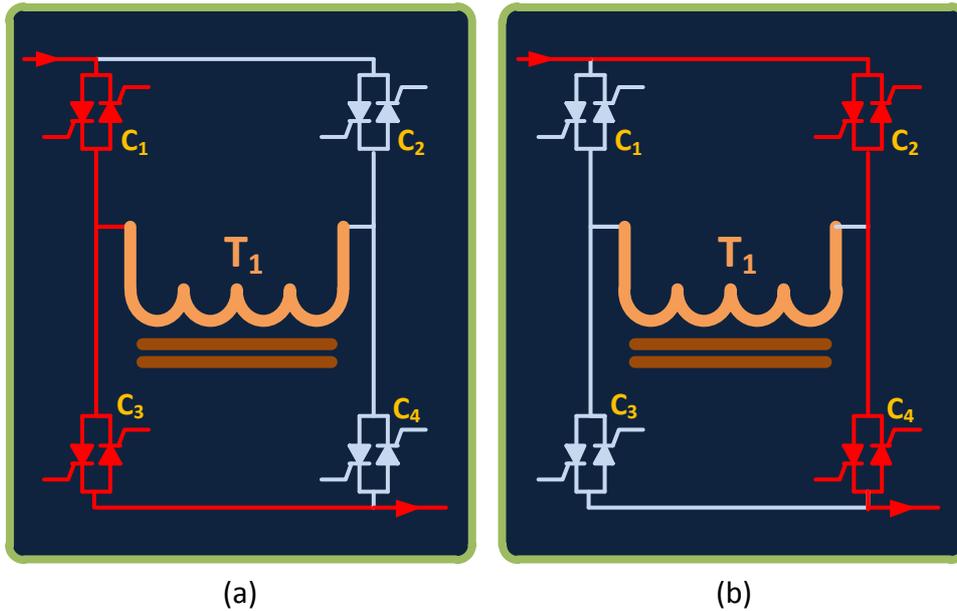


Figura 3.3 - Modo zero de compensação: (a) chaves C1 e C3 e (b) chaves C2 e C4 conduzindo.

Na Figura 3.3 são apresentados os dois possíveis caminhos para desviar a corrente da bobina de regulação. Na condição (a) têm-se as chaves  $C_1C_3$  acionadas e as chaves  $C_2C_4$  desligadas. Outra condição de desvio é conseguida acionando-se as chaves  $C_2C_4$ , enquanto as chaves  $C_1C_3$  estão desligadas. Verificando-se as duas condições de operação, conclui-se que elas são mutuamente exclusivas e podem ser modeladas utilizando a operação de disjunção exclusiva – (3.11).

$$C_1C_3 \oplus C_2C_4 \quad (3.11)$$

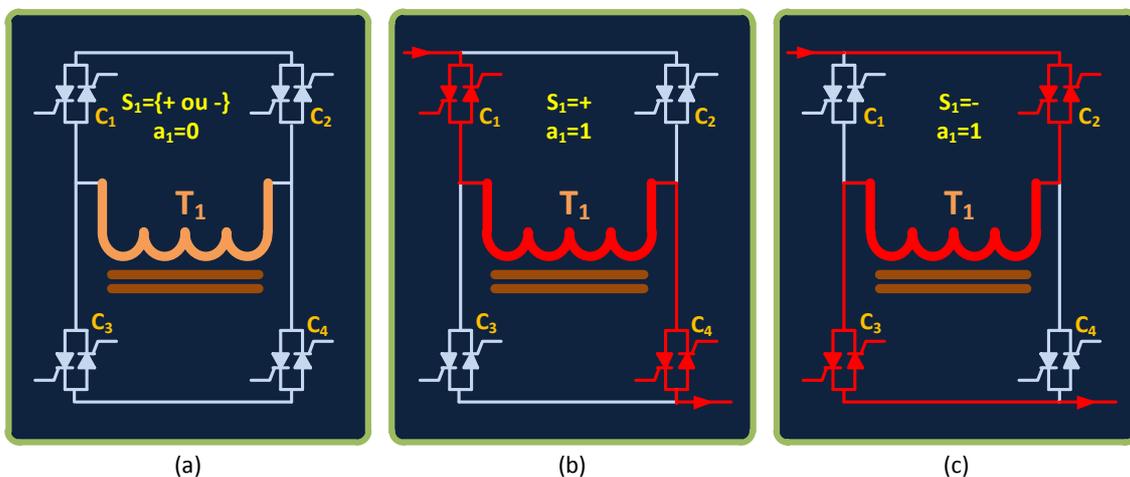
### 3.4 Modelo com álgebra booleana modificada

Será necessário fazer algumas modificações na modelagem até agora proposta para dar conta das possibilidades de combinação dos *Tap's*, pois até o momento foram avaliadas apenas as probabilidades relativas às combinações das chaves semicondutoras. O modelo matemático para um único *Tap* pode ser visto na (3.12). Nesta equação a variável  $a_1$  faz referência à possibilidade ou não de funcionamento da *ponte H* da

Figura 3.2. Por sua vez, a variável binária  $S_1$  modela o sentido da corrente em  $T_1$ . Nesse caso, as possibilidades de funcionamento que compreendem a passagem da corrente via bobina  $T_1$  do circuito da Figura 3.2 estão definidas em (3.12).

$$Tap := S_1(a_1 T_1) \quad (3.12)$$

Em (3.12) verificam-se duas situações que se referem ao estado desligado da *ponte H*, ou seja, ( $a_1 = 0, S_1 = -$ ) ou ( $a_1 = 0, S_1 = +$ ) – Figura 3.4 (a). Para a condição *ponte H* funcionando, quando  $a_1 = 1$ , existem duas condições mapeadas pela função e demonstradas na Figura 3.4, as quais têm como resultado a adição ou subtração da tensão sobre a bobina de regulação. A operação do regulador como abaixador ou elevador faz referência a duas parcelas de compensação ( $+V_{T_1}$  ou  $-V_{T_1}$ ), como pode ser observado na Figura 3.4 (b) e (c). Na Figura 3.4 (b) tem-se a condição  $S_1 = + e a_1 = 1$ ; isso equivale ao seguinte estado operacional: *ponte H* está garantindo a passagem de corrente via bobina de regulação  $T_1, (a_1 = 1)$ , no sentido descrito por  $S_1 = +$ . Essa parcela de compensação é aditiva em relação à tensão não regulada  $+V_{T_1}$ . Por sua vez, a Figura 3.4 (c) apresenta a operação do regulador garantindo a passagem da corrente pela bobina de regulação  $T_1, (a_1 = 1)$ , no sentido contrário ao da Figura 3.4 (b),  $S_1 = -$ , o que equivale à parcela de tensão de compensação  $-V_{T_1}$ ;



**Figura 3.4 - Princípio de funcionamento da Ponte H:** (a)  $S_1=\{+ \text{ ou } -\}$ ,  $a_1=0$ ; (b)  $S_1=+$ ,  $a_1=1$  e (c)  $S_1=-$ ,  $a_1=1$ .

A representação por meio de álgebra booleana das condições de funcionamento relacionadas à passagem de corrente elétrica via  $T_1$ , são definidas a seguir:

$$+V_{T_1} := C_1 C_4 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \quad (3.13)$$

$$-V_{T_1} := C_2 C_3 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \quad (3.14)$$

$$f(C_1, C_2, C_3, C_4) = C_1 C_4 \bar{C}_2 \bar{C}_3 + C_2 C_3 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \quad (3.15)$$

### 3.5 Desenvolvimento do conceito do $T_0$

Quando se analisa o circuito da Figura 3.2 verifica-se a existência de quatro possibilidades de funcionamento do comutador de *taps*: sendo dois sentidos para a corrente na bobina  $T_1$  ( $C_1 C_4$  ou  $C_2 C_3$ ) e duas possibilidades de desviar a corrente da bobina de regulação ( $C_1 C_3$  ou  $C_2 C_4$ ). Em (3.16) essas possibilidades são modeladas utilizando álgebra booleana.

$$C_{Tap} = C_1 C_4 \bar{C}_2 \bar{C}_3 + C_2 C_3 \bar{C}_1 \bar{C}_4 + C_1 C_3 \bar{C}_2 \bar{C}_4 + C_2 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_3$$

Observando-se a (3.15) verifica-se que foram adicionados dois novos termos – . Os termos  $C_1 C_3 \bar{C}_2 \bar{C}_4$  e  $C_2 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_3$  correspondem ao arranjo de chaves que possibilita a condução da corrente de tal forma que a tensão de entrada não é afetada pela parcela de regulação originada na bobina.

### 3.5.1 Regra para a obtenção das probabilidades de combinações das chaves semicondutoras

Simplificando a estrutura algébrica (3.16) obtém-se uma interessante propriedade dos comutadores eletrônicos de taps – (3.17) quando se pode verificar que todas as combinações, sem restrições topológicas, podem ser obtidas multiplicando-se as chaves superiores pelas chaves inferiores, porém as chaves superiores e inferiores combinam-se entre si utilizando a operação de disjunção exclusiva – (3.18)

$$C_{Tap} = (C_1\bar{C}_2 + C_2\bar{C}_1)(C_3\bar{C}_4 + C_4\bar{C}_3) \quad (3.17)$$

$$C_{Tap} = (C_1 \oplus C_2)(C_3 \oplus C_4) \quad (3.18)$$

Na pode-se verificar a existência de pares barrados. Esses denotam a impossibilidade de certas condições, as quais causariam curto-circuito na bobina de compensação. Observando o circuito da Figura 3.2 pode-se verificar que as condições  $C_1C_2$  e  $C_3C_4$  são proibidas (restrições topológicas).

Utilizando a (3.12) verifica-se a possibilidade de reescrever a equação (3.16), como demonstrado na (3.19)

, considerando que  $a_1$  ganha uma nova conotação deixando de representar as possibilidades de funcionamento ou não da ponte H para modelar a possibilidade de

regular ou não. Os dois eventos relacionados à regulação são determinados por  $a_1$  e  $S_1$ , enquanto os eventos relacionados a não regulação são determinados por  $\bar{a}_1$  e  $S_1$ .

$$Tap = S_1(a_1T_1 + \bar{a}_1T_0) \quad (3.19)$$

### 3.6 Regulador com dois enrolamentos de regulação separados

Nessa seção será estendida a análise feita para um regulador/compensador de tensão com topologia S-DVR, hipotético de um único *tap*, para um regulador com duas bobinas de compensação separadas, cada qual com um arranjo de chaves em *ponte H* independente. Com o aumento das possibilidades combinatórias, devido ao maior número de chaves e mudanças na topologia, será possível identificar novas propriedades e estruturas algébricas. Também será possível a comprovação do modelo inicialmente proposto do Regulador Hipotético de Único *Tap* dentro de uma topologia de maior complexidade. Por fim, o modelo de *tap* único será estendido no sentido da obtenção de um modelo generalizado para reguladores com topologia S-DVR, de única derivação por enrolamento de compensação.

#### 3.6.1 Topologia do Regulador do tipo S-DVR com duas bobinas de regulação separadas

A topologia do regulador é composta por duas bobinas de regulação  $T_1$  e  $T_2$  acopladas, cada qual, a uma *ponte H* independente. A bobina de regulação  $T_1$  está ligada às chaves semicondutoras bidirecionais  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  (*Ponte H*<sub>1</sub>). Por sua vez, a bobina de regulação  $T_2$  está conectada a chaves semicondutoras  $C_5, C_6, C_7$  e  $C_8$  (*Ponte H*<sub>2</sub>) – Figura 3.5. A interligação entre a *Ponte H*<sub>1</sub> e *Ponte H*<sub>2</sub> se dá por meio dos nós  $X_3$  e  $X_5$ . Isso equivale a ligar a saída da *Ponte H*<sub>1</sub> na entrada da *Ponte H*<sub>2</sub>. Esse padrão será estendido para qualquer quantidade de bobinas de regulação separadas,

ou seja, sem conexão elétrica direta (essa topologia é mostrada na **Figura 3.6** e será analisada na próxima subseção). A conexão entre as bobinas de regulação nessa variação topológica do S-DVR se dá por intermédio de chaves semicondutoras. Para uma topologia que utiliza duas *pontes H* sempre haverá 4 chaves semicondutoras acionadas, desde que as restrições topológicas sejam atendidas.

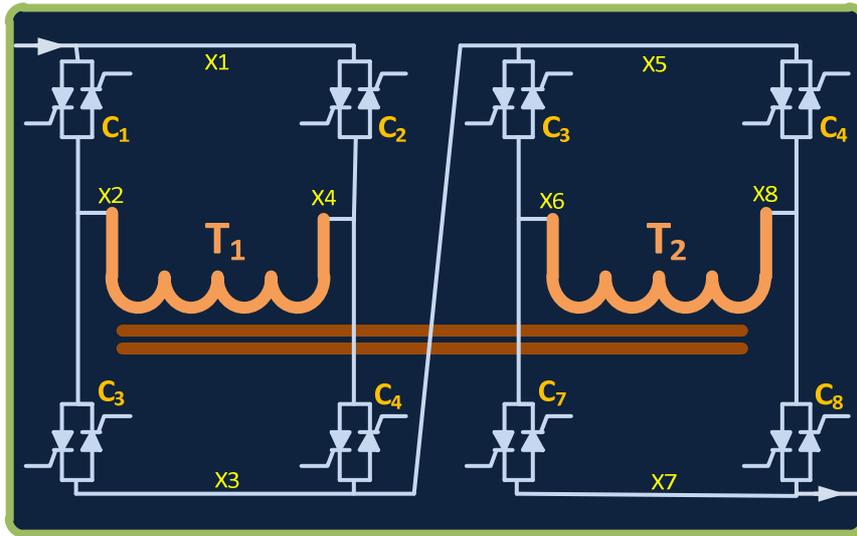


Figura 3.5 - Duas bobinas de compensação separadas.

Para descobrir o número de chaves semicondutoras conduzindo durante a operação do regulador de tensão, basta multiplicar o número de bobinas de regulação por dois.

### 3.6.2 Modelo matemático para dois taps separados

O modelo matemático para duas bobinas de regulação separadas pode ser dividido em dois submodelos – um para  $T_1$  e outro para a bobina  $T_2$ .

Para a bobina  $T_1$  têm-se as seguintes possibilidades de combinação, conforme descrito na (3.20).

$$Tap_{T_1} = C_1 C_4 \bar{C}_2 \bar{C}_3 + C_2 C_3 \bar{C}_1 \bar{C}_4 + C_1 C_3 \bar{C}_2 \bar{C}_4 + C_2 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \quad (3.20)$$

Por sua vez, a bobina  $T_2$  apresenta as seguintes possibilidades demonstradas na estrutura algébrica da (3.21).

$$Tap_{T_2} = C_5 C_8 \bar{C}_6 \bar{C}_7 + C_6 C_7 \bar{C}_5 \bar{C}_8 + C_5 C_7 \bar{C}_6 \bar{C}_8 + C_6 C_8 \bar{C}_5 \bar{C}_7 \quad (3.21)$$

As possibilidades relacionadas à tensão de entrada igual a tensão de saída, são descritas por  $p_1$  e  $p_2$ , onde  $p_1$  corresponde às possibilidades de não regulação para  $T_1$  (3.22) e  $p_2$  às possibilidades de não regulação para  $T_2$  – (3.23)).

$$p_1 = C_1 C_3 \bar{C}_2 \bar{C}_4 + C_2 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \quad (3.22)$$

$$p_2 = C_5 C_7 \bar{C}_6 \bar{C}_8 + C_6 C_8 \bar{C}_5 \bar{C}_7 \quad (3.23)$$

Para obter todas as possibilidades do comutador eletrônico com duas *pontes H* ligadas em série para condição  $T_0$ , basta multiplicar  $p_1$  por  $p_2$ .

$$Tap_{T_0} = p_1 p_2 \quad (3.24)$$

Expandindo  $p_1$  e  $p_2$  em suas identidades, obtêm-se:

$$Tap_{T_0} = (C_1 C_3 \bar{C}_2 \bar{C}_4 + C_2 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_3)(C_5 C_7 \bar{C}_6 \bar{C}_8 + C_6 C_8 \bar{C}_5 \bar{C}_7) \quad (3.25)$$

Todas as possibilidades de funcionamento do regulador com dois enrolamentos podem ser obtidas multiplicando-se (operação *and*) as equações booleanas de cada *ponte H* ( $H1$  e  $H2$ ), ou seja  $Tap_{T_1}$  e  $Tap_{T_2}$  (3.20) e (3.21), respectivamente).

$$C_{Tap} = Tap_{T_1} Tap_{T_2} \quad (3.26)$$

Expandindo a (3.26) em todas as possibilidades do comutador eletrônico de taps para um RT com duas bobinas de regulação eletricamente separadas, obtêm-se a (3.27).

$$\begin{aligned}
C_{Tap} = & C_1 C_3 C_5 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_8 + C_1 C_3 C_5 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_7 + C_1 C_3 C_6 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_8 + C_1 C_3 C_6 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_7 + \\
& + C_1 C_4 C_5 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_8 + C_1 C_4 C_5 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_7 + C_1 C_4 C_6 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_8 + C_1 C_4 C_6 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_7 + \\
& + C_2 C_3 C_5 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_8 + C_2 C_3 C_5 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_7 + C_2 C_3 C_6 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_8 + C_2 C_3 C_6 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_7 + \\
& + C_2 C_4 C_5 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_8 + C_2 C_4 C_5 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_7 + C_2 C_4 C_6 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_8 + C_2 C_4 C_6 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_7 +
\end{aligned} \tag{3.27}$$

A (3.27) pode ser reescrita utilizando-se a disjunção exclusiva. Dessa forma, obtêm-se a (3.28),

$$C_{Tap} = (C_1 \oplus C_2)(C_3 \oplus C_4)(C_5 \oplus C_6)(C_7 \oplus C_8) \tag{3.28}$$

enquanto a (3.29) representa as combinações de *tap's*.

$$Tap = S_1(T_1 a_1 + T_{0,1} \bar{a}_1) + S_2(T_2 a_2 + T_{0,2} \bar{a}_2) \tag{3.29}$$

As variáveis  $a_1$  e  $a_2$  satisfazem as possibilidades de regulação ou não regulação da topologia com duas bobinas. As variáveis  $T_1$  e  $T_2$  correspondem às relação de transformação de cada bobina de regulação. Por sua vez, as variáveis  $S_1$  e  $S_2$  possibilitam as operações entre as bobinas de regulação e determinam o sinal final da tensão de compensação. Os aspectos físicos relacionados a esta equação podem ser compreendidos da seguinte forma: as possibilidades operacionais da *Ponte H<sub>1</sub>* são mapeadas pela primeira parte da(3.29), ou seja,  $S_1(T_1 a_1 + T_{0,1} \bar{a}_1)$  e as possibilidades da *Ponte H<sub>2</sub>* pela segunda parte da referida equação,  $S_2(T_2 a_2 + T_{0,2} \bar{a}_2)$ .

No que diz respeito à *Ponte H*<sub>1</sub>, a expressão formada por  $S_1 T_1 a_1$  modela as possibilidades de adição ou subtração da tensão de compensação relacionadas à bobina  $T_1$ . A variável  $a_1$  está relacionada ao conjunto formado pelas chaves  $Reg_{PonteH_1} = \{C_1 C_4 \bar{C}_2 \bar{C}_3, C_2 C_3 \bar{C}_1 \bar{C}_4\}$  e  $S_1$  atua como variável seletora de um dos termos do conjunto  $Reg_{PonteH_1}$ . Isso implica que  $S_1$  determina o sentido do fluxo de corrente em  $T_1$ . Por sua vez, a expressão composta por  $S_1 T_{0,1} \bar{a}_1$  está relacionada à passagem de corrente pela *Ponte H*<sub>1</sub> sem produzir adição ou subtração na tensão de entrada, ou seja, a tensão de entrada é igual a tensão de saída. O termo  $T_{0,1}$  corresponde ao  $T_0$ , condição da *Ponte H*<sub>1</sub>, quando a corrente que flui para a carga é desviada da bobina de regulação por um dos ramos formados pelos interruptores de potência  $C_1 C_3 \bar{C}_2 \bar{C}_4$  ou  $C_2 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_3$ ; novamente a variável seletora está relacionada a  $S_1$ . Por fim, os termos  $\bar{a}_1$  e  $a_1$  estão relacionados ao fato de o conjunto *ponte H* e bobina de regulação estarem em série com o sistema. Assim, qualquer que seja o estado do comutador eletrônico de *taps*, sempre haverá um caminho para a corrente chegar até a carga.

O segundo segmento do RT com duas bobinas de regulação de uma derivação cada, é composto pela *Ponte H*<sub>2</sub> e o enrolamento  $T_2$ . Os ramos responsáveis pela adição e subtração da tensão de compensação denominada como  $V_{T_2}$ , são formados pelas sequências de semicondutores do conjunto  $Reg_{PonteH_2} = \{C_5 C_8 \bar{C}_6 \bar{C}_7, C_6 C_7 \bar{C}_5 \bar{C}_8\}$  e modelados pelo trecho da expressão  $S_2 T_2 a_2$ . Para a expressão  $S_2 T_{0,2} \bar{a}_2$  pode-se dizer que a condição de não regulação é obtida pela sequência de semicondutores do conjunto  $Reg_{PonteT_{0,2}} = \{C_5 C_7 \bar{C}_6 \bar{C}_8, C_6 C_8 \bar{C}_5 \bar{C}_7\}$ . A variável  $S_2$  atua como seletora interna de cada grupo e a variável  $a_2$  atua como variável seletora de grupo. Nesse sentido, pode-se afirmar que a regulação ou a condição de  $T_0$  (denominado  $T_{0,2}$  para a *Ponte H*<sub>2</sub>) é

determinada pela variável  $a_2$ . As conclusões obtidas neste parágrafo para  $S_2$  e  $a_2$  também são válidas para as variáveis de  $S_1$  e  $a_1$ .

Todas as combinações de não regulação e compensação podem ser verificadas na Tabela 2, a qual mostra as possibilidades da topologia com duas bobinas de regulação separadas. Nessa Tabela estão relacionadas as probabilidades de combinação de  $Tap$ 's com as possibilidades de combinação das chaves semicondutoras, as quais dão caminho e sentido à corrente por meio das bobinas de regulação ( $\pm V_{T_x}$ ) ou desviando destas ( $T_0$ ).

Tabela 2 – Valoração das expressões para duas bobinas de regulação separadas.

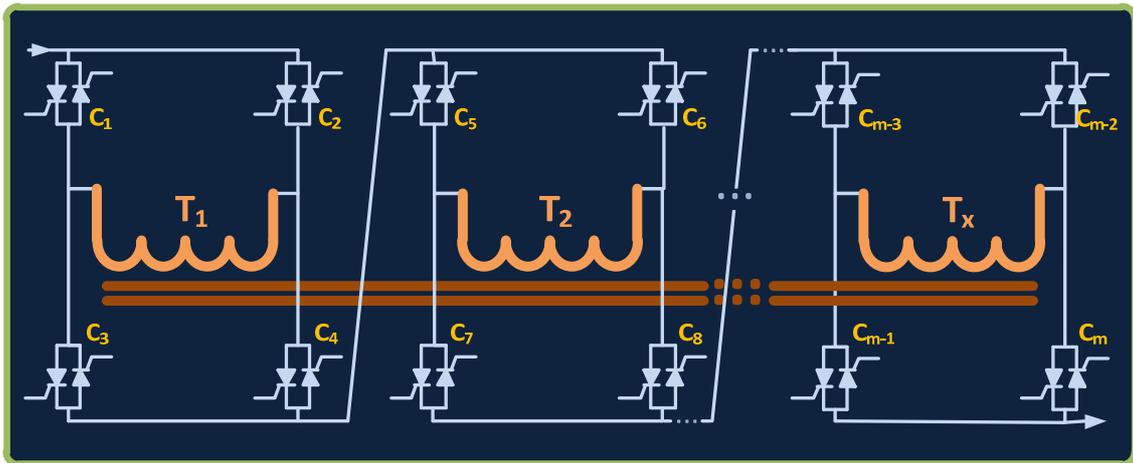
n	$a_2$	$a_1$	$S_2$	$S_1$	$S_1 T_{0,1} \bar{a}_1$	$S_2 T_{0,2} \bar{a}_2$	$S_1 T_1 a_1$	$S_2 T_2 a_2$	Tap	Chaves ( $C_{Tap}$ )
1	0	0	-1	-1	$-T_{0,1}$	$-T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_2 C_4 C_6 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
2	0	0	-1	1	$+T_{0,1}$	$-T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_1 C_3 C_6 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
3	0	0	1	-1	$-T_{0,1}$	$+T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_2 C_4 C_5 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_8$
4	0	0	1	1	$+T_{0,1}$	$+T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_1 C_3 C_5 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_8$
5	0	1	-1	-1	0	$-T_{0,2}$	$-T_1$	0	$-T_1$	$C_2 C_3 C_6 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
6	0	1	-1	1	0	$-T_{0,2}$	$+T_1$	0	$+T_1$	$C_1 C_4 C_6 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
7	0	1	1	-1	0	$+T_{0,2}$	$-T_1$	0	$-T_1$	$C_2 C_3 C_5 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_8$
8	0	1	1	1	0	$+T_{0,2}$	$+T_1$	0	$+T_1$	$C_1 C_4 C_5 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_8$
9	1	0	-1	-1	$-T_{0,1}$	0	0	$-T_2$	$-T_2$	$C_2 C_4 C_6 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_8$
10	1	0	-1	1	$+T_{0,1}$	0	0	$-T_2$	$-T_2$	$C_1 C_3 C_6 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_8$
11	1	0	1	-1	$-T_{0,1}$	0	0	$+T_2$	$+T_2$	$C_2 C_4 C_5 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_7$
12	1	0	1	1	$T_{0,1}$	0	0	$+T_2$	$+T_2$	$C_1 C_3 C_5 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_7$
13	1	1	-1	-1	0	0	$-T_1$	$-T_2$	$-T_3$	$C_2 C_3 C_6 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_8$
14	1	1	-1	1	0	0	$+T_1$	$-T_2$	$-T_1$	$C_1 C_4 C_6 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_8$
15	1	1	1	-1	0	0	$-T_1$	$+T_2$	$+T_1$	$C_2 C_3 C_5 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_7$
16	1	1	1	1	0	0	$+T_1$	$+T_2$	$+T_3$	$C_1 C_4 C_5 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_7$

### 3.7 Generalização das combinações de chaves e *Tap's* do RT com uma derivação e $x$ bobinas de regulação

A generalização que possibilita a determinação de todas as combinações de  $m$  chaves semicondutoras operando com  $x$  *taps*, está expressa na (3.30) e (3.31), com  $r \in N^*$ , conjunto dos números naturais sem o zero, (**Figura 3.6**).

$$C_{Tap} = \prod_{i=2r}^m (\bar{C}_i C_{i-1} + C_i \bar{C}_{i-1}) \quad (3.30)$$

$$C_{Tap} = \prod_{i=2r}^m (C_{i-1} \oplus C_i) \quad (3.31)$$



**Figura 3.6 – Topologia com  $m$  *taps* separados.**

Estendendo a (3.29) para  $x$  bobinas de regulação, obtém-se:

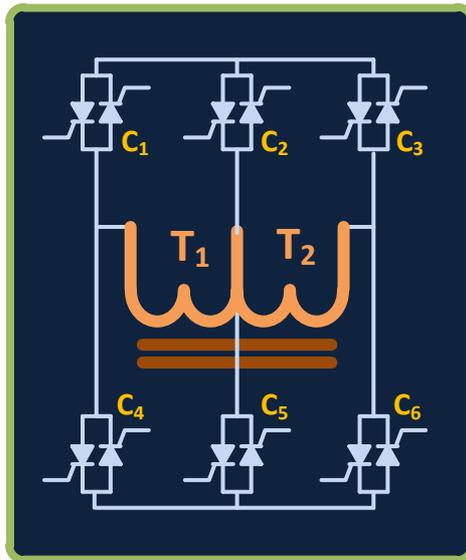
$$Tap = \sum_{i=1}^x S_i (T_i a_i + T_{0,i} \bar{a}_i) \quad (3.32)$$

A (3.32) representa todas as possíveis combinações de *Tap's* presentes na configuração topológica de  $x$  bobinas de regulação. Cabe ressaltar que o número de bobinas e o número de chaves semicondutoras para essa configuração, relacionam-se por  $x = m - 2$ . Enquanto a (3.32) permite prever todas as combinações de *Tap's* e suas

possíveis repetições, a (3.31) permite verificar as possibilidades combinatórias das chaves semicondutoras e as respectivas restrições topológicas que essa configuração admite.

### 3.8 Modelo matemático para dois *Tap's* em uma única bobina

A topologia do regulador do tipo S-DVR composta por duas derivações em uma única bobina de regulação ( $T_1$  e  $T_2$ ) é mostrada na Figura 3.7. Cada qual está conectada a uma *ponte H* com um ramo em comum  $C_2$ ,  $C_5$ . O *tap*  $T_1$  está ligado às chaves semicondutoras bidirecionais  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_4$  e  $C_5$ . Por sua vez, o *tap*  $T_2$  está acoplado às chaves semicondutoras  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_5$  e  $C_6$ .



**Figura 3.7 – Topologia S-DVR com duas derivações na mesma bobina.**

Analisando a Figura 3.7 pode-se chegar às seguintes conclusões acerca desta topologia: as chaves semicondutoras  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são mutuamente exclusivas, ou seja,  $C_1\bar{C}_2\bar{C}_3 + C_2\bar{C}_1\bar{C}_3 + C_3\bar{C}_1\bar{C}_2$ . Por sua vez, as chaves  $C_4$ ,  $C_5$  e  $C_6$  também têm ocorrência mutuamente exclusiva, resultando em  $C_4\bar{C}_5\bar{C}_6 + C_5\bar{C}_4\bar{C}_6 + C_6\bar{C}_4\bar{C}_5 - (3.33)$ .

$$C_{tap} = (C_1\bar{C}_2\bar{C}_3 + C_2\bar{C}_1\bar{C}_3 + C_3\bar{C}_1\bar{C}_2)(C_4\bar{C}_5\bar{C}_6 + C_5\bar{C}_4\bar{C}_6 + C_6\bar{C}_4\bar{C}_5) \quad (3.33)$$

A expansão da (3.33) permite calcular todas as combinações de chaves admitidas pela topologia sem que ocorram curtos-circuitos ou interrupções na carga – (3.34).

$$\begin{aligned} C_{tap} = & C_1C_4\bar{C}_2\bar{C}_3\bar{C}_5\bar{C}_6 + C_1C_5\bar{C}_2\bar{C}_3\bar{C}_4\bar{C}_6 + C_1C_6\bar{C}_2\bar{C}_3\bar{C}_4\bar{C}_5 + \\ & + C_2C_4\bar{C}_1\bar{C}_3\bar{C}_5\bar{C}_6 + C_2C_5\bar{C}_1\bar{C}_3\bar{C}_4\bar{C}_6 + C_2C_6\bar{C}_1\bar{C}_3\bar{C}_4\bar{C}_5 + \\ & + C_3C_4\bar{C}_1\bar{C}_2\bar{C}_5\bar{C}_6 + C_3C_5\bar{C}_1\bar{C}_2\bar{C}_4\bar{C}_6 + C_3C_6\bar{C}_1\bar{C}_2\bar{C}_4\bar{C}_5 \end{aligned} \quad (3.34)$$

### 3.8.1 O Termo $\alpha$

A determinação das combinações dos degraus de compensação e suas eventuais repetições podem ser obtidas utilizando a (3.35). Como  $S_1$  é uma variável binária, ou seja, só pode acessar duas possibilidades, faz-se necessário criar um novo subgrupo binário, capaz de interagir apenas com os *Tap's*, nesse caso o subgrupo do  $\alpha$  ou Termo  $\alpha$ .

A variável binária  $\alpha$  surge devido ao fato de haver um acoplamento entre a *ponte H* modelada por  $a_1$  e  $a_2$ , o qual exige que  $a_1$  e  $a_2$  sejam iguais a zero para que a possibilidade de não compensação possa existir. A variável  $\alpha$  permite desacoplar a *ponte* com três ramos em uma *ponte H* mais um ramo, apenas nas condições de não regulação. Dessa forma, é possível selecionar uma das três combinações de chaves ( $C_1C_4, C_2C_5, C_3C_6$ ), as quais produzem  $T_0 = \{+T_{0,1}, -T_{0,1}, T_{0,2}\}$ . O desdobramento da (3.35) pode ser verificado na Tabela 3.

$$Tap = S_1\bar{\alpha}(a_1T_1 + a_2T_2 + \bar{a}_1\bar{a}_2T_{0,1}) + \alpha\bar{a}_1\bar{a}_2T_{0,2} \quad (3.35)$$

Tabela 3 – Possibilidades de *Tap*'s e combinações de chaves semicondutoras para uma bobina de regulação de duas derivações.

n	$\alpha$	$a_2$	$a_1$	$S_1$	$S_1 T_{0,3} \alpha \bar{a}_1 \bar{a}_2$	$S_1 T_{0,1} \bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{\alpha}$	$S_1 T_1 a_1 \bar{\alpha}$	$S_1 T_2 a_2 \bar{\alpha}$	<i>Tap</i>	Chaves
1	0	0	0	-1	0	$-T_{0,1}$	0	0	$T_0$	$C_2 C_5 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_4 \bar{C}_6$
2	0	0	0	1	0	$+T_{0,1}$	0	0	$T_0$	$C_1 C_4 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_6$
3	0	0	1	-1	0	0	$-T_1$	0	$-T_1$	$C_2 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_6$
4	0	0	1	1	0	0	$+T_1$	0	$T_1$	$C_1 C_5 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_4 \bar{C}_6$
5	0	1	0	-1	0	0	0	$-T_2$	$-T_2$	$C_3 C_5 \bar{C}_1 \bar{C}_2 \bar{C}_5 \bar{C}_6$
6	0	1	0	1	0	0	0	$+T_2$	$+T_2$	$C_2 C_6 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_4 \bar{C}_5$
7	0	1	1	-1	0	0	$-T_1$	$-T_2$	$-T_3$	$C_3 C_4 \bar{C}_1 \bar{C}_2 \bar{C}_5 \bar{C}_6$
8	0	1	1	1	0	0	$+T_1$	$+T_2$	$+T_3$	$C_1 C_6 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_4 \bar{C}_5$
9	1	0	0	X	$T_{0,2}$	0	0	0	$T_0$	$C_3 C_6 \bar{C}_1 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_5$

### 3.9 Restrições topológicas na soma de *taps*

Junto as topologias com mais de três ramos surge um problema relacionado às combinações de *taps*, ou seja, nem todas as possibilidades podem ser alcançadas pelo comutador eletrônico de *taps*. As implicações envolvidas na associação dos *taps* quando a bobina de regulação é composta por mais de três ramos, está relacionada ao surgimento de curtos-circuitos em combinações não sequenciais de *tap*'s. Definem-se essas impossibilidades de combinação de *taps* como **Restrições Topológicas na Soma de Taps**. As restrições topológicas na combinação das chaves semicondutoras, entretanto, podem ser verificadas ao longo de todo este trabalho, tendo aparecido pela primeira vez no Regulador Hipotético de *Taps* Único.

Na Figura 3.8 está ilustrada uma configuração com quatro derivações em que existe ocorrência de **restrições na soma de taps**. Nesse exemplo, os segmentos do enrolamento  $T_1$  e  $T_3$  não podem ser adicionados ao mesmo tempo, pois o enrolamento sofreria um curto-circuito. Dessa forma, as combinações de *tap*'s que possibilitam a

compensação de tensão podem ser determinadas pela (3.36), na qual não foram incluídas as condições de não compensação formadas por  $C_1C_5$ ,  $C_2C_6$ ,  $C_3C_4$  e  $C_4C_8$ .

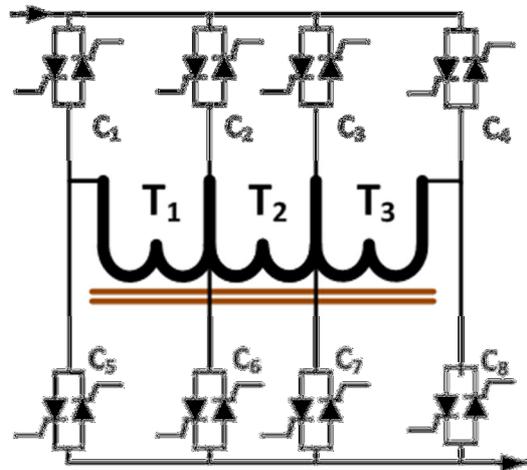


Figura 3.8 – Configuração com quatro derivações em um mesmo enrolamento.

$$Tap = S_1 \left[ T_1(a_1\bar{a}_3 + a_1a_2) + T_2a_2 + T_3(a_2a_3 + \bar{a}_1a_3) \right] \quad (3.36)$$

### 3.10 Generalização do modelo para $m$ ramos em uma única bobina

Para uma bobina de regulação com  $m$  derivações – Figura 3.9 – tem-se a expressão da (3.37), referente à parte superior do comutador (*PartSup*), a qual foi reescrita em uma forma mais compacta na (3.38).

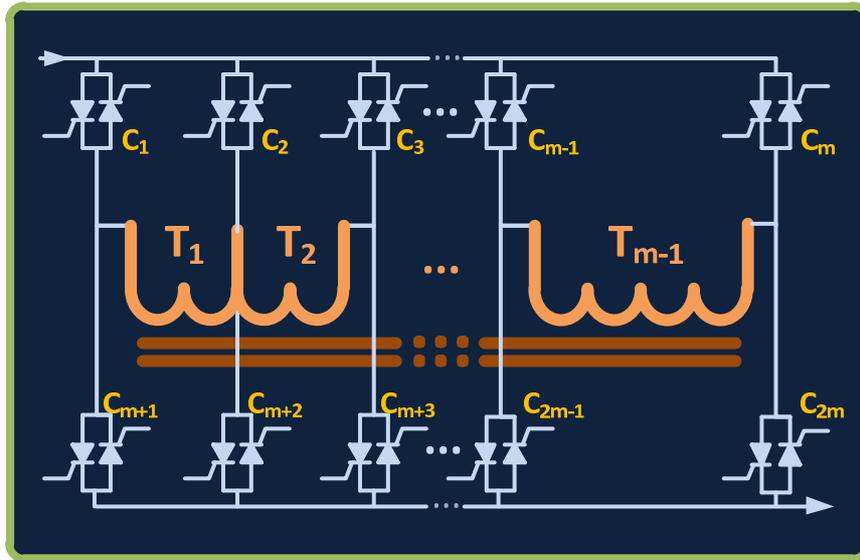
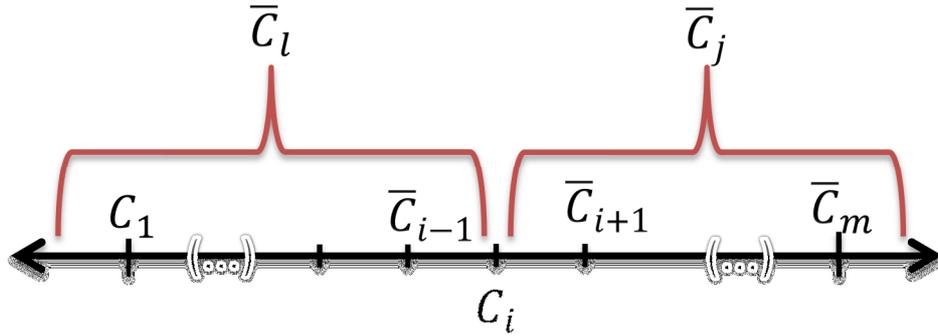


Figura 3.9 – Topologia com  $m$  perdas e  $m - 1$  derivações.

$$\begin{aligned}
 PartSup = & C_{i-m} \bar{C}_{i-(m-1)} \bar{C}_{i-(m-2)} \bar{C}_{i-(m-3)} \dots \bar{C}_{i-(m-(m-1))} + \\
 & + C_{i-(m-1)} \bar{C}_{i-m} \bar{C}_{i-(m-2)} \bar{C}_{i-(m-3)} \dots \bar{C}_{i-(m-(m-1))} + \dots + \\
 & + C_{i-(m-(m-1))} \bar{C}_{i-m} \bar{C}_{i-(m-1)} \dots \bar{C}_{i-(m-(m-1))}
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

$$PartSup = \sum_{i=1}^m \left( C_i \prod_{j=i+1}^m \bar{C}_j \prod_{l=1}^{i-1} \bar{C}_l \right) \tag{3.38}$$

A (3.37) descreve todas as possibilidades combinacionais da parte superior do comutador eletrônico com  $m$  ramos. Cabe ressaltar que cada operação do somatório ( $\sum_{i=1}^m C_i$ ) equivale a uma possibilidade do circuito, a qual é composta pela chave semicondutora que foi acionada ( $C_i$ ) e as condições de restrição topológica relacionadas ao acionamento das demais chaves superiores ( $\bar{C}_j$  e  $\bar{C}_l$ ). O produto  $\prod_{j=i+1}^m \bar{C}_j$  corresponde às chaves localizadas à direita da reta numérica das chaves semicondutoras – Figura 3.10 – tendo  $C_i$  como origem. Por sua vez, o  $\prod_{l=1}^{i-1} \bar{C}_l$  equivale às chaves semicondutoras localizadas à esquerda de  $C_i$ .

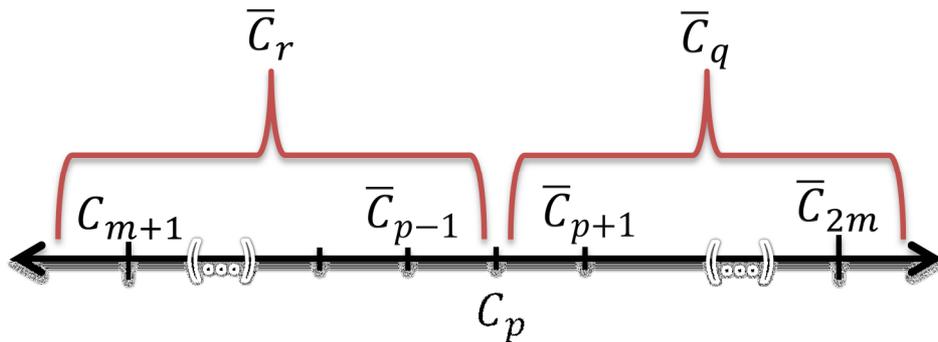


**Figura 3.10 – Reta numérica relativa ao algoritmo de formação das possibilidades das chaves semicondutoras da parte superior do RT.**

$$PartInf = \sum_{p=m+1}^{2m} \left( C_p \prod_{q=p+1}^{2m} \bar{C}_q \prod_{r=m+1}^{p-1} \bar{C}_r \right) \quad (3.39)$$

A (3.39) descreve todas as possibilidades combinacionais da parte inferior do comutador eletrônico com  $m$  ramos e  $2m$  chaves semicondutoras. Essa equação apresenta as combinações de funcionamento, levando em conta as restrições topológicas dos semicondutores compreendidos entre  $IntInf = \{m + 1 \dots 2m\}$ . Pode-se ressaltar que, cada operação do somatório ( $\sum_{p=1}^{2m} C_p$ ) equivale a uma possibilidade única do circuito, a qual é composta pela chave semicondutora que foi acionada ( $C_p$ ) e as condições de restrição topológica relacionadas ao intervalo  $\{m + 1 \dots 2m\}$ , através das variáveis  $\bar{C}_q$  e  $\bar{C}_r$ . O produtório  $\prod_{q=p+1}^{2m} \bar{C}_q$  corresponde aos valores maiores que  $C_p$ , dentro do intervalor  $IntInf$ . Por sua vez, o  $\prod_{l=m+1}^{p-1} \bar{C}_r$  equivale as chaves semicondutoras A (3.39) descreve todas as possibilidades combinacionais da parte inferior do comutador eletrônico com  $m$  ramos e  $2m$  chaves semicondutoras. Essa equação apresenta as combinações de funcionamento, levando em conta as restrições topológicas dos semicondutores compreendidos entre  $IntInf = \{m + 1 \dots 2m\}$ . Pode-se ressaltar que cada operação do somatório ( $\sum_{p=1}^{2m} C_p$ ) equivale a uma possibilidade única

do circuito, a qual é composta pela chave semicondutora que foi acionada ( $C_p$ ) e as condições de restrições topológicas relacionadas ao intervalo  $\{m + 1 \dots 2m\}$ , por meio das variáveis  $\bar{C}_q$  e  $\bar{C}_r$ . O produtório  $\prod_{q=p+1}^{2m} \bar{C}_q$  corresponde aos valores maiores que  $C_p$ , dentro do intervalor  $IntInf$ . Por sua vez, o  $\prod_{l=m+1}^{p-1} \bar{C}_l$  equivale às chaves semicondutoras localizadas à esquerda de  $C_p$ .



**Figura 3.11 – Reta numérica relativa ao algoritmo de determinação das possibilidades das chaves semicondutoras da parte inferior do comutador eletrônico de *tap*'s.**

Ao realizar a multiplicação da (3.38) pela (3.39), obtém-se todas as possibilidades combinacionais para reguladores de tensão com uma bobina de regulação e  $T_{m-1}$  derivações – (3.40).

$$Tap = \left( \sum_{i=1}^m \left( C_i \prod_{j=i+1}^m \bar{C}_j \prod_{l=1}^{i-1} \bar{C}_l \right) \right) * \left( \sum_{p=1}^{2m} \left( C_p \prod_{q=p+1}^{2m} \bar{C}_q \prod_{r=m+1}^{p-1} \bar{C}_r \right) \right) \quad (3.40)$$

Analisando as probabilidades de combinação das derivações no intervalo  $[T_1, T_2 \dots T_{n-1}, T_n]$ , obtém-se uma expressão que determina todas as possibilidades de combinação dos níveis de compensação, como pode ser observado na expressão:

$$\begin{aligned}
T = & a_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3 \dots \bar{a}_{n-1} \bar{a}_n T_1 + \bar{a}_1 a_2 \bar{a}_3 \dots \bar{a}_{n-1} \bar{a}_n T_2 + a_1 a_2 \bar{a}_3 \dots \bar{a}_{n-1} \bar{a}_n (T_1 + T_2) + \\
& + \bar{a}_1 a_2 a_3 \dots \bar{a}_{n-1} \bar{a}_n (T_1 + T_2 + T_3) + \dots + a_1 a_2 \dots a_{n-1} \bar{a}_n (T_1 + T_2 + \dots + T_{n-1}) + \\
& + a_1 a_2 \dots a_{n-1} a_n (T_1 + T_2 + \dots + T_{n-1} + T_n) + \bar{a}_1 a_2 a_3 \dots \bar{a}_{n-1} \bar{a}_n (T_2 + T_3) + \dots + \\
& + \bar{a}_1 a_2 a_3 \dots a_{n-1} \bar{a}_n (T_2 + T_3 + \dots + T_{n-1}) + \bar{a}_1 a_2 \dots a_{n-1} a_n (T_2 + T_3 + \dots + T_{n-1} + T_n) + \\
& + \bar{a}_1 \bar{a}_2 a_3 \dots \bar{a}_{n-1} \bar{a}_n (T_3) + \dots + \bar{a}_1 \bar{a}_2 a_3 \dots a_{n-1} \bar{a}_n (T_3 + \dots + T_{n-1}) + \\
& + \bar{a}_1 \bar{a}_2 a_3 \dots a_{n-1} a_n (T_3 + \dots + T_{n-1} + T_n) + \dots + \bar{a}_1 \bar{a}_2 \dots a_{n-1} \bar{a}_n (T_{n-1}) + \\
& + \bar{a}_1 \bar{a}_2 \dots a_{n-1} a_n (T_{n-1} + T_n) + \bar{a}_1 \bar{a}_2 \dots \bar{a}_{n-1} a_n (T_n)
\end{aligned} \tag{3.41}$$

As possibilidades de não compensação podem ser modeladas como segue:

$$T_0 = C_1 C_{m+1} T_{0,1} + C_2 C_{m+2} T_{0,2} + \dots + C_{m-1} C_{2m-3} T_{0,m-1} + C_m C_{2m} T_{0,m} = \sum_i^m C_i C_{m+i} T_{0,i} \tag{3.42}$$

### 3.11 Generalização para $n$ enrolamentos de regulação com $m$ derivações

Nas aplicações de RTs pode-se encontrar reguladores com até  $T_{m-1}$  segmentos de bobinas (ou  $m$  derivações) em cada um dos  $n$  enrolamentos de regulação. Nesse contexto, a (3.40) deve ser modificada para atender às demais bobinas de regulação de forma que a expressão fique:

$$Tap = \prod_{s=0}^n \left( \sum_{i=ms+1}^{(s+1)m} \left( C_i \prod_{j=i+1}^{(s+1)m} \bar{C}_j \prod_{l=ms+1}^{i-1} \bar{C}_l \right) \right) \tag{3.43}$$

Este capítulo descreve uma nova abordagem para modelar comutadores eletrônicos de  $tap$ 's com um ou mais enrolamentos de regulação. A análise aqui desenvolvida visa a identificar o número de condições que podem ser assumidas pelas chaves semicondutoras que constituem o comutador eletrônico. Essa ferramenta matemática é válida desde que os comutadores tenham uma configuração em ponte H e trabalhem reconfigurando os enrolamentos série do RT. Além disso, possibilita

identificar e tratar as restrições topológicas dentro da mesma estrutura algébrica que descreve as combinações de chaves. A aplicação tecnológica dessa contribuição facilitará o projeto de circuitos de disparos complexos, sendo uma ferramenta valiosa para o projetista mapear de forma fácil e analítica as possibilidades de funcionamento de um comutador eletrônico de taps e circuitos que compartilhem as mesmas características funcionais.

Também foi desenvolvida uma ferramenta que permite tratar o comportamento do circuito de comutação em nível de *ponte H*. Nesse sentido, as possibilidades de combinação dos degraus que formam os níveis de tensão podem ser mapeadas por essa segunda proposta de modelagem. Na metodologia de modelagem proposta foram adicionadas as funcionalidades do RT de compensação e não compensação. Dessa forma, esse modelo permite analisar o funcionamento do comutador e prever as combinações possíveis dos degraus de compensação para cada configuração topológica de RT.

# Capítulo 4

## 4 Metodologia para Construção de Reguladores

Este capítulo tem por objetivo demonstrar uma metodologia de projeto para reguladores de tensão do tipo S-DVR. Para tanto, serão empregadas as definições e a modelagem desenvolvida nos capítulos anteriores. Essa sistematização metodológica representa uma contribuição no campo dos reguladores com topologia S-DVR, no sentido de viabilizar o projeto dos reguladores pelo viés teórico exhaustivamente proposto nas seções subsequentes, simplificando as generalizações para uma aplicação tecnológica mais próxima da realidade dos RTs utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

## 4.1 Reguladores de Tensão com Excitação Variável – Tipo A

Os reguladores de tensão com excitação variável têm sua expressão de compensação demonstrada na (4.2), onde  $V_{reg}^v$  é a tensão de saída do RT ou tensão regulada;  $V_i$  é a tensão não regulada ou tensão de entrada e  $V_{tap}^v$  é a parcela de compensação. A parcela de compensação é adicionada à tensão de entrada pelo comutador eletrônico de *taps*. O objetivo dessa operação é manter a tensão de saída ( $V_{reg}$ ) o mais próximo possível da faixa nominal programada no RT. Esse enunciado sintetiza a estratégia de controle empregada nos reguladores. O sobreíndice  $v$  faz referência ao modo de excitação variável, ou seja, RT do Tipo A.

$$V_{reg}^v = V_i + V_{tap}^v \quad (4.1)$$

A sensibilidade da parcela de compensação  $V_{tap}^v$  em relação à tensão de entrada deve-se ao fato de esta variável ser criada pela interação de  $V_i$  com a bobina de excitação. A (4.2) formaliza essa relação.

$$V_{tap}^v = f(V_i) \quad (4.2)$$

A relação matemática entre a tensão de entrada e a parcela de regulação se dá pelo termo *Tap*, onde *Tap* é a relação de transformação do enrolamento de compensação (ver *Série* numérica das relações de transformação do RT, página 37).

$$V_{tap}^v = V_i \cdot Tap \quad (4.3)$$

A estrutura matemática apresentada na (4.4) descreve o comportamento da tensão regulada, da tensão não regulada e a relação de transformação.

$$V_{reg}^v = V_i(Tap+1) \quad (4.4)$$

Fazendo  $V_{reg}^v = 1 p.u.$  pode-se obter uma equação que determina a relação de transformação necessária para compensar a tensão não regulada, a fim de manter  $V_{reg}$  dentro do valor de referência – (4.5).

$$Tap = \frac{1-V_i}{V_i} \quad (4.5)$$

## 4.2 Determinando a Região de Operação do RT do Tipo A

Utilizando a expressão descrita na (4.5) pode-se definir o comportamento do regulador dentro de uma determinada faixa de valores de afundamento e sobretensão – Figura 4.1.

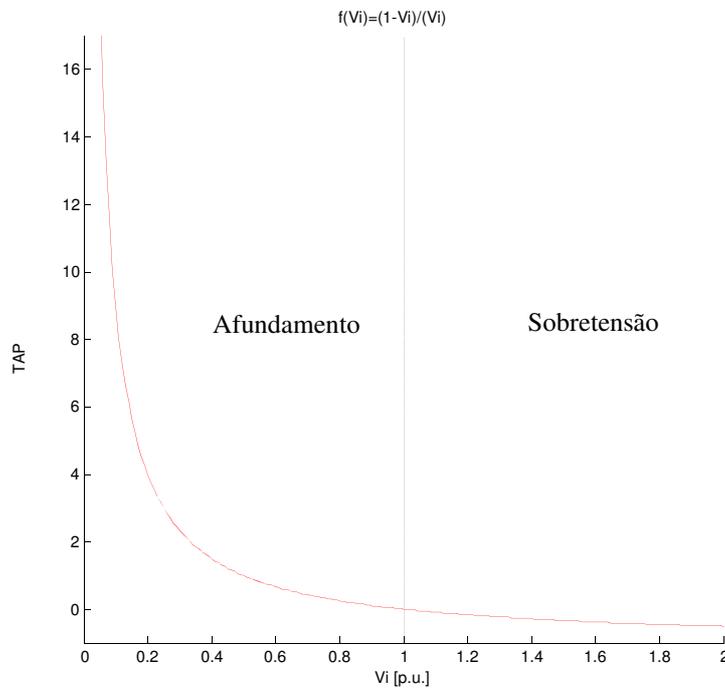
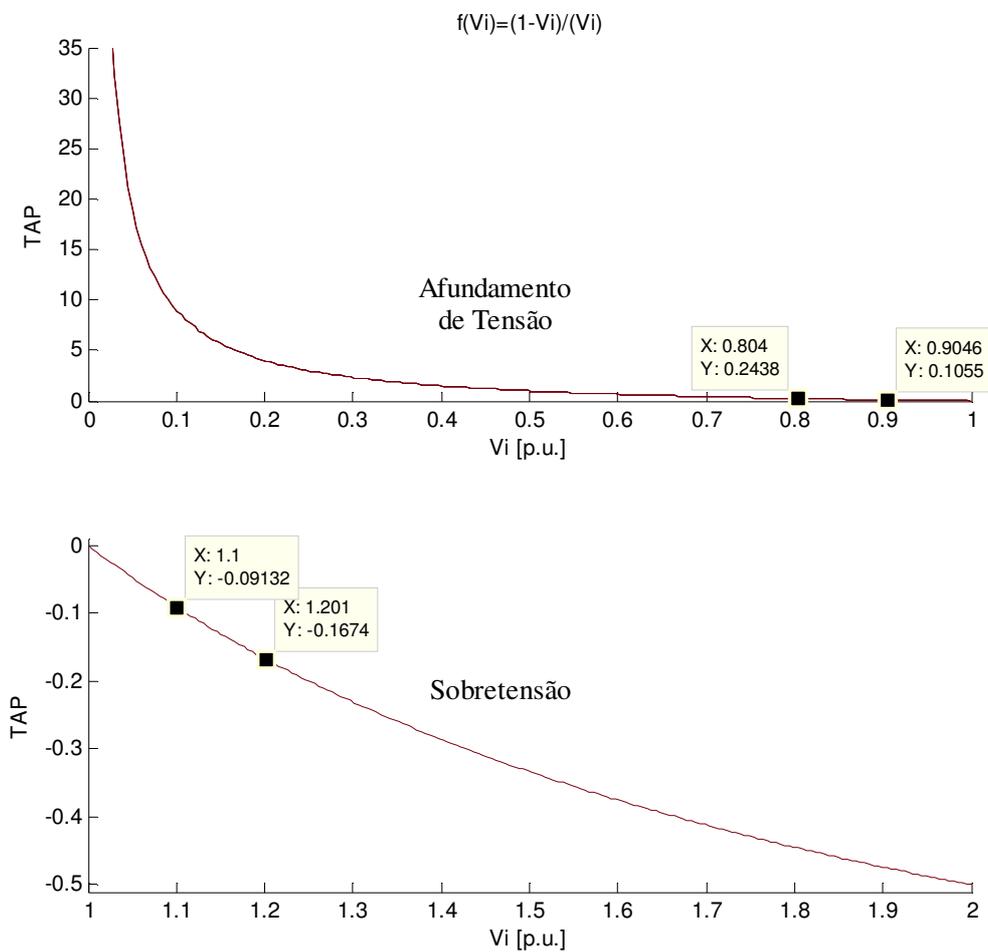


Figura 4.1 – Variação do Tap para um intervalo de  $V_i$  entre 0 a 2 p.u.

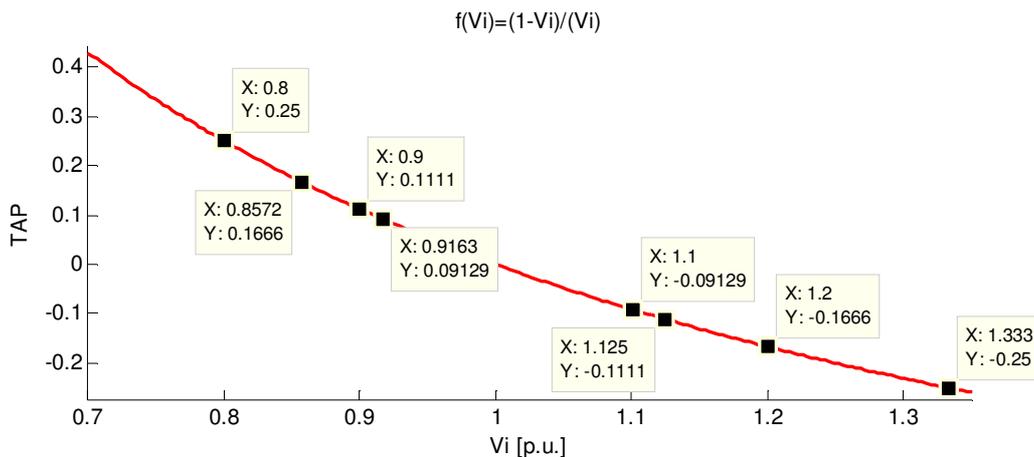
Fazendo uma análise da curva que relaciona os valores de  $V_i$  e a respectiva relação de transformação ( $Tap$ ), pode-se perceber que os reguladores do Tipo A são dispositivos mais eficientes quando operam com sobretensão do que quando regulam afundamentos de tensão. Na subtensão há uma redução na capacidade de compensação, entretanto durante a sobretensão a parcela de compensação tem sua capacidade ampliada na mesma proporção do aumento de tensão – Figura 4.2.



**Figura 4.2 – Comportamento do RT do Tipo A para afundamento de tensão e sobretensão.**

A Figura 4.3 apresenta o comportamento de um regulador de tensão operando como Tipo A e a faixa de operação analisada está entre  $0,8pu$  e  $1,35pu$ . Neste gráfico pode-se analisar a relação de transformação necessária para compensar cada nível.

Alguns pontos foram evidenciados de forma a mostrar a correlação entre subtensões e sobretensão e os *Tap's* necessários à compensação. Para um afundamento de tensão de  $0,8p.u.$  é necessária uma derivação com relação de transformação igual a  $0,25$ . Por sua vez, esse mesmo *Tap* regula uma sobretensão de  $1,33p.u.$ , o que resulta em um ganho de compensação de  $60\%$  na sobretensão em relação ao afundamento. Para uma sobretensão de  $1,2p.u.$  utiliza-se uma relação de transformação de  $0,1666$ . Isso equivale a um *Tap*  $33\%$  menor para um afundamento de mesma ordem. Para uma tensão de  $0,9p.u.$  a relação de transformação necessária está em  $0,1111$ , enquanto para uma tensão com amplitude de  $1,1p.u.$  a relação é de  $0,092129$ , ou seja, a diferença entre compensar um afundamento de  $10\%$  em relação a uma sobretensão de mesma ordem resulta em uma diferença de relação de transformação de  $20\%$  no caso de uma sobretensão.



**Figura 4.3 – Variação do Tap para um intervalo de  $V_i$  entre 0.7 a 1.35 p.u.**

Pode-se concluir que no projeto de um RT em que se deseja uma simetria entre compensação de sobretensão e capacidade de compensação de afundamentos, o Tipo A não é a melhor opção. Quanto mais, entretanto, o limite da dinâmica de compensação se aproxima de  $1p.u.$ , seja pelo limite inferior (afundamento), seja pelo limite superior (sobretensão), mais a curva de compensação se aproxima de um comportamento linear. Outra conclusão possível, com base na análise das curvas do regulador do Tipo A, está

no fato de essa configuração apresentar um melhor desempenho na regulação de sobretensões. A curva da Figura 4.3 pode ser utilizada para determinar a faixa dinâmica de compensação pelo viés da sobretensão ou afundamento a serem compensados.

#### 4.2.1 Assimetria do RT Operando com Excitação Variável

Analisando as relações de transformação necessárias para regular um afundamento e uma sobretensão de mesma proporção, verificam-se valores distintos de  $TAP$ . Essa situação evidencia a existência de uma relação assimétrica entre as duas regiões operacionais do RT, compreendidas entre os valores de tensão abaixo e acima de  $1pu$ .

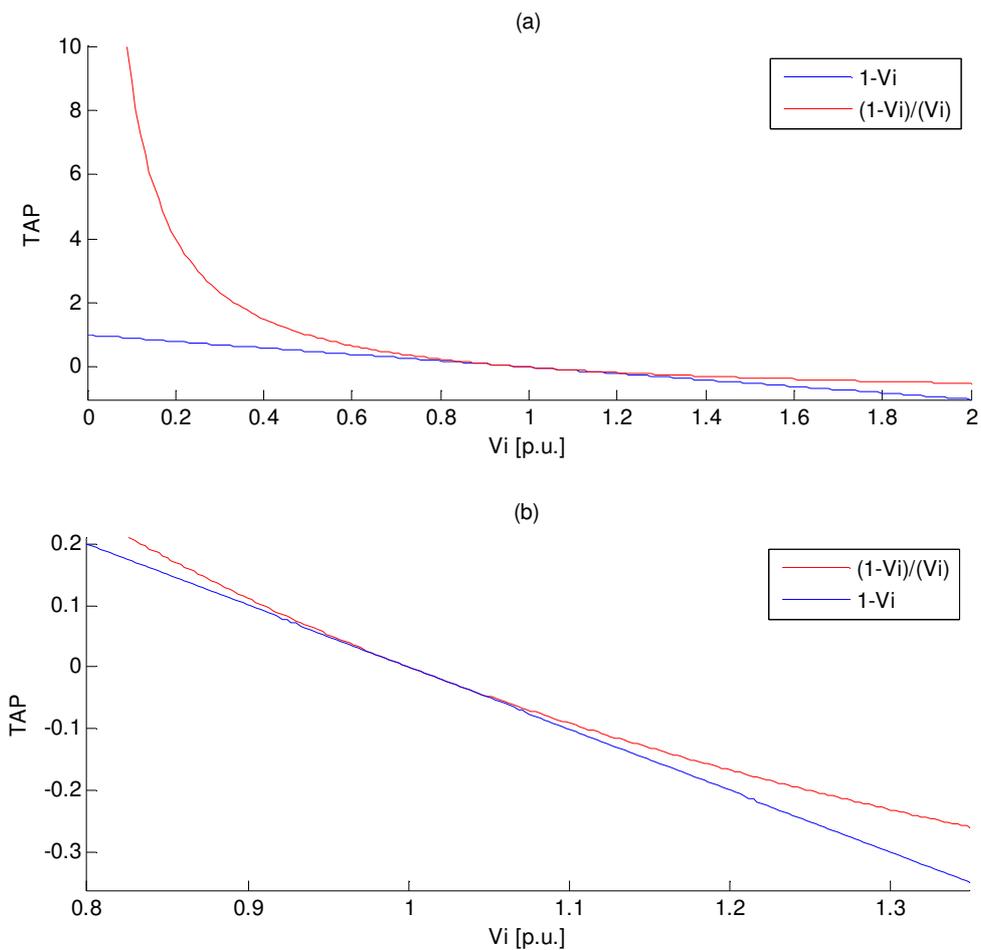
Supondo uma situação na qual a tensão de excitação fosse insensível a variações da tensão não regulada  $V_i$ , de tal forma que a tensão de excitação do RT estivesse fixada em  $1pu$ , a (4.5) poderia ser reescrita como uma relação linear – (4.6). Essa equação representa o regulador de excitação fixa ou Tipo B, trabalhando com o valor de  $Tap$  com sinal trocado.

$$Tap=1-V_i \quad (4.6)$$

Plotando a (4.5) e a (4.6) obtêm-se duas curvas que descrevem o desempenho assimétrico do RT operando com excitação variável e o comportamento do RT operando com excitação fixa – Figura 4.4 (a) e (b). A Figura 4.4 (a) está compreendida no intervalo de tensão entre 0 e  $2pu$ . Na curva em vermelho tem-se o comportamento assimétrico do regulador; por sua vez, a curva em azul descreve o comportamento linear do RT. No espaço de 0 a  $1pu$  verifica-se uma região de afundamento de tensão: a curva assimétrica tende a um  $Tap$  infinito, quando a tensão  $V_i$  aproxima-se de zero, isso se deve à parcela  $1/V_i$  da (4.5), quando a tensão não regulada tende a  $1pu$  a assimetria

aproxima-se de zero. Conforme a tensão não regulada apresenta um comportamento crescente, o *Tap* converge para -1.

A Figura 4.4 (b) ilustra o desempenho do RT no intervalo entre 0,8 e 1,35pu. Pode-se verificar uma discrepância menor entre as curvas nas proximidades de 1pu, seja pelo limite inferior, seja pelo limite superior; a assimetria e a perda na capacidade de compensação são minimizadas. Isso pode ser evidenciado pela redução da distância, ponto a ponto, entre a curva ideal, em azul, e a curva do RT com excitação variável, em vermelho.



**Figura 4.4 – RT operando com curva de compensação linear e não linear.**

Na escolha da faixa dinâmica de compensação pode-se optar pela comparação entre a curva idealizada de um regulador e a curva real. Dessa forma, pode-se localizar a região de menor assimetria, o que torna a curva de compensação mais linear e facilita o controle. Também se pode tomar como critério a medição da distância entre a curva ideal e a curva real, ou seja, avaliação da perda ou ganho de compensação.

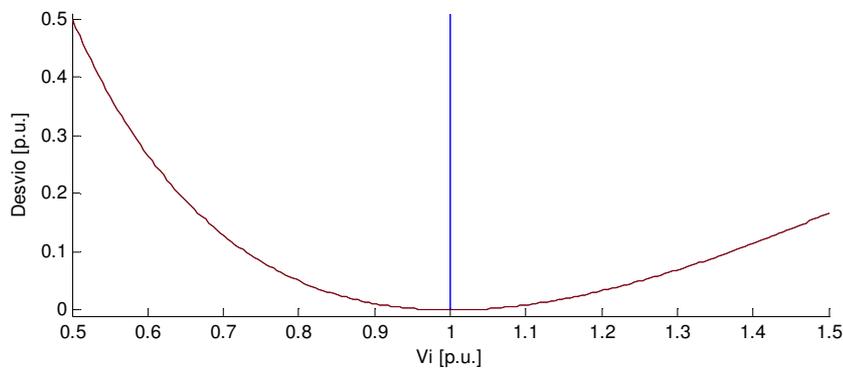
#### 4.2.2 Avaliação da Perda e do Ganho de Compensação

A relação entre a curva simétrica e a curva assimétrica permite medir o erro ou o desvio que a parcela de compensação apresenta em relação à tensão de entrada. Quando o RT opera com excitação variável existe uma perda na capacidade de compensação nos valores de  $V_i$  abaixo de  $1pu$ ; de forma contrária, quando a tensão  $V_i$  está acima de  $1pu$  a capacidade de compensação é estendida. O Desvio na Capacidade de Compensação ( $DesvioComp$ ) é o valor absoluto da diferença entre a (4.5) e a (4.6), o que dá origem à (4.7).

$$DesvioComp = \frac{V_i^2 - 2V_i + 1}{V_i} \quad (4.7)$$

O desvio na capacidade de compensação ( $DesvioComp$ ) pode ser dividido em duas parcelas: abaixo de  $1pu$  e acima de  $1pu$ , subtensão e sobretensão, respectivamente. O  $DesvioComp$  na região de subtensão pode ser definido como a Perda na Capacidade de Compensação (PCC), quando se aceita o RT com excitação variável como referência na análise. Na região de sobretensão o  $DesvioComp$  pode ser definido como um Ganho na Capacidade de Compensação (GCC), novamente tomando como referência o RT operando em excitação variável. A Figura 4.5 mostra o

comportamento do *DesvioComp* no regulador de tensão dentro de uma faixa de  $V_i$  entre  $0,5pu$  e  $1,5pu$ . Para uma condição de afundamento, quando  $V_i$  está em  $0,6pu$ , precisa-se de um TAP de  $0,667$  para garantir que a tensão regulada chegue a  $1pu$ , ou seja, um desvio de  $0,2667$ . Quando  $V_i$  está em  $0,9pu$  o desvio está em  $0,01111$ . Para uma tensão de entrada igual a  $1pu$  o desvio é zero; por sua vez, para valores de sobretensão o desvio é crescente. Analisando o desvio para uma sobretensão de  $1,1pu$  e  $1,2pu$  obtêm-se  $0,0091$  e  $0,0333$ , respectivamente.



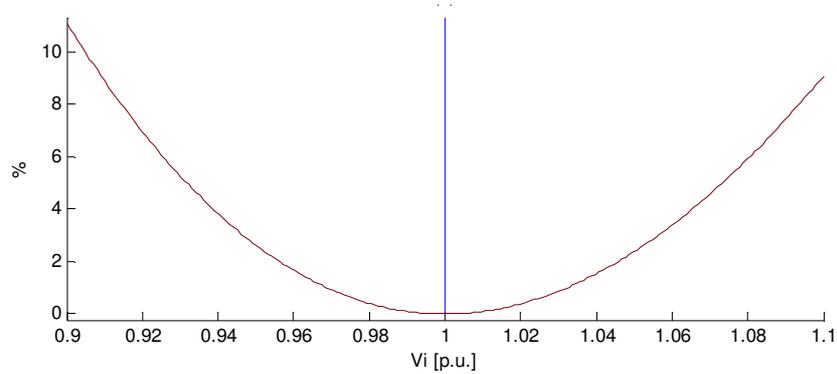
**Figura 4.5 – Desvio na capacidade de compensação entre o RT do Tipo A e do Tipo B.**

Também cabe uma análise da representatividade do *DesvioComp* dentro do intervalo de compensação (*DesvioCompInt%*) – (4.8). O somatório de todos os ganhos  $\varphi$  do regulador, multiplicado pela menor relação de transformação  $T_1$ , resulta no intervalo de compensação (ver “*Função de Ganho, Taps Reais e Taps Virtuais*”, página 39). A Figura 4.5 (b) mostra o comportamento do *DesvioCompInt%* dentro de

um intervalo de compensação de 10%, ou seja, para um valor de  $T_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi(i, j) = 0,1$ .

Dessa forma, o desvio na capacidade de compensação fica relacionado ao intervalo de compensação e se torna uma medida mais significativa no estudo dos RTs.

$$DesvioCompInt\% = \left( \frac{\left( \frac{Vi^2 - 2Vi + 1}{Vi} \right)}{T_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \phi(i, j)} \right) * 100 \quad (4.8)$$



**Figura 4.6 – Diferença percentual entre a capacidade de compensação do RT do Tipo A para o RT do Tipo B**

A Perda da Capacidade de Compensação está relacionada a quanto maior será a relação de transformação em um RT operando com excitação variável, do que em um RT operando com excitação fixa, dentro do mesmo nível de subtensão. Quando o RT está operando acima de  $1pu$  o  $DesvioCompInt\%$  está relacionado ao ganho de compensação que o RT do Tipo A tem em relação ao Tipo B. Dessa forma, pode-se afirmar que o gráfico da Figura 4.6 apresenta distintos comportamentos em relação à comparação dos RTs operando em excitação variável e fixa. Na faixa em que  $Vi$  está abaixo de  $1pu$ , o RT com excitação fixa tem um melhor desempenho. Por exemplo, para uma faixa de regulação de 10% o RT do Tipo B tem um desempenho 11,11% superior ao do Tipo A. Nas sobretensões, porém, o regulador com excitação variável apresenta um desempenho superior ao RT de excitação fixa, como pode ser verificado na Figura 4.6, quando os ganhos chegam a 9,09%.

As equações e gráficos utilizados para analisar e relacionar a faixa dinâmica de compensação do RT operando em excitação fixa e variável, são ferramentas auxiliares na escolha da faixa de compensação.

### 4.2.3 Determinação da Resolução Mínima do RT – $T_1$

O menor degrau de compensação pode ser definido como a resolução das relações de transformação (conforme *Resolução do regulador de tensão*, página 37). A (4.9) relaciona a tensão de entrada  $V_i$  e o número de *Tap's*  $\varphi_{max}$  para a obtenção de  $T_1^v$ , no caso de um regulador operando com excitação variável. Em excitação fixa, o cálculo da resolução do RT fica como enunciado na (4.10). A variável  $V_i$  está relacionada ao máximo afundamento ou sobretensão que se deseja compensar. No caso da (4.9) pode-se verificar que existe diferença em determinar  $T_1$  para uma subtensão ou sobretensão, porém para os RTs em excitação fixa ((4.10)) não existe essa diferenciação.

$$T_1^v = abs \left( \frac{1 - V_i}{V_i \cdot \varphi_{max}} \right) \quad (4.9)$$

$$T_1^f = abs \left( \frac{V_i - 1}{\varphi_{max}} \right) \quad (4.10)$$

A (4.9) pode ser utilizada para minimizar o efeito da sensibilidade do regulador por meio da escolha adequada do  $T_1$ . Dessa forma, a perda na capacidade de compensação é suprimida dentro da faixa dinâmica desejada. Por exemplo, no projeto de um RT com capacidade de compensar até 10% de afundamento e com um comutador eletrônico que permita acessar 20 *tap's*, ou seja,  $\varphi_{max} = 20$ , a resolução  $T_1 =$

0,5556%. Por sua vez, em um RT com as mesmas características descritas anteriormente, porém projetado para uma sobretensão de 10%, obtém-se uma resolução  $T_1 = 0,4545\%$ . Esse valor é menor do que o encontrado para o afundamento devido ao ganho de compensação.

A expressão deduzida a partir do RT operando em excitação fixa – (4.10), – determina a tensão de excitação em  $1pu$ . Logo,  $T_1$  não tem sua valoração afetada pela subtensão ou sobretensão que se deseja compensar. A isso se deve a simetria da curva de compensação deste RT – **Figura 4.4**. Utilizando essa equação para calcular o menor degrau do RT com capacidade de compensação de 10% e  $\varphi_{max} = 20$ , obtém-se  $T_1=0,5\%$ . Essa metodologia para determinar  $T_1$  deve ser utilizada quando se deseja operar apenas como Tipo B, do contrário, caso ocorra uma inversão do fluxo de potência no sistema e o RT assuma a operação como Tipo A, ocorrerá perda na capacidade de compensação.

Pode-se resumir a escolha do  $T_1$  tomando  $\varphi_{max}$  e  $V_i$  como conhecidos, como segue:

- a) o RT opera apenas com excitação fixa (Tipo B). Nesse caso, a (4.10) é a opção mais indicada. A utilização dessa metodologia de cálculo para reguladores que operam em excitação variável resulta na perda de capacidade de compensação durante a ocorrência de subtensões;
- b) o RT opera apenas com excitação variável, com a menor resolução possível e ênfase na regulação de sobretensão, devendo-se utilizar a (4.9), e nesse caso o parâmetro empregado para  $V_i$  será a Máxima Tensão a ser Compensada. Como consequência, a capacidade de compensação de afundamentos será reduzida no

caso do Tipo A. Por sua vez, a operação de um RT projetado segundo essa metodologia no modo excitação fixa causará perda na capacidade de compensação nos afundamentos e sobretensões;

- c) quando o regulador opera apenas com excitação variável e se deseja ênfase na regulação de subtensões, deve-se utilizar a (4.9) e  $V_i = \text{mínima subtensão a ser compensada}$ . Com isso, a resolução ( $T_1$ ) fica maior do que a calculada no item b, resultando em um compensador com menos acurácia. Por sua vez, a capacidade de compensação de sobretensão (Ganho de Compensação) é a maior possível, enquanto a perda na capacidade de compensação nos afundamentos é corrigida. A operação do RT em excitação fixa garante ganhos tanto na compensação de sobretensão quanto no afundamento.

### 4.3 Determinação dos *Tap's* Reais e Funções de Ganho - $\varphi$

Os níveis de compensação nos RTs do tipo S-DVR são conseguidos via soma e subtração de derivações denominadas como *Tap's* Reais (ver *Função de Ganho, Taps Reais e Taps Virtuais*, página 39). As funções de ganho resultam de valores inteiros que são a base para a formação dos demais degraus do RT. A função de ganho é denotada como  $\varphi(m, n)$ , onde  $m$  representa a bobina de regulação com  $n$  derivações – Figura 4.7.

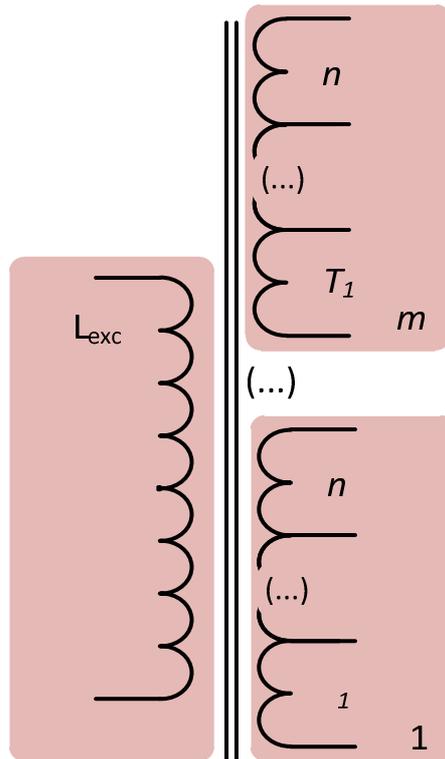


Figura 4.7 – RT com  $m$  bobinas de regulação e  $n$  derivações.

As funções de ganho são mecanismos que facilitam a determinação dos ganhos do RT. Elas se relacionam de forma algébrica por meio das operações de soma e subtração para  $m > 1$ . Além da manipulação dos ganhos, essas ferramentas são capazes de carregar informações relacionadas à localização do ganho na topologia, proporcionando uma correlação entre as bobinas de regulação e suas respectivas derivações.

### 4.3.1 Obtenção da faixa dinâmica de compensação a partir das funções de ganho

A relação entre  $T_1$  e as funções de ganho  $\varphi(m, n)$  permite calcular o valor máximo e mínimo de  $Tap$  – (4.11). Nesse caso, o sinal negativo da relação de transformação denota a inversão da derivação pelo comutador eletrônico de  $Tap$ 's. A Figura 4.8 representa a faixa dinâmica de compensação do RT em função dos ganhos de compensação. Também se pode verificar na (4.11) como obter o fundo de escala do RT.

$$Tap_{max} = T_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi(i, j) \quad (4.11)$$

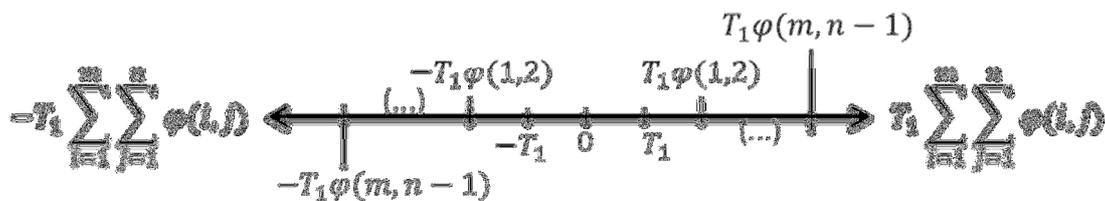


Figura 4.8 – Representação na reta numérica de um RT do tipo S-DVR.

Para determinar os valores dos ganhos  $\varphi$  é necessário primeiramente que seja escolhida a configuração topológica do regulador, e basicamente seleciona-se o número de bobinas de regulação e derivações. No capítulo 3 foram analisadas e generalizadas todas as possíveis configurações de RT com topologia S-DVR. Nele foi desenvolvido todo o tratamento matemático para determinar as possíveis combinações de chaves semicondutoras e as relações combinacionais entre os  $Tap$ 's. Normalmente a escolha de uma configuração topológica tem motivação econômica. Isso se deve ao fato do considerável custo das chaves semicondutoras que constituem o comutador eletrônico de  $Tap$ 's.

Após a escolha do número de bobinas de compensação, a seleção dos ganhos pode ser motivada por duas abordagens diferentes: a maximização da faixa dinâmica de compensação ou a maximização da confiabilidade.

### **4.3.2 Maximização da faixa dinâmica de compensação**

A maximização da faixa dinâmica do regulador visa a garantir a minimização da repetição entre *Tap's* e a continuidade entre os níveis de compensação. Dessa forma, a maior distância entre dois níveis deve ser a menor resolução,  $T_1$ , conforme descrito no tópico sobre *princípio de continuidade* (ver página 40). Com a escolha adequada da função de ganho, as repetições entre *Tap's* são reduzidas e proporcionam o máximo alcance da capacidade de compensação.

#### 4.3.2.1 Relação entre o RT convencional e a topologia S-DVR

Caso seja escolhida uma única bobina de compensação, o regulador terá o comportamento de um RT tradicional, em que cada derivação corresponde a um nível de compensação. A única operação possível entre as derivações é a de adição, ou seja, para cada novo nível de compensação será necessária a adição de um segmento com valor igual a  $T_1$ . Logo, não é possível qualquer otimização utilizando as funções de ganho, uma vez que para reguladores tradicionais elas perdem a eficácia. Isso se deve ao fato de não existir a propriedade de subtração no RT de bobina única – Figura 4.9.

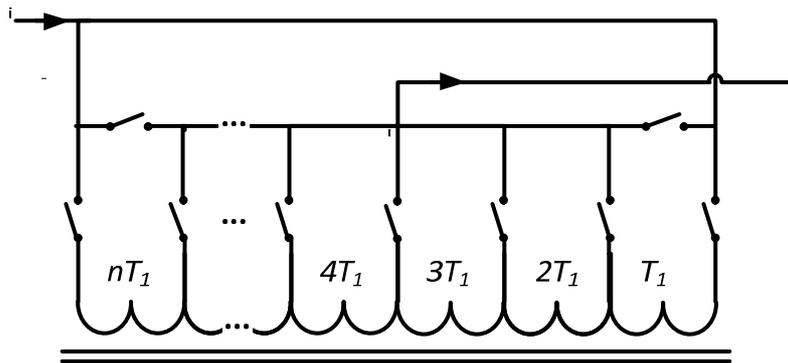


Figura 4.9 – RT de bobina única.

#### 4.3.2.2 RT com duas bobinas de regulação

Os RTs com duas bobinas de regulação (**Figura 4.10**) permitem a operação de adição e subtração dos valores de compensação. Dessa forma, pode-se aplicar a metodologia das funções de ganho para localizar os ganhos que maximizam a região de compensação. Para um regulador com dois enrolamentos e uma derivação por bobina, as funções de ganho são  $\varphi(1,1)$  e  $\varphi(2,1)$ . Definindo-se  $\varphi(1,1) = 1$ , a formação dos degraus pode ser obtida subtraindo a derivação da bobina de maior valor da de menor valor,  $\varphi(2,1) - \varphi(1,1)$ , onde o resultado será o máximo valor alcançado pela bobina  $\varphi(1,1)$  acrescido de  $\varphi(1,1)^*$ , ou seja, para garantir o princípio da continuidade a diferença entre dois valores subsequentes não poderá ser maior que uma unidade de resolução.

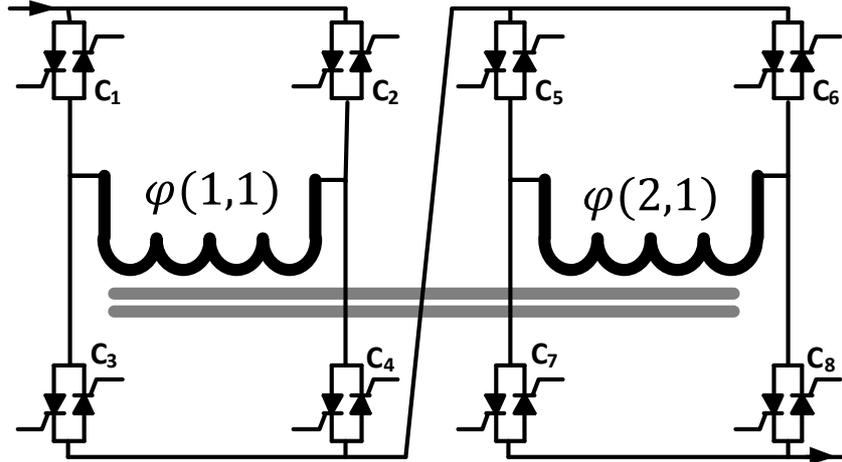


Figura 4.10 – Regulador de duas bobinas de compensação e uma derivação por bobina.

$$\varphi(2,1) - \varphi(1,1) = \varphi(1,1) + \varphi(1,1)^* = 3\varphi(1,1) \quad (4.12)$$

Utilizando a (4.12) para obtenção de  $\varphi(2,1)$ , o regulador em questão terá valores de ganho  $\varphi(1,1) = 1$  e  $\varphi(2,1) = 3$ , os quais podem ser utilizados para a obtenção da (4.13) por intermédio da (3.29). Empregando a (3.28) e a (4.13) para a obtenção da Tabela 4, deduzida no capítulo 3, pode-se determinar todas as possibilidades de *Tap*'s da configuração topológica escolhida.

$$Tap = S_1(a_1 T_1 + \bar{a}_1 T_{0,1}) + S_2(a_2 3T_1 + \bar{a}_2 T_{0,2}) \quad (4.13)$$

Tabela 4 – Possibilidades de *Tap*'s e configuração de cada um das chaves semicondutoras para duas bobinas de regulação e uma derivação.

n	$a_2$	$a_1$	$S_2$	$S_1$	$S_1 T_{0,1} \bar{a}_1$	$S_2 T_{0,2} \bar{a}_2$	$S_1 T_1 a_1$	$S_2 3T_1 a_2$	<i>Tap</i>	Chaves
1	0	0	-1	-1	$-T_{0,1}$	$-T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_2 C_4 C_6 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
2	0	0	-1	1	$+T_{0,1}$	$-T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_1 C_3 C_6 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
3	0	0	1	-1	$-T_{0,1}$	$+T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_2 C_4 C_5 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_3 \bar{C}_6 \bar{C}_8$
4	0	0	1	1	$+T_{0,1}$	$+T_{0,2}$	0	0	$T_0$	$C_1 C_3 C_5 C_7 \bar{C}_2 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_8$
5	0	1	-1	-1	0	$-T_{0,2}$	$-T_1$	0	$-T_1$	$C_2 C_3 C_6 C_8 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
6	0	1	-1	1	0	$-T_{0,2}$	$+T_1$	0	$+T_1$	$C_1 C_4 C_6 C_8 \bar{C}_2 \bar{C}_3 \bar{C}_5 \bar{C}_7$
7	0	1	1	-1	0	$+T_{0,2}$	$-T_1$	0	$-T_1$	$C_2 C_3 C_5 C_7 \bar{C}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_6 \bar{C}_8$

8	0	1	1	1	0	$+T_{0,2}$	$+T_1$	0	$+T_1$	$C_1C_4C_5C_7\bar{C}_2\bar{C}_3\bar{C}_6\bar{C}_8$
9	1	0	-1	-1	$-T_{0,1}$	0	0	$-3T_1$	$-3T_2$	$C_2C_4C_6C_7\bar{C}_1\bar{C}_3\bar{C}_5\bar{C}_8$
10	1	0	-1	1	$+T_{0,1}$	0	0	$-3T_1$	$-3T_2$	$C_1C_3C_6C_7\bar{C}_2\bar{C}_4\bar{C}_5\bar{C}_8$
11	1	0	1	-1	$-T_{0,1}$	0	0	$+3T_1$	$+3T_2$	$C_2C_4C_5C_8\bar{C}_1\bar{C}_3\bar{C}_6\bar{C}_7$
12	1	0	1	1	$T_{0,1}$	0	0	$+3T_1$	$+3T_2$	$C_1C_3C_5C_8\bar{C}_2\bar{C}_4\bar{C}_6\bar{C}_7$
13	1	1	-1	-1	0	0	$-T_1$	$-3T_1$	$-4T_3$	$C_2C_3C_6C_7\bar{C}_1\bar{C}_4\bar{C}_5\bar{C}_8$
14	1	1	-1	1	0	0	$+T_1$	$-3T_1$	$-2T_1$	$C_1C_4C_6C_7\bar{C}_2\bar{C}_3\bar{C}_5\bar{C}_8$
15	1	1	1	-1	0	0	$-T_1$	$+3T_1$	$+2T_1$	$C_2C_3C_5C_8\bar{C}_1\bar{C}_4\bar{C}_6\bar{C}_7$
16	1	1	1	1	0	0	$+T_1$	$+3T_1$	$+4T_3$	$C_1C_4C_5C_8\bar{C}_2\bar{C}_3\bar{C}_6\bar{C}_7$

Analisando a Tabela 4 pode-se verificar a existência de 16 possibilidades de operação do RT de duas bobinas de regulação e uma derivação em cada bobina. Das possibilidades pode-se verificar que são quatro *Tap's* positivos ( $T_1$ ,  $2T_1$ ,  $3T_1$ ,  $4T_1$ ) e quatro *Tap's* negativos ( $-T_1$ ,  $-2T_1$ ,  $-3T_1$ ,  $-4T_1$ ). Existem quatro opções de não regulação, as quais estão localizadas nas linhas de 1 a 4. O conjunto de semicondutores que é acionado para dar caminho para a corrente pode ser verificado na coluna **Chaves**.

#### 4.3.2.3 Regulador de tensão com duas bobinas de regulação e três derivações

A adição de uma derivação a mais no RT da configuração anterior – **Figura 4.10** – possibilita uma nova determinação dos ganhos pelo viés da maximização da faixa de compensação (ver Figura 4.11). Define-se  $\varphi(1,1) = 1$  e  $\varphi(1,2) = 2$ , para, então, determinar os valores de  $\varphi(2,1)$  e  $\varphi(2,2)$ .

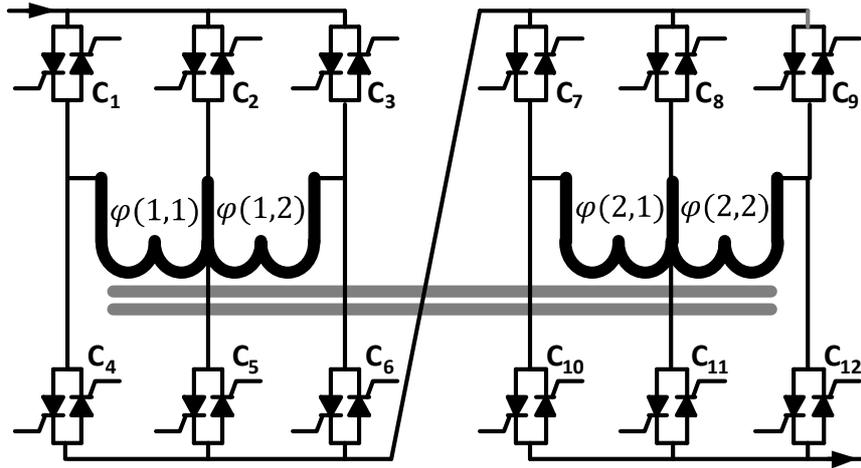


Figura 4.11 – RT com duas bobinas de regulação e duas derivações.

$$\begin{aligned}\varphi(2,1) - (\varphi(1,1) + \varphi(1,2)) &= \varphi(1,1) + \varphi(1,2) + \varphi(1,1)^* \\ \varphi(2,1) &= 3\varphi(1,1) + 2\varphi(1,2) = 7\varphi(1,1)\end{aligned}\quad (4.14)$$

$$\begin{aligned}\varphi(2,2) - (\varphi(1,1) + \varphi(1,2)) &= \varphi(1,1) + \varphi(1,2) + \varphi(2,1) + \varphi(1,1)^* \\ \varphi(2,1) &= 3\varphi(1,1) + 2\varphi(1,2) + \varphi(2,1) = 14\varphi(1,1)\end{aligned}\quad (4.15)$$

Os degraus que compõem a faixa dinâmica de compensação podem ser obtidos utilizando a expressão da (3.35) (página 60) para cada enrolamento de regulação, após isso basta somar essas expressões para se obter:

$$Tap = S_1 \bar{\alpha}_1 (a_1 T_1 + 2a_2 T_1 + \bar{a}_1 \bar{a}_2 T_{0,1}) + \alpha_1 \bar{a}_1 \bar{a}_2 T_{0,3} + S_2 \bar{\alpha}_2 (7a_3 T_1 + 14a_4 T_1 + \bar{a}_3 \bar{a}_4 T_{0,4}) + \alpha_2 \bar{a}_3 \bar{a}_4 T_{0,6} \quad (4.16)$$

onde  $T_{0,1}$  pode ser operado por  $S_1$  de tal forma que  $+T_{0,1} = T_{0,1}$  e  $-T_{0,1} = T_{0,2}$ , mapeando dessa forma a condição de não compensação correspondente às chaves  $C_1 C_4$  e  $C_2 C_5$ , respectivamente. Por sua vez, a condição de não compensação possibilitada pelo acionamento das chaves  $C_3 C_6$  é modelada por  $T_{0,3}$ . Para o segundo enrolamento as condições de não compensação são obtidas pelo acionamento das chaves  $C_7 C_{10}$ ,  $C_8 C_{11}$  e

$C_9, C_{12}$ , as quais são mapeadas pelas variáveis  $T_{0,4}$ ,  $T_{0,5}$  e  $T_{0,6}$ , respectivamente, onde  $T_{0,5} = -T_{0,4}$ , seguindo, dessa forma, a mesma lógica do primeiro enrolamento.

A análise das possíveis combinações de chaves semicondutoras que podem ser associadas, sem que ocorram curtos-circuitos, pode ser obtida expandindo a (4.17) em todas as combinações de chaves, conforme Anexo.

$$C_{Tap} = \prod_{s=0}^2 \left( \sum_{i=2s+1}^{2(s+1)} \left( C_i \prod_{j=i+1}^{2(s+1)} \bar{C}_j \prod_{l=2s+1}^{i-1} \bar{C}_l \right) \right) \quad (4.17)$$

Pode-se utilizar a (4.17) no projeto do circuito de disparo dos semicondutores de potência. Também se usa a correspondência entre a (4.16) e a (4.17) para associar cada degrau de regulação a sua sequência de chaves.

### 4.3.3 Maximização da confiabilidade

A confiabilidade de um compensador de tensão ideal é definida aqui como a ocorrência de mais de um caminho para cada nível de tensão. Isso é conseguido por meio da escolha adequada dos ganhos. Desse modo, qualquer valor menor para as funções de ganho do que o calculado utilizando a (4.16) e a (4.17), propiciará um encolhimento na faixa dinâmica de compensação e um aumento no número de degraus repetidos. Assim, tem-se mais de um caminho para realizar a regulação de tensão e se obtém um acréscimo na confiabilidade do RT.

# Capítulo 5

## 5 Simulação do Regulador de Tensão

Este capítulo tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo digital do Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de *Tap*. Com essa simulação será possível testar os comportamentos em regime permanente e transitório do regulador ora estudado. O simulador utilizado é o PSCAD/EMTDC<sup>®</sup>. Serão avaliadas as condições de regulação tanto em regime permanente quanto na Capacidade de Compensar Variações Momentâneas de Tensão *VTCDs*. O parâmetro de comparação empregado na análise tem como base as definições estabelecidas pelo Prodist em seu Módulo 8 [39].

### 5.1 Estratégia de controle do Regulador com Topologia S-DVR

O algoritmo de controle do RT atua regulando a tensão de saída, tomando como base a amplitude da tensão de entrada. A corrente  $I_s$  é utilizada para garantir o sincronismo do RT com o sistema de potência – Figura 5.1. A necessidade de usar a

corrente como base de tempo para o sincronismo do acionamento das chaves semicondutoras empregadas no RT reside no fato de os interruptores de potência que compõem o circuito de comutação de *taps* do regulador de tensão serem tiristores e de estarem operando na condição de comutação natural. Nessa condição, esse dispositivo deixa de operar quando a corrente passa por zero. Ou seja, qualquer eventual acionamento, antes da passagem da corrente por zero, pode levar a uma condição de curto-circuito entre os enrolamentos de regulação.

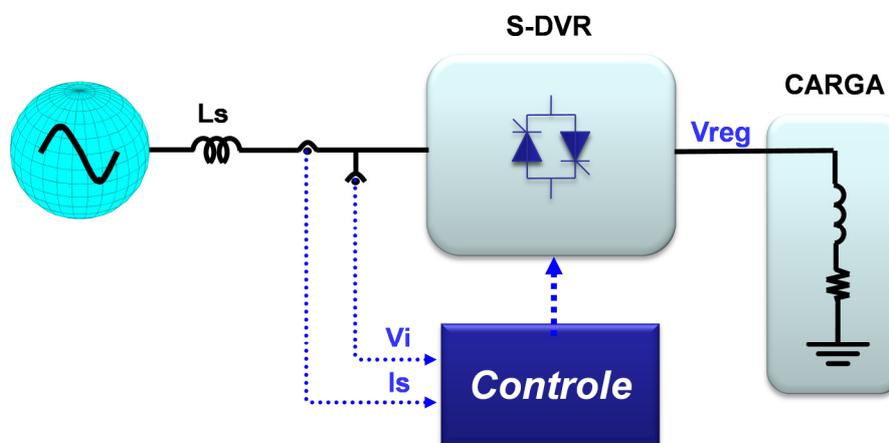


Figura 5.1 – Pontos de medição utilizados pelo controlador.

O diagrama de blocos do algoritmo de controle do RT está ilustrado na Figura 5.1. A partir da medição da tensão da entrada, o bloco “Detector de Amplitude” irá calcular o valor de pico referente a esta tensão – Figura 5.2. A amplitude  $A_1$  é a variável de entrada do controlador que sintetiza a estratégia de controle do RT. Sua saída é um valor de *Tap*, um ganho equivalente à relação de transformação a ser utilizada. Após isso, o valor de *Tap* é codificado em um conjunto de chaves semicondutoras (conforme determinado nas (4.16) e (4.17)), as quais correspondem ao circuito elétrico e eletromagnético que satisfaz a condição de regulação. O conjunto de chaves

semicondutoras é acionado no instante determinado pela estampa de tempo obtida via  $\omega t$ , que é a saída do bloco denominado “Detector de Fase”.

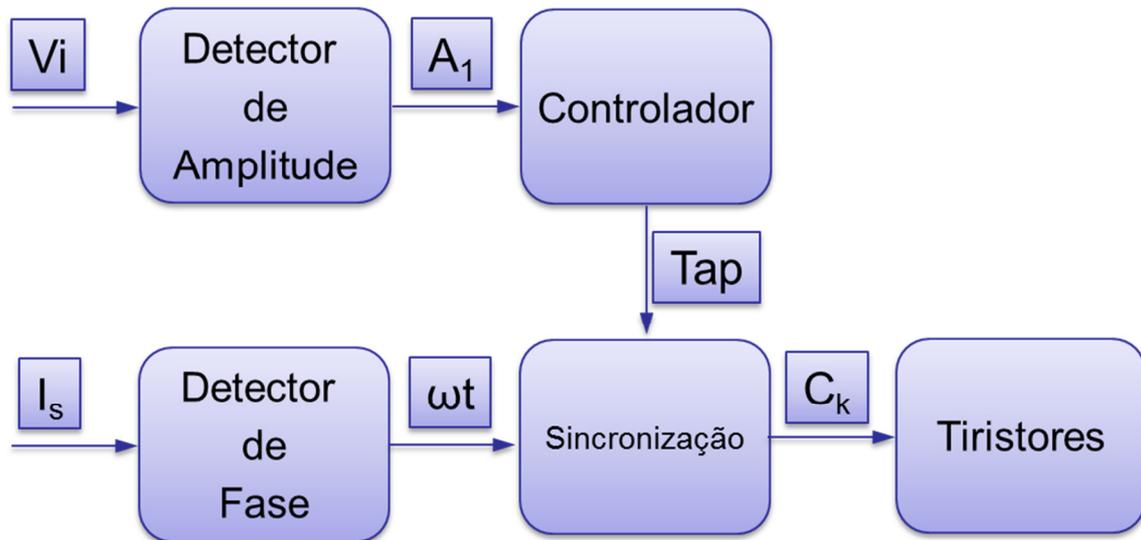


Figura 5.2 - Regulador de Tensão com Carga Resistiva

A Figura 5.3 apresenta o circuito do detector de amplitude da componente fundamental da tensão de entrada. A medição da tensão de entrada é inserida no controlador pelo terminal “In”. A amplitude da componente fundamental da tensão de entrada é fornecida ao bloco “Controlador” pelo terminal “Out”.

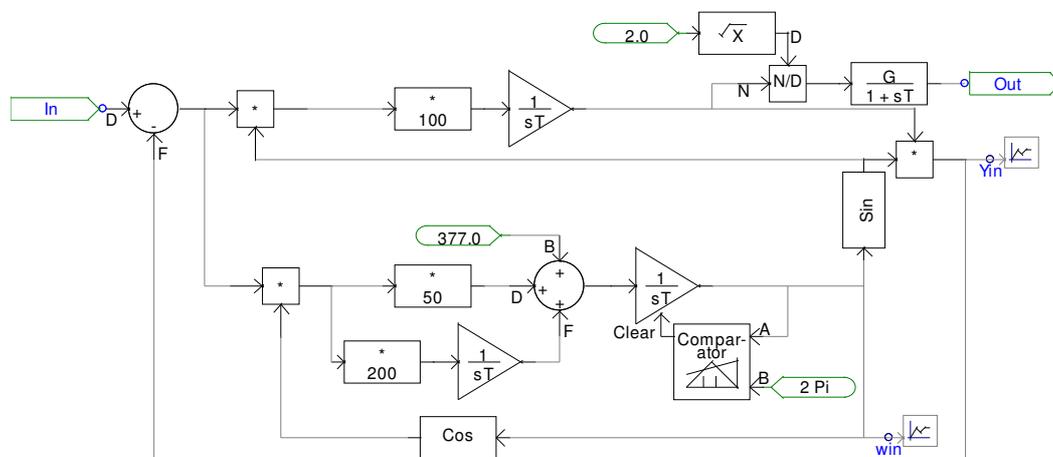
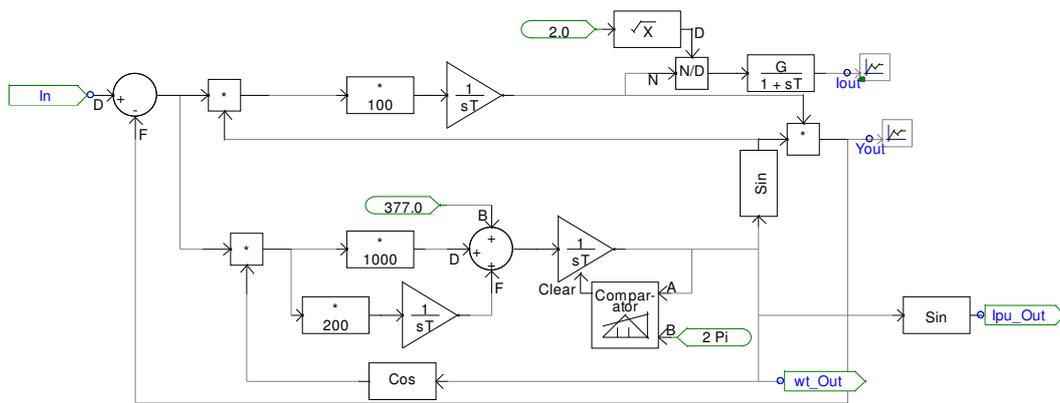


Figura 5.3 - Circuito de detector de amplitude.

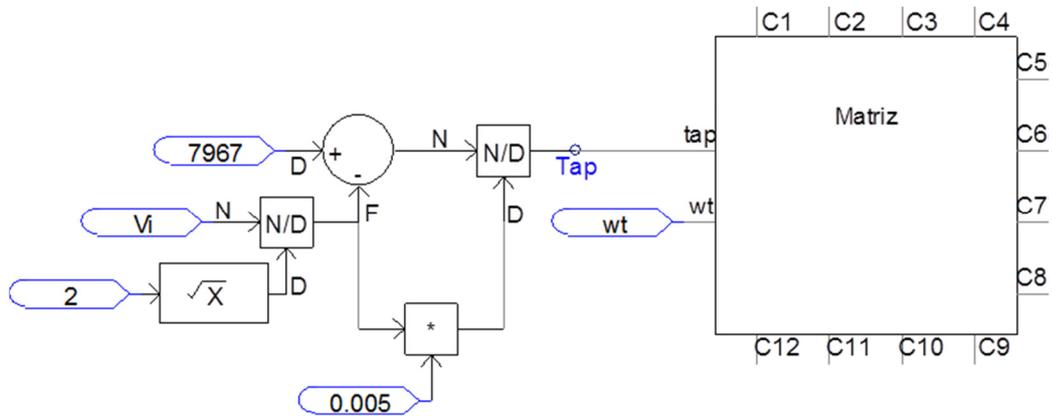
A Figura 5.4 apresenta o circuito do detector do ângulo de fase da componente fundamental da corrente de entrada. Analogamente, a medição da corrente de entrada é inserida no controlador pelo terminal “In”. A informação do ângulo de fase da componente fundamental da corrente de entrada é fornecida ao circuito de disparo pelo terminal “wt\_Out”, Bloco de Sincronismo.



**Figura 5.4 - Circuito de detector do ângulo de fase.**

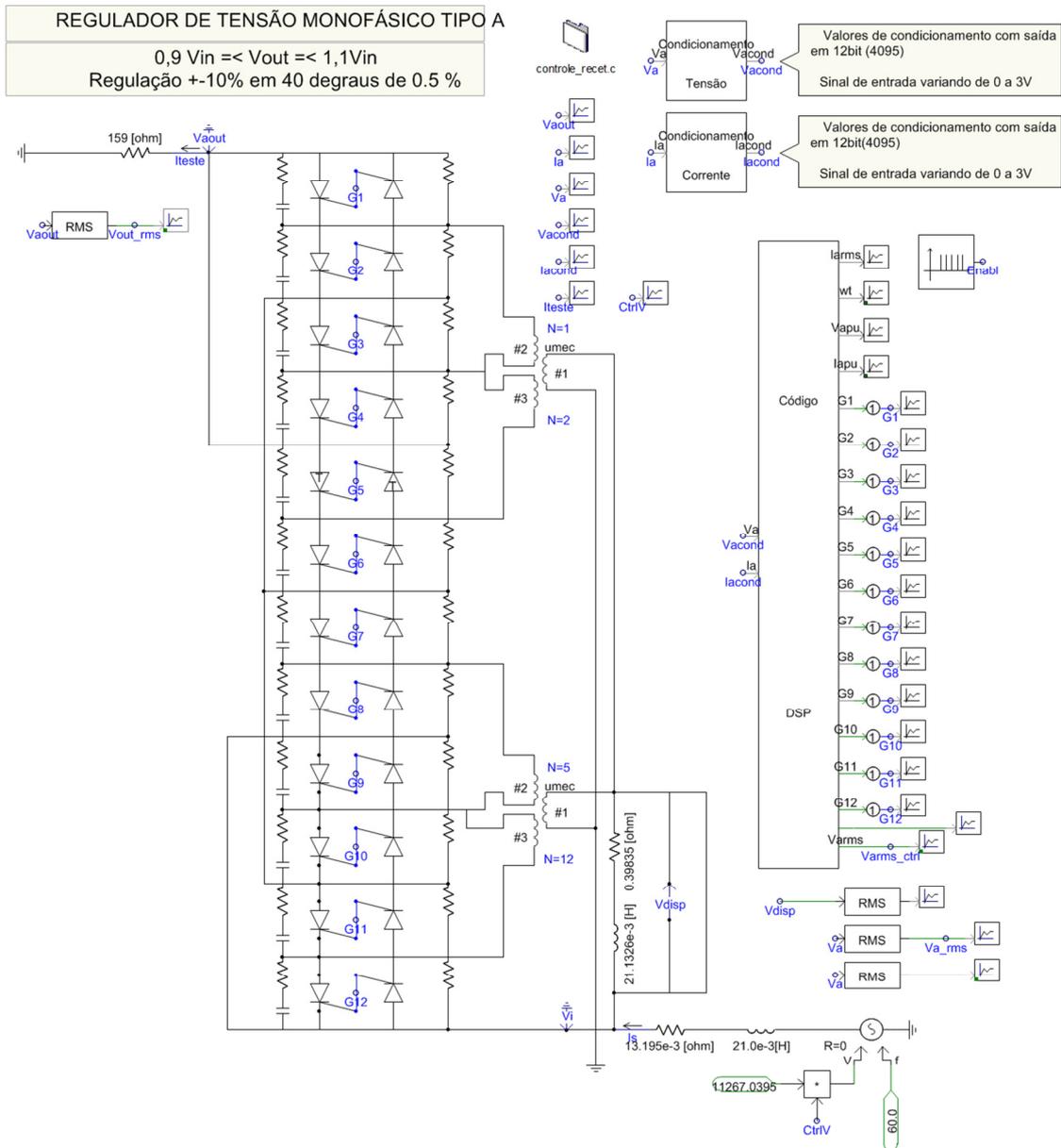
O controlador representado na Figura 5.2 está detalhado na Figura 5.5. Esse bloco é responsável por determinar o *tap* para cada nível de compensação do RT. A saída do detector de amplitude ( $V_i$ ) é comparada com a tensão de referência, no caso 7967V, gerando o *erro de regulação*. A tensão  $V_i$  também é multiplicada pela menor relação de transformação do RT, no caso 0,005, a fim de obter a menor parcela de compensação que o regulador pode proporcionar dentro da região onde ele está operando (conforme tratado em *Determinando a Região de Operação do RT do Tipo A*, página 70). Por fim, o erro de regulação é dividido pela menor parcela de compensação de tal forma que o número do degrau seja obtido. Com a informação dos taps utiliza-se uma matriz que mapeia a posição de cada conjunto de chaves para cada nível de compensação possível

(4.16) e (4.17). Por fim, o sistema verifica se o conjunto de chaves semicondutoras já pode ser disparado por intermédio das informações geradas por  $\omega t$ .



**Figura 5.5 - Controlador do RT.**

A seguir será apresentada a simulação do Regulador de Tensão com topologia S-DVR, resolução de 0,5%, com faixa dinâmica de compensação de  $\pm 10\%$ . O sistema é composto por quatro *taps* reais com ganhos de 1 (0.5%), 2 (1%), 5 (2.5%) e 12 (6%), sendo possível formar até 41 níveis de regulação com esses ganhos mais a condição de  $T_0$ . A tensão de referência do RT é de 6,2kV em todos os cenários simulados.



**Figura 5.6 – Regulador de Tensão com Carga Resistiva.**

Na Figura 5.7 o regulador de tensão opera no modo excitação variável (Tipo A). Essa simulação objetiva verificar o erro de regulação para cada nível de compensação *Erro\_reg* – Figura 5.7 (c). A Tensão não Regulada *Vi\_rms* consiste em uma rampa discretizada, com variação de tensão a cada 200ms e incremento na amplitude de 0,5%. A tensão não regulada parte de um afundamento de  $0,8pu$  e chega a uma sobretensão de  $1,2pu$ , para uma Tensão de Referência de  $6,2kV$  – Figura 5.7 (a). Por sua vez, a tensão

$V_{reg\_rms}$  corresponde à tensão de saída do regulador ou tensão regulada. Devido a dinâmicas internas, o tempo de cálculo da tensão RMS, e externas, constante transitória da carga, o controle precisa aguardar 3 ciclos entre as trocas de *Tap*. A incerteza do RT está em  $\pm 0.50$  (1 divisão), mesmo valor adotado para histerese de  $\pm 0.51$ . O modelo de autotransformador utilizado tem dispersão de 5% e a corrente de curto do alimentador é de 1kA. A carga utilizada é resistiva com valor de 124 ohms.

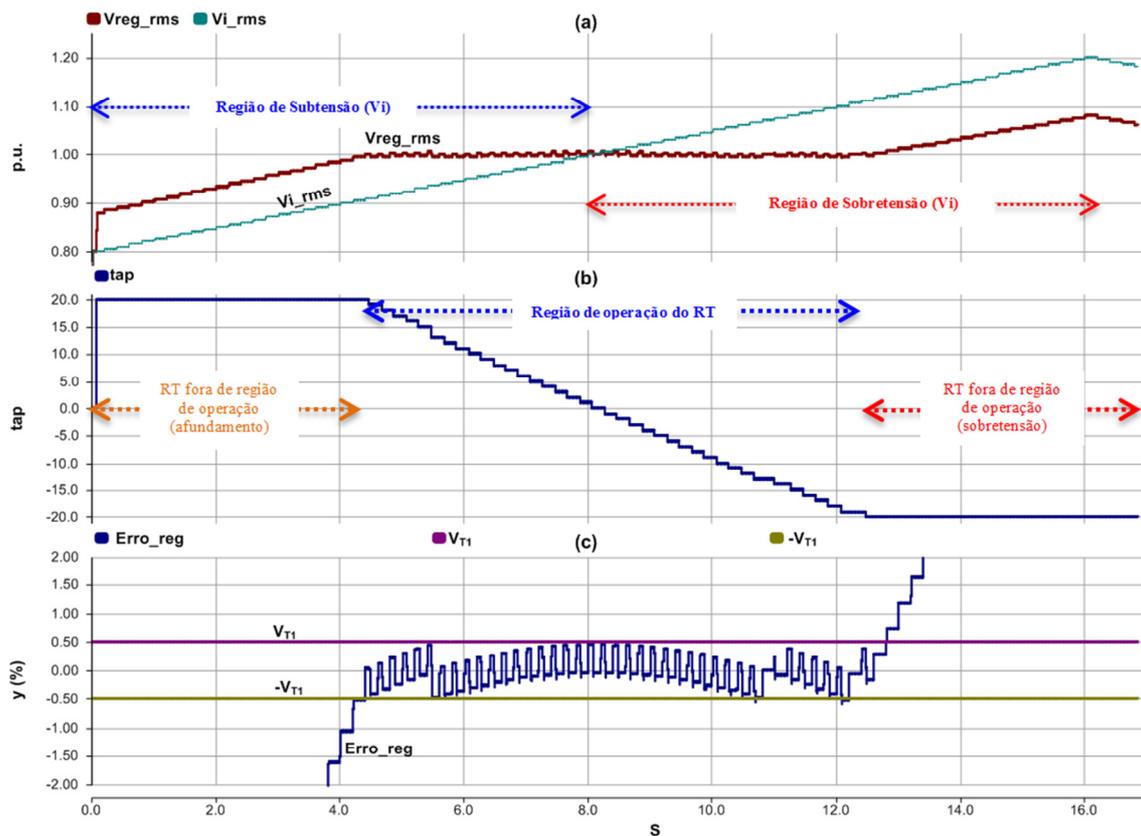


Figura 5.7 – (a) Tensão de entrada  $V_i$  e tensão regulada  $V_{reg}$ , (b) taps e (c) erro de regulação.

A Figura 5.7 (b) mostra a variação do *Tap* devido à variação de tensão (rampa da tensão de entrada). Nesse caso, tem-se uma excursão em toda a faixa de compensação. Entre 0 e 4,2 segundos o *tap* tem seu valor máximo positivo; isso se deve ao fato de o afundamento de tensão estar fora da região de compensação do regulador. Pode-se verificar um comportamento semelhante após 12,8 segundos, quando a

sobretensão atinge um valor acima da faixa de compensação. Nesse caso o regulador fixa o *tap* em -20. Dentro da faixa dinâmica, o regulador troca de *tap* em *tap* no decorrer dos incrementos na amplitude da tensão de entrada. No gráfico (c) mostra-se o erro de regulação (*Erro\_reg*), tomando como referência a tensão de 6,2kV. Nesse contexto  $V_{T1}$  e  $-V_{T1}$  referem-se à resolução do regulador. Como o *Erro\_reg* fica dentro dessa margem, pode-se afirmar que o erro de regulação está dentro da faixa de operação do RT. Tomando como base que qualquer erro do regulador entre  $\pm V_{T1}$  está dentro da região de incerteza desse sistema.

## 5.2 Análise de regulação segundo o Prodist

O cenário simulado é o mesmo da Figura 5.7, mas nesse caso a análise do erro de regulação está pelo viés das referências estipuladas pelo Prodist em seu Módulo 8. A Tabela 5 apresenta a classificação das tensões, tomando como base a Tensão de Referência (TR) e a faixa de Tensão de Leitura (TL), conforme as faixas nomeadas como Adequada, Precária e Crítica [39].

**Tabela 5 – Faixa de Classificação de Tensões em regime permanente superior a 1 kV e inferior a 69 kV [39].**

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)</b>
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

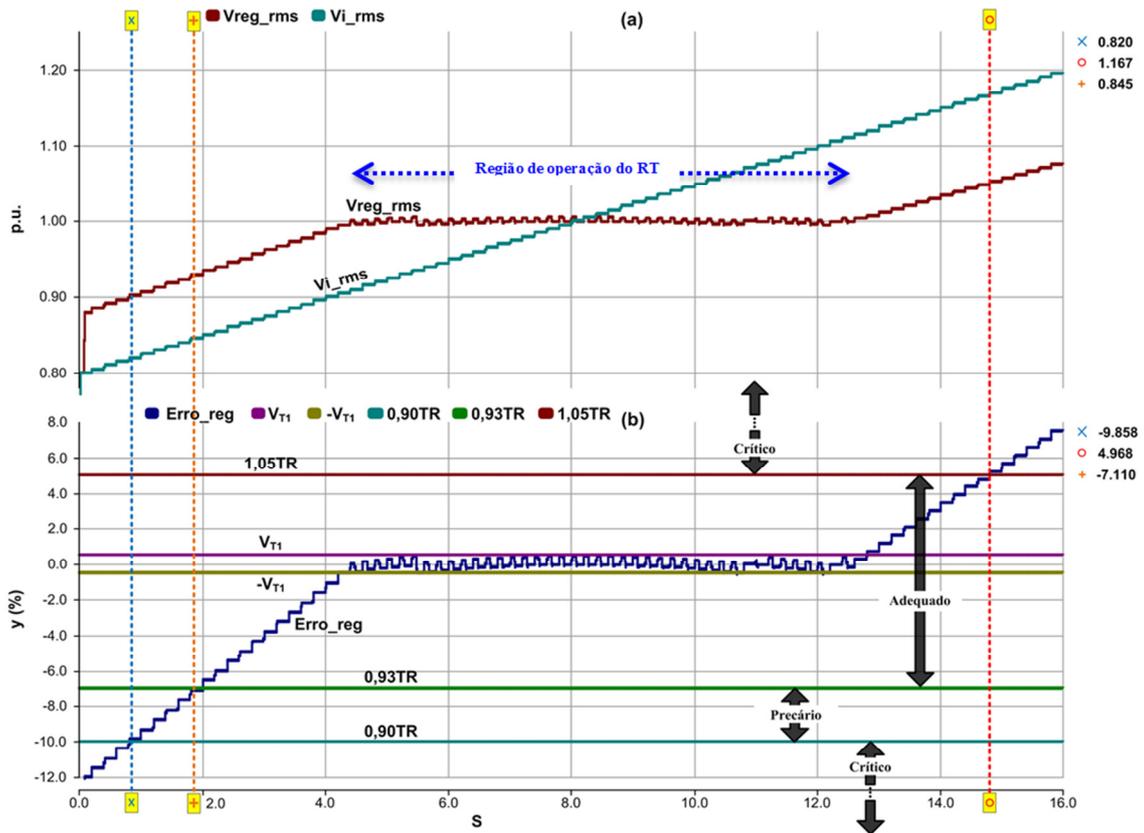


Figura 5.8 – Regulação de tensão segundo o Prodlist.

Tomando como base a Tabela 5, a

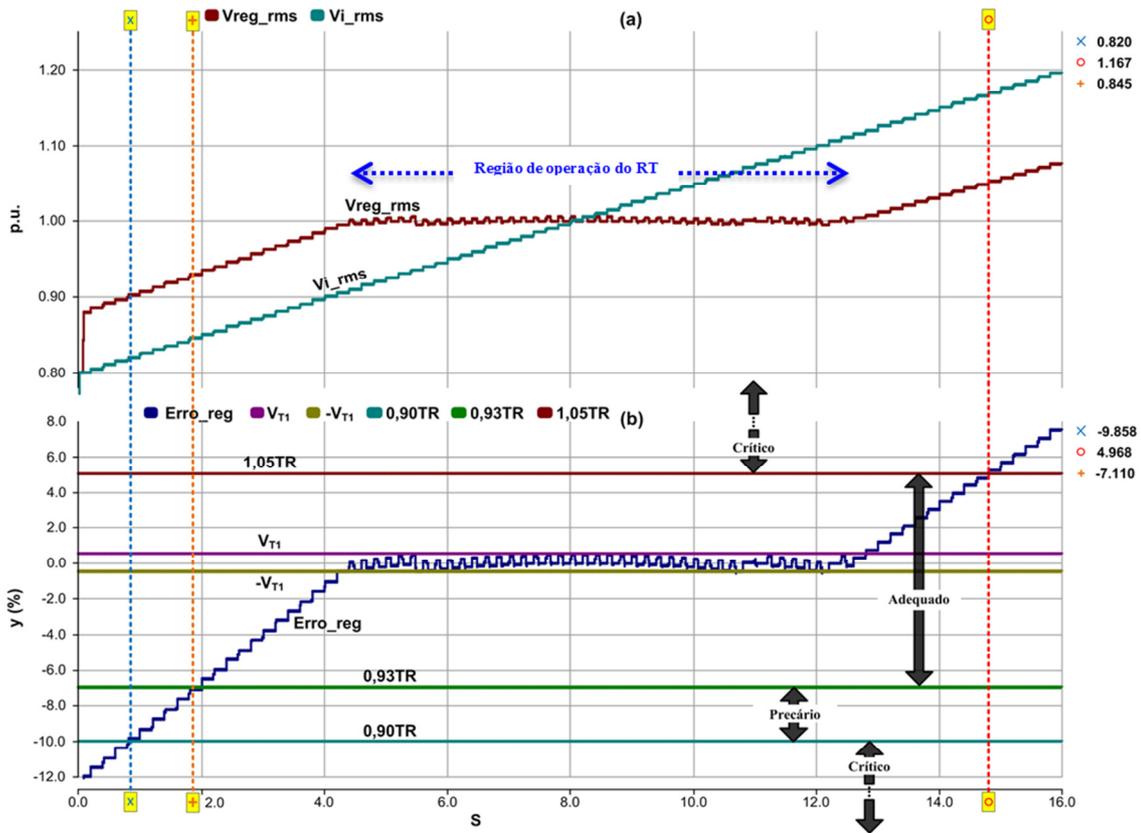


Figura 5.8 mostra a contribuição do RT para melhorar a regulação do sistema, mesmo quando opera fora de sua região de compensação. A interseção entre a marcação  $x$  e o patamar  $0,90TR$  faz alusão ao limite entre o sistema ser considerado *crítico* e *precário*. Nesse ponto a tensão de entrada está em  $0,82pu$ . Caso não se considere a sensibilidade da parcela de compensação à tensão não regulada, o RT seria capaz de regular um afundamento de  $0,8pu$  de tal forma que a tensão regulada ( $Vreg\_rms$ ) alcançasse o patamar de  $0,9pu$ , uma vez que a faixa de compensação está em  $\pm 10$  (essa redução na capacidade de compensação foi abordada em *Avaliação da Perda e do Ganho de Compensação*, página 75). Há, porém, um deslocamento na região de compensação para um afundamento de  $0,8pu$ , quando a máxima parcela de compensação alcançada fica em 8%, o que produz uma tensão regulada de  $0,88pu$ ,

valor abaixo dos  $0,9pu$ , considerado pelo Prodist para classificar o valor de tensão como *precário*. O próximo nível de afundamento produzido pelo incremento da tensão resulta em um afundamento de  $0,82pu$ . Nesse patamar, a parcela de compensação está em  $8,2\%$ , o que resulta em uma tensão de saída de  $0,902pu$ , ou seja, um erro de regulação de  $-9,8\%$ . Independente das limitações criadas pela sensibilidade à tensão de entrada, a partir de um afundamento de  $0,82pu$  o RT é capaz de regular a tensão de um nível considerado *crítico* para *precário*.

A intersecção do marcador “+” com o patamar  $0,93TR$  é a condição de fronteira para as classificações de regulação estabelecidas como *precária* e *adequada* – Tabela 5. Nesse ponto, a tensão de entrada está com uma amplitude de  $0,845pu$ , condição que proporciona uma parcela de compensação de  $8,45\%$  (*tap 20*), o que resulta em uma tensão regulada de  $0,9295pu$  (*Erro\_reg -7,11%*). A contribuição do regulador de tensão nessa condição permite que uma tensão com um afundamento de  $15,5\%$ , a qual seria considerada *precária*, atinja um nível *adequado*.

O marcador “o” cruza o patamar nomeado como  $1,05TR$  no instante em que a tensão não regulada está com uma sobretensão de  $1,167pu$ . Para essa condição, o RT opera fora de sua faixa de compensação ( $\pm 10$ ), mas mesmo assim garante que a tensão de saída ( $V_{reg\_rms}$ ) esteja dentro da faixa determinada como *adequada* pelo Prodist, ou seja, menor ou igual a  $5\%$  de sobretensão. No caso, a tensão regulada está com um erro de regulação de  $4,968\%$ . Nas condições de sobretensão, o RT, que trabalha no modo excitação variável, tem a sua faixa de operação estendida (Ganho de compensação). Nesse caso, a capacidade que era de  $10\%$  fica estendida a  $11,62\%$  para a

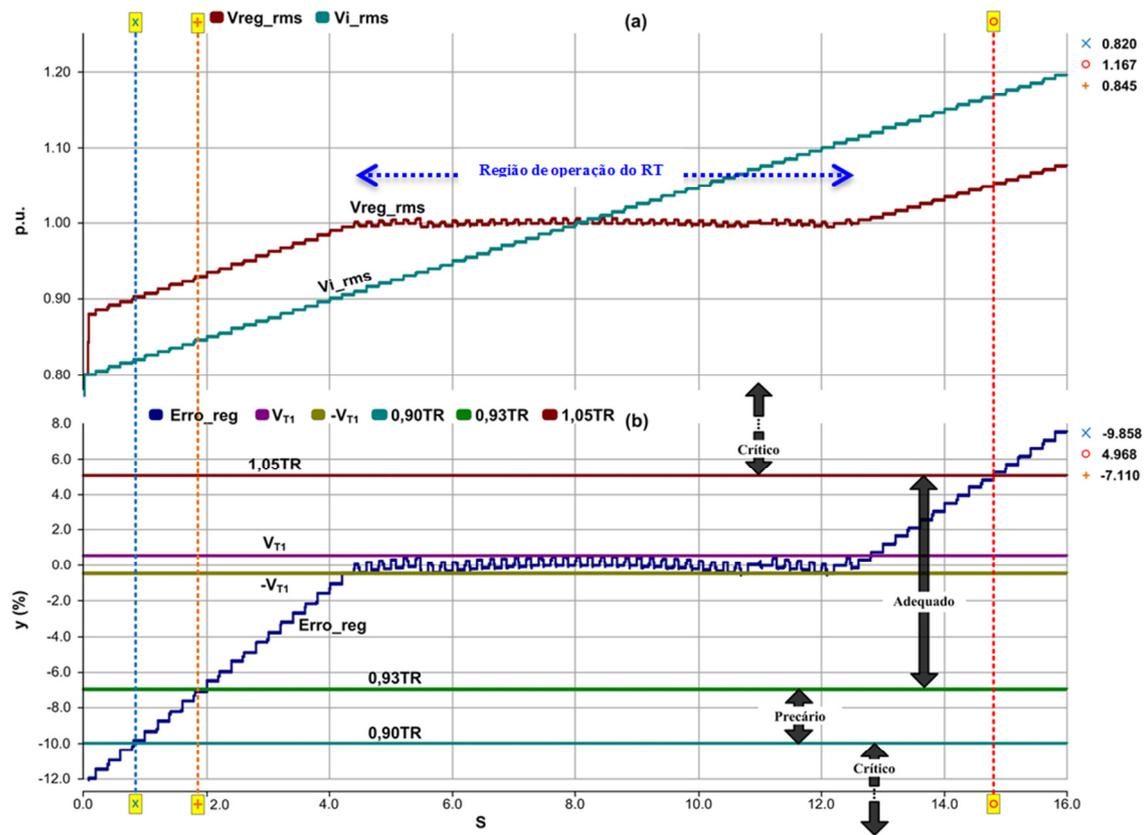


Figura 5.8. Isso equivale a mais de 3 graus de compensação de 0,5%. O fenômeno relacionado ao ganho de compensação foi introduzido no tópico *Avaliação da Perda e do Ganho de Compensação*, página 75.

### 5.3 Análise da sensibilidade das tensões nas derivações

Na subseção 5.2 observou-se uma dependência entre a tensão não regulada  $V_i$  e a faixa de compensação do regulador. O objetivo dessa subseção será estudar como os *taps* reais comportam-se com a variação  $V_i$  dentro da banda em que o regulador garante o erro de regulação mínimo ( $\pm 0.5\%$ ). Também será mostrado o deslocamento da faixa dinâmica do regulador causado pela variação da tensão de entrada. Esse deslocamento resulta nos fenômenos relacionados à Perda e ao Ganho de compensação.

Os dados que dão origem à Figura 5.9 continuam sendo referentes à simulação da subseção 5.2. Dessa forma, o gráfico pode ser dividido em três regiões distintas: a primeira compreendida entre  $0,91pu \leq V_i < 1pu$ ; a segunda em  $V_i = 1pu$  e a terceira entre  $1pu < V_i \leq 1,115pu$ .

Quando  $V_i = 0,91pu$  (Figura 5.9 (f)), a tensão de compensação do  $V_{T1}$ , valor que corresponde a menor resolução alcançada pelo RT, atinge 0,455% (Figura 5.9 (a)), o que equivale a um erro de -9% em relação ao seu valor para  $1pu$  (ou seja, 0,5%). A parcela de compensação  $V_{T2}$  para o ponto “o” corresponde a 0,908%; isso equivale a um erro de -9% em relação ao seu valor nominal (1%) (Figura 5.9 (c)). Os valores  $V_{T5}$  e  $V_{T12}$  também apresentam um erro em torno de -9% no ponto “o”. As diferenças entre os valores nominais e os valores medidos no ponto “o” se devem ao fato de os *Taps* Reais,  $T_1, T_2, T_5$  e  $T_{12}$ , serem relações de transformação dependentes da bobina de excitação, a qual é alimentada por  $V_i$

O impacto da sensibilidade do regulador de tensão com topologia S-DVR, operando no modo excitação variável, quando a tensão  $V_i$  está afundada, é uma redução da capacidade de regulação (Perda de Compensação). Para o caso apontado pelo marcador “o” há uma perda na capacidade de compensação de 2 níveis, ou seja, para afundamento o regulador tem 18 taps e não 20.

Quando a tensão de entrada é igual a  $1pu$  o regulador está com seus *taps* nos valores nominais. Nessa condição  $T_1, T_2, T_5$  e  $T_{12}$  tem valores de 0,5%, 1%, 2,5% e 6%, respectivamente.

Para condições de sobretensão o RT é capaz de regular acima de sua capacidade. O equipamento que foi projetado para ter uma parcela de compensação de -10% chega a

atingir valores de até -11,5% (Figura 5.9, marcador “x”). Observando a parcela de compensação individual dos *taps* nesse ponto, verifica-se um aumento desta nas derivações  $T_1, T_2, T_5$  e  $T_{12}$ , as quais apresentam valores de 0,56%, 1,119%, 2,794% e 6,716%, respectivamente. Para a elevação de tensão, portanto, há um incremento de 3 divisões de 0,5% na faixa dinâmica do RT (*Ganho na Capacidade de Compensação*).

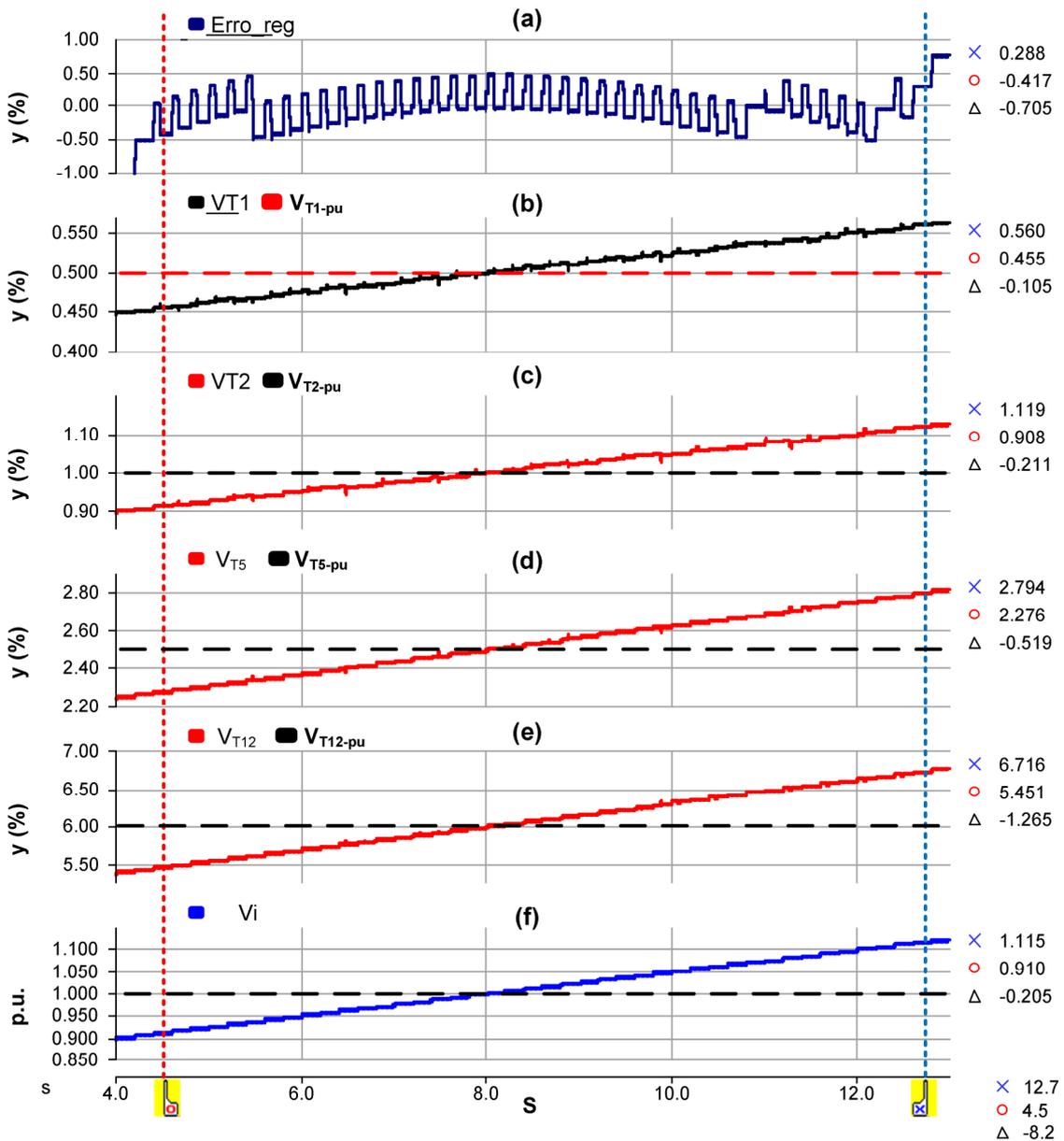


Figura 5.9 – Variação dos Taps Reais com a tensão  $V_i$ .

## 5.4 Tempo de desligamento das chaves semicondutoras

As chaves semicondutoras utilizadas na construção do RT são constituídas por dois tiristores, modelo SKKT162E18, ligados em antiparalelo. O tempo de desligamento dos SKKT162E18 é de  $150\mu\text{s}$  [40]. Essa característica cria a necessidade de que seja aguardado determinado tempo (tempo morto) entre a passagem da corrente por zero e o disparo de um novo *tap*.

A Figura 5.10 mostra o tempo morto que foi ajustado no controle para assegurar a inexistência de curto-circuito entre as bobinas de compensação. O tempo morto foi definido como um intervalo entre  $300$  a  $500\mu\text{s}$ , após a passagem da corrente por zero. Na Figura 5.10 pode-se verificar que a variável *tap* é calculada e tem seu valor modificado em  $7,87\text{s}$ , momento em que o controlador decide pela troca do *tap* 2 para o *tap* 1, porém o sistema ainda não acionou as chaves correspondentes a essa nova derivação. No instante  $7,875\text{s}$  a corrente passou por zero, o sistema espera por  $400\mu\text{s}$  ( $7,8754\text{s}$ ) e dispara o novo conjunto de chaves responsáveis por ligar a derivação do *tap* 1, evitando, assim, o curto-circuito entre os enrolamentos.

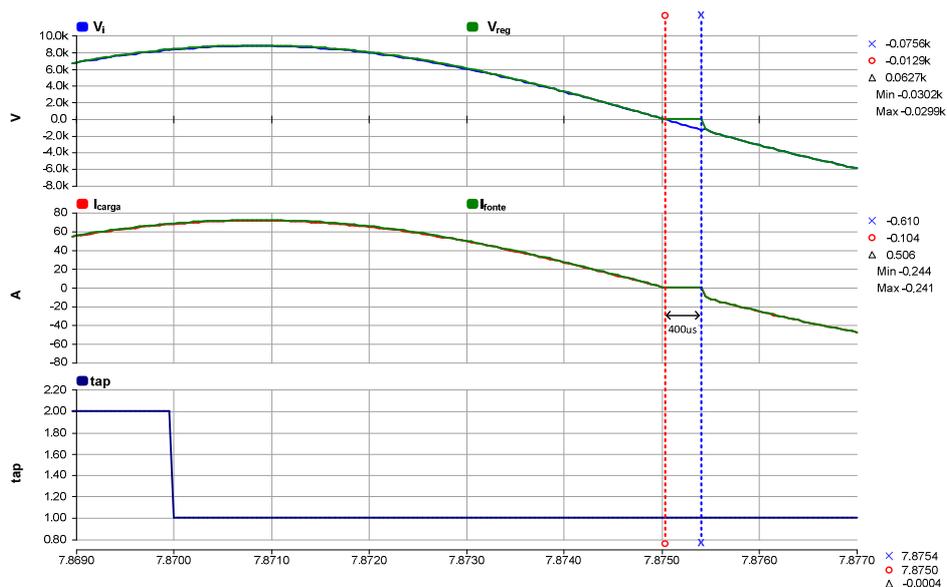


Figura 5.10 – Tempo morto na comutação entre *taps* diferentes.

## Compensação de variações momentâneas de tensão

Na Figura 5.11 o RT opera com uma carga de fator de potência unitária com uma corrente igual a 50A. A Figura 5.11 (a) apresenta a tensão de entrada  $V_{i\_rms}$  e a tensão regulada  $V_{reg\_rms}$ . A tensão de entrada sofre uma sobretensão de  $1,1pu$  no instante de 0,5s; após, seu valor desce até o patamar de  $1,05pu$  (de 0,5s até 1s). No intervalo entre 1s e 1,5s a  $V_{i\_rms}$  afunda a  $0,91pu$ . Nos intervalos seguintes a tensão chega a  $1pu$ ,  $1,075pu$  e  $0,925 pu$ , permanecendo nesses patamares por 0,5 segundos. O regulador de tensão entra em operação após 250ms. Após detectar um VTCD, o controle espera por um tempo de 50ms (3 ciclos) e então compensa a tensão. A Figura 5.11 (b) apresenta o erro de regulação ( $Erro_{reg}$ ). Pode-se verificar que após 50ms o RT minimiza o erro de regulação. O tempo de espera de três ciclos entre trocas de *taps* surge da necessidade de compensar as dinâmicas internas referentes ao cálculo do valor da tensão não regulada e da própria resposta do sistema às variações de tensão.

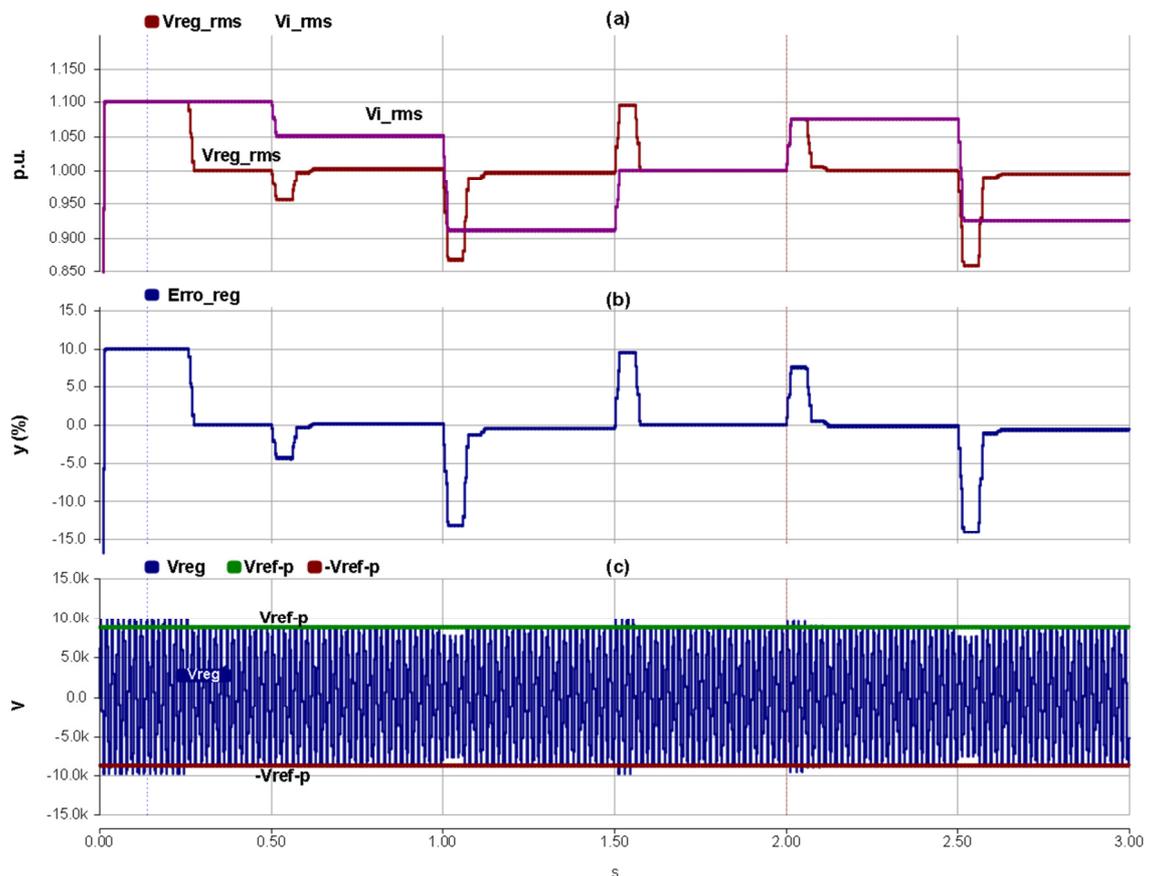
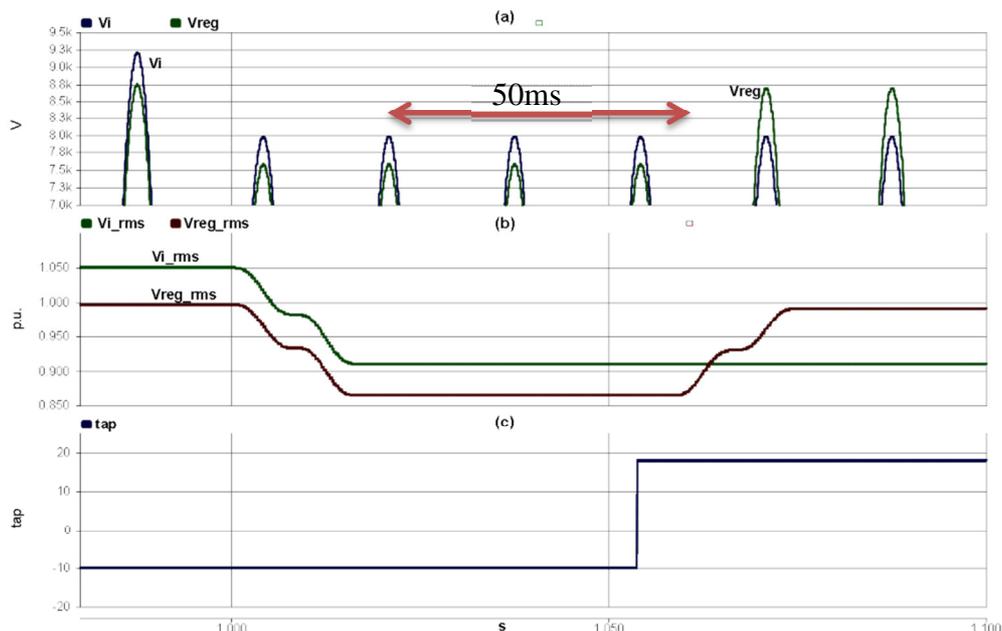


Figura 5.11 – Compensação de VTCDs com carga FP=1.

No intuito de ilustrar a compensação no tempo, a Figura 5.11 (c) mostra as respostas do RT ( $V_{reg}$ ), conforme os afundamentos e sobretensões vão ocorrendo ao longo da simulação. São utilizados dois patamares –  $V_{ref\_p}$  e  $-V_{ref\_p}$  – para representar os valores de pico, positivo e negativo, da tensão de referência,  $\pm 8768V$ . Pode-se verificar que  $V_{reg}$  é mantida dentro dos limites delineados pelos patamares.

A Figura 5.12 ilustra a compensação instantânea da tensão, porém com mais detalhes em relação à amplitude e em uma janela de tempo menor. No instante de 0,988s, a tensão de entrada ( $V_i$ ) tem uma amplitude de 9,2kVp, ou seja, 5% de sobretensão, enquanto a tensão na saída do RT ( $V_{reg}$ ) está em 8,74kV. Como o valor de pico da tensão de referência é 8,768kV, a tensão de saída,  $V_{reg}$ , pode ser

considerada regulada, uma vez que seu erro está em 0,32%. No próximo instante, a amplitude de  $V_i$  cai para 7,978kV e a queda em  $V_{reg}$  é mais acentuada. Isso se deve ao fato de o regulador estar operando no *tap* -10, o que intensifica o afundamento até que o RT mude de *tap*. Quando a  $V_{reg}$  cai para 7,575kV (um afundamento de 13,6%), após a acomodação da tensão, o regulador espera três ciclos e regula a tensão de saída para 8,692kV (0,8% de erro de regulação).



**Figura 5.12 – Compensação de VTCDs com carga FP=1 e corrente de 50A.**

Na primeira parte desta seção observou-se a operação do regulador de tensão com carga resistiva. Dessa forma, o funcionamento do regulador de tensão foi estudado em relação a sua dinâmica interna. Foi apurado o erro de regulação presente durante a excursão sistemática nos níveis da tensão de entrada desde um afundamento de 20% até uma sobretensão de mesmo calibre, com a finalidade de observar o comportamento da tensão de saída abaixo da faixa dinâmica de compensação, ao longo da faixa de compensação e acima da mesma faixa. Durante essa análise foi possível verificar o comportamento da tensão de saída em relação ao erro de regulação e mensurar a

contribuição do regulador de tensão, mesmo fora de sua banda de operação, na manutenção das faixas determinadas pelo Prodist em seu módulo 8.

Também foi possível relacionar a tensão de entrada com o deslocamento da região de compensação, prevista inicialmente pelo modelo matemático. A implicação nas Perdas e Ganhos de Compensação, conforme a região de operação, também foi verificada. Por fim, foi analisada a capacidade de compensar Variações Transitórias de Curta Duração e em regime permanente.

## 5.5 Análise do RT operando como Tipo A com Carga Indutiva

Nessa subseção será analisado o comportamento do regulador de tensão em relação a uma carga indutiva. As características do alimentador, número de taps, tensão base e dispersões continuam iguais as do cenário anterior. O fator de potência escolhido foi 0.92 indutivo e a potência aparente é de 310kVA.

Na Figura 5.13 apresenta-se a resposta do RT para uma tensão de entrada variando entre  $0,8pu$  e  $1,2pu$ . Na Figura 5.13 (a) pode-se verificar que a tensão regulada  $V_{reg\_rms}$  tem seu valor mantido em torno de  $1pu$  dentro da faixa dinâmica do regulador de tensão, pela troca sucessiva de taps – Figura 5.13 (b). O erro de regulação ( $erro\_reg$ ) ficou delimitado entre  $\pm 0.5\%$ , ou seja, uma resolução do RT.

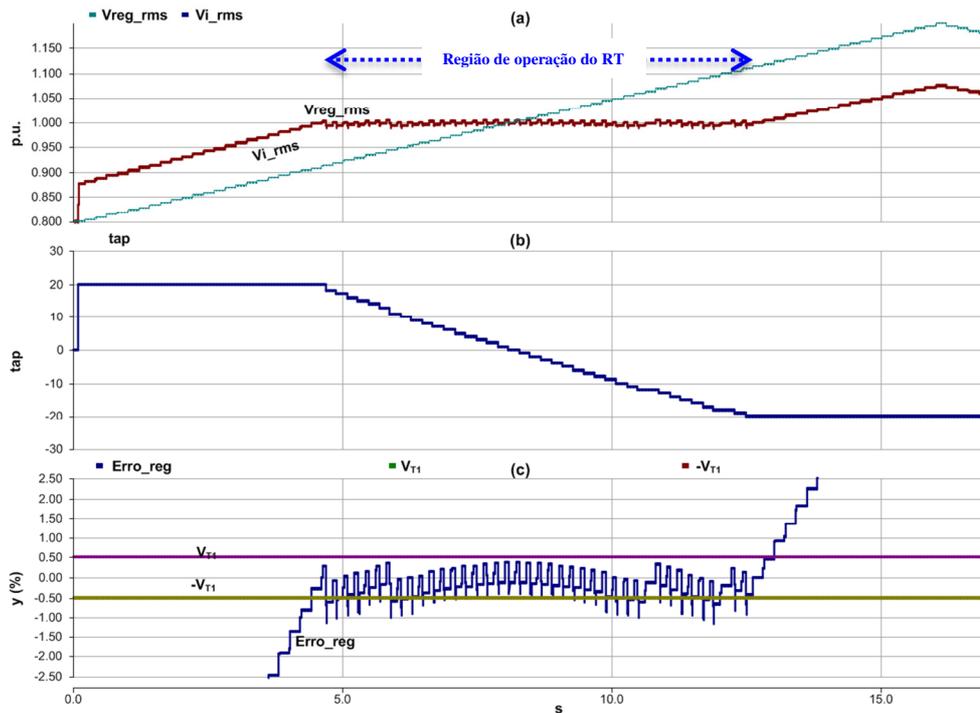


Figura 5.13 – (a) Tensão de entrada  $V_I$  e tensão regulada  $V_{reg}$ , (b) taps e (c) erro de regulação,  $f_p=0.92$ .

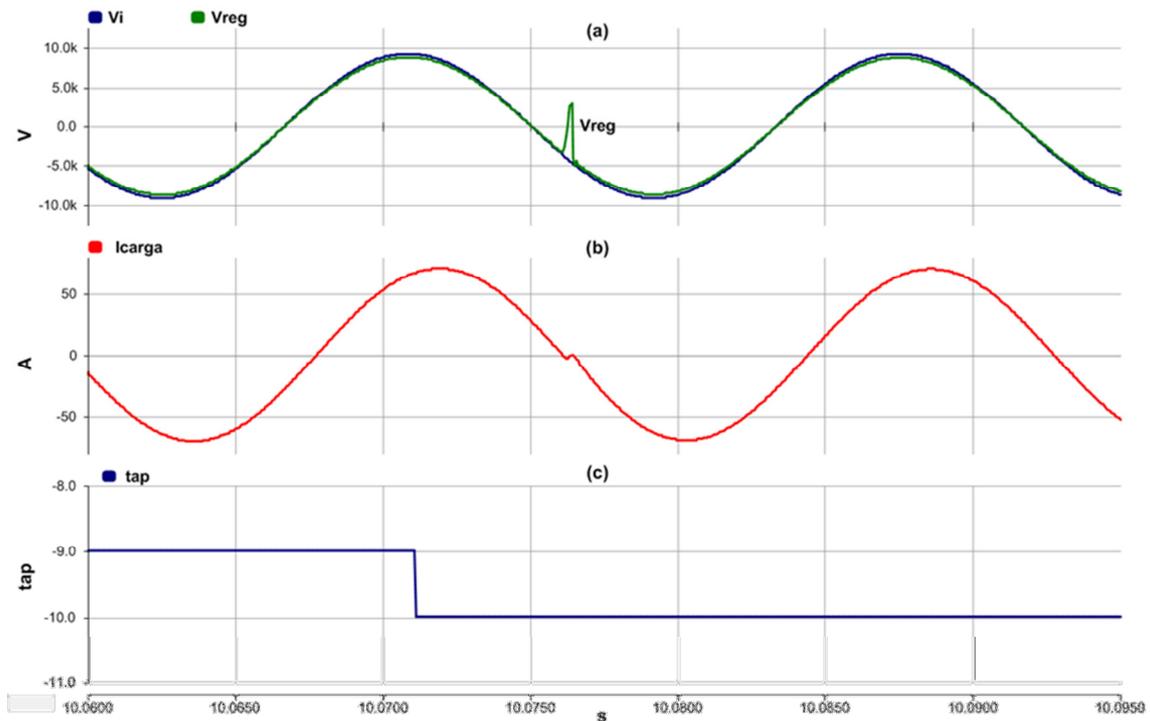
## 5.6 Impacto do tempo de desligamento do Tiristor em carga indutiva

A comutação é a transferência da corrente entre dois grupos de semicondutores de potência que compõem o comutador eletrônico da *taps*. Quando a corrente está atrasada em relação à tensão, o processo de comutação ocasiona *voltage notching*. A contribuição para os *notching* na tensão se deve à presença de indutâncias, tanto internas ao regulador: indutâncias de dispersão e indutâncias parasitas, quanto externas: dispersão do transformador do alimentador e indutâncias do cabo. A principal contribuição para o atraso da corrente está relacionada à parcela indutiva da carga.

Na simulação, as indutâncias do sistema foram representadas pelas indutâncias de dispersão do RT, a indutância que limita a potência de curto do alimentador e a indutância da carga, a qual tem a parcela mais representativa no sistema. Também cabe

ressaltar o tempo de desligamento do tiristor que, descrito na subseção 5.4, torna necessária a utilização de um tempo morto, a fim de garantir que as chaves do *tap* anterior interrompam a condução. Essa situação causa uma interrupção transitória na carga (ver Figura 5.14). Quando a carga tem fator de potência igual a zero, a interrupção, tanto da tensão quanto da corrente, estão em fase, entretanto quando o RT opera com carga indutiva a diferença de fase entre a tensão e a corrente produz um corte na tensão – *voltage notching*.

Na Figura 5.14 (a) está ilustrado um recorte de tensão em  $V_{reg}$  para uma carga indutiva com fator de potência igual a 0,92. Como pode ser verificado na Figura 5.14 (c), o *tap* calculado pelo sistema de controle é acionado no comutador eletrônico de *tap* 300us após a passagem da corrente pelo zero – Figura 5.14 (b) –; isso causa uma interrupção na alimentação da carga. Com a passagem da corrente por zero, o grupo de chaves do *tap* anterior ( $tap = -9$ ) deixa de conduzir em no máximo 150us. Por segurança o sistema de disparo espera 300us para acionar o novo grupo de chaves ( $tap = -10$ ). Esse intervalo faz com que a tensão nos terminais da carga seja interrompida produzindo um corte na tensão.



**Figura 5.14 – Tempo morto na comutação entre taps com carga indutiva, FP=0,92.**

Na Figura 5.15 pode-se verificar o recorte na tensão para uma carga indutiva com fator de potência igual a 0,8. Nesse caso, o *notching* tem um valor de pico a pico de 8,8kV. A amplitude da tensão no momento do desligamento do tiristor equivale a 5,3kV. Após os 300us o novo patamar de tensão está em 6,1kV.

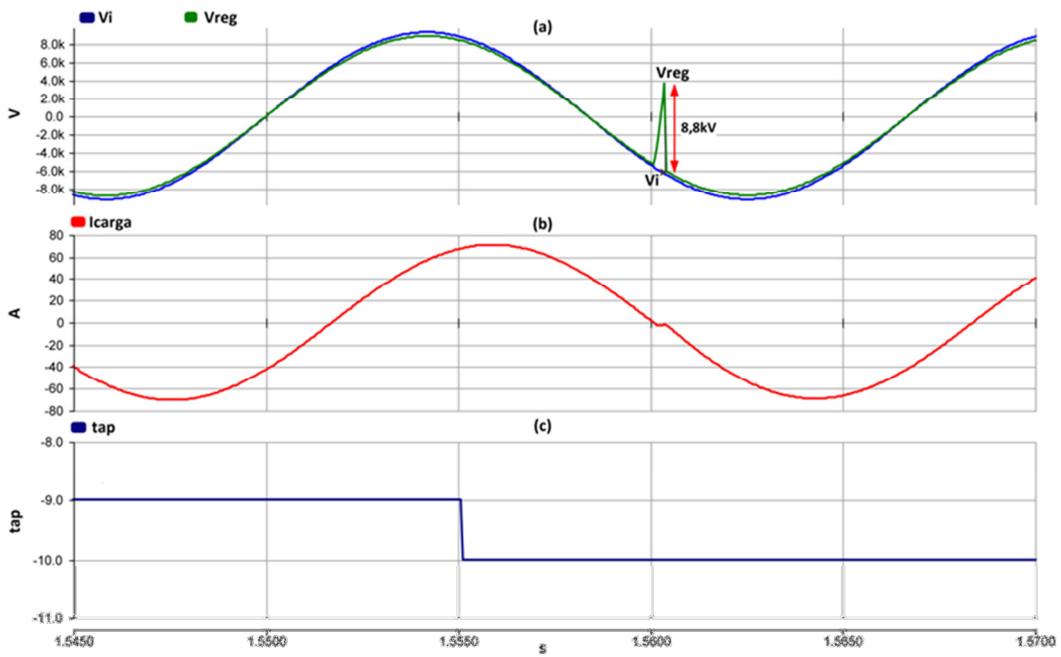


Figura 5.15 – Tempo morto na comutação entre taps com carga indutiva, FP=0,8.

As Figura 5.16 e Figura 5.17 ilustram uma série de comutações entre *taps* diferentes -14, -13, 15, 16 (Figura 5.16) e 16, 15, -12 e -14 (Figura 5.17), respectivamente.

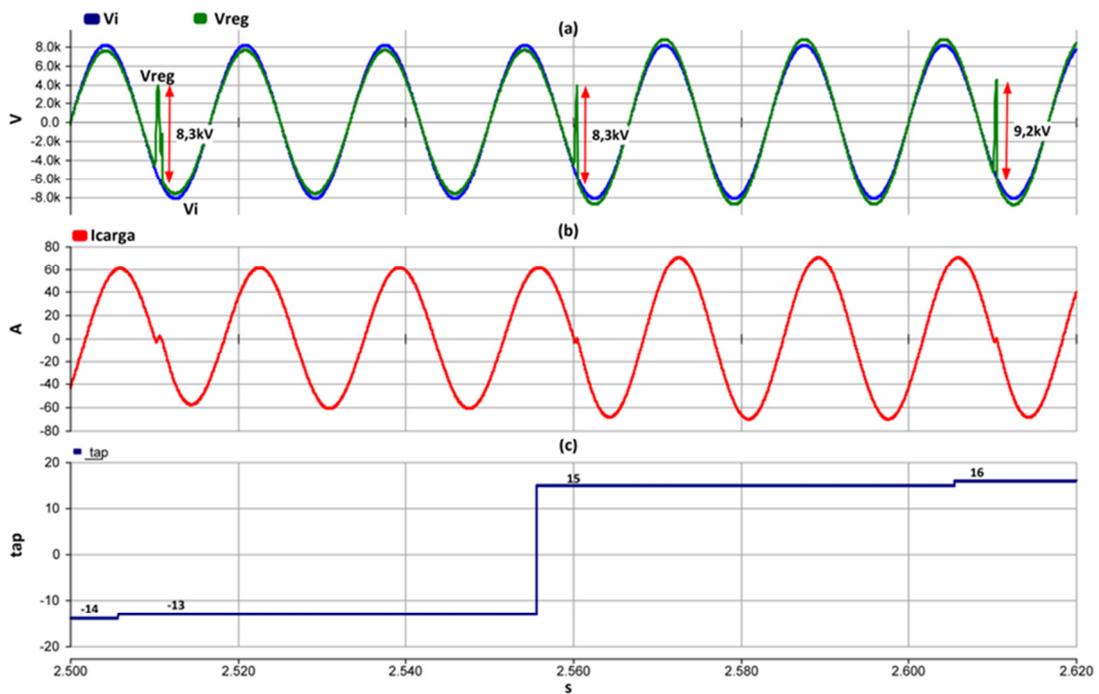


Figura 5.16 – Tempo morto na comutação entre taps com carga indutiva, FP=0,8.

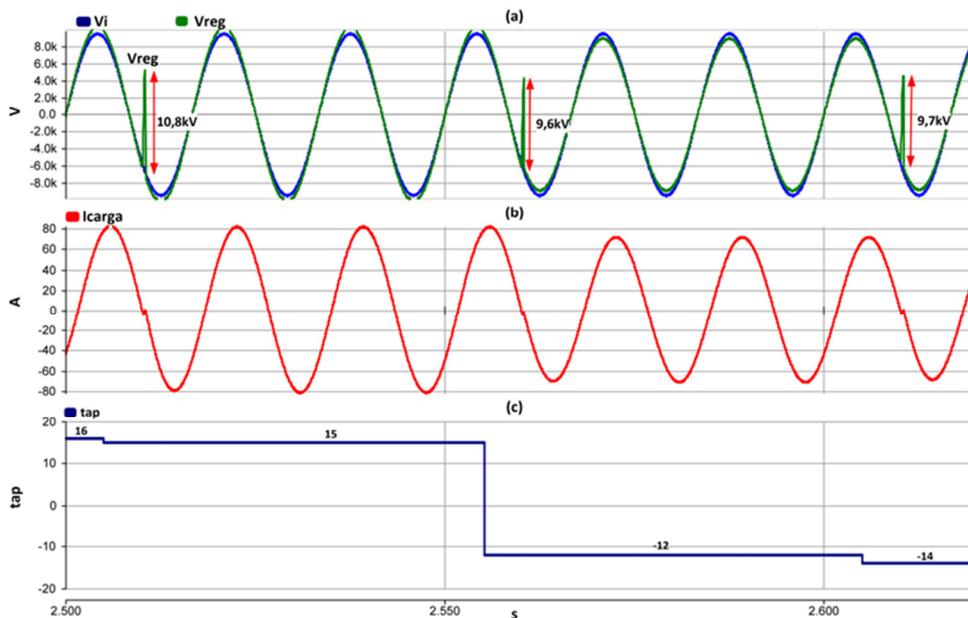


Figura 5.17 – Tempo morto na comutação entre taps com carga indutiva, FP=0,8.

As Figura 5.18 e Figura 5.19 apresentam a operação do regulador operando com carga indutiva, de fator de potência 0,8 e 0,7, respectivamente.

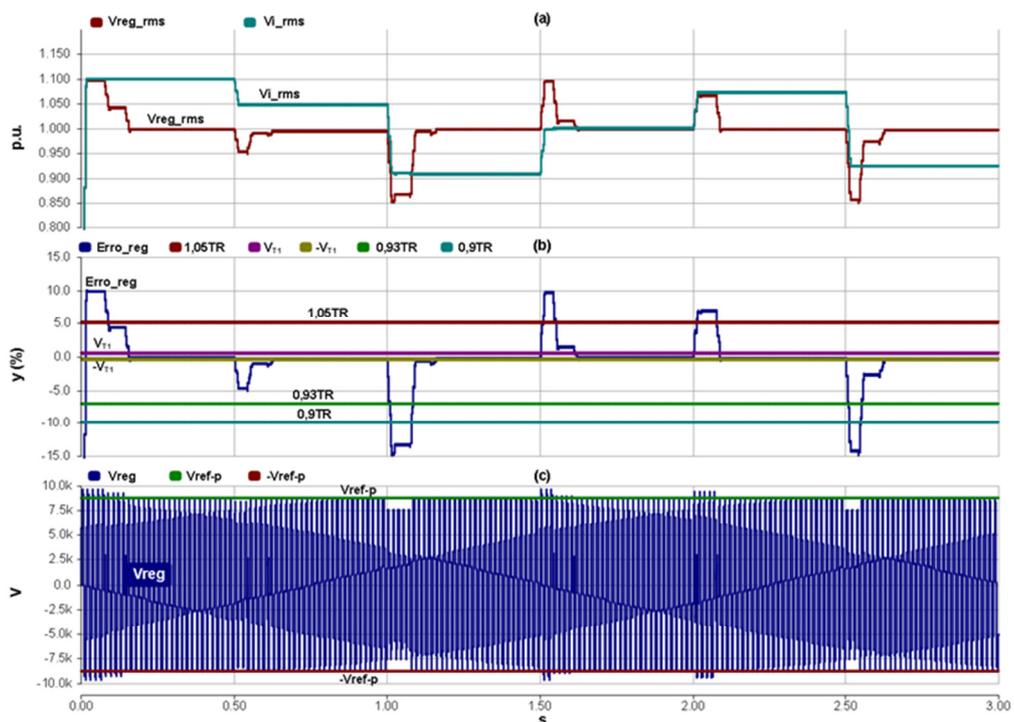


Figura 5.18 – Compensação de VTCDs com carga FP=0,92 e corrente de 50A.

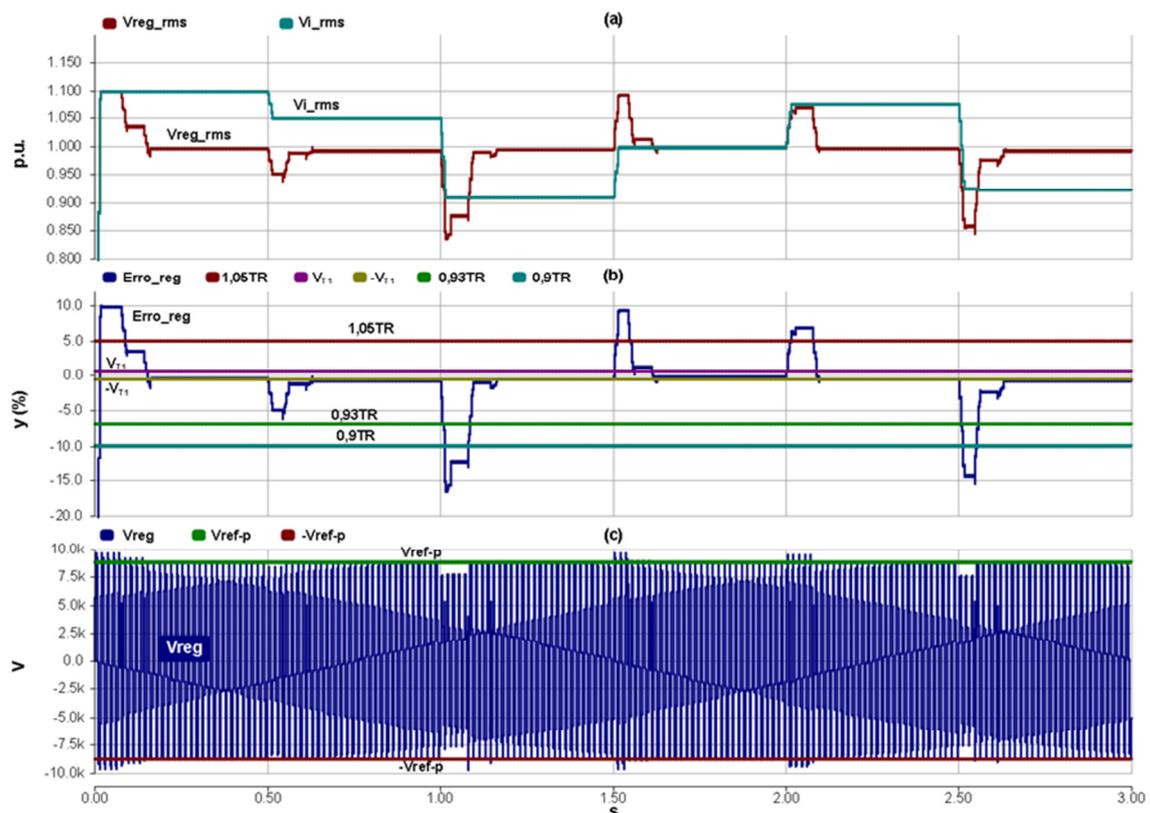


Figura 5.19 – Compensação de VTCDs com carga FP=0,7 e corrente de 50A.

Este capítulo está dividido em duas análises do RT, sendo uma operando com carga resistiva e a outra com carga indutiva. Na operação com carga resistiva observou-se o funcionamento do regulador de tensão em relação a sua dinâmica interna. Foi apurado o erro de regulação presente durante a excursão sistemática nos níveis da tensão de entrada desde um afundamento de 20% até uma sobretensão de mesmo calibre, com a finalidade de observar o comportamento da tensão de saída abaixo da faixa dinâmica de compensação, ao longo da faixa de compensação e acima da mesma faixa. Durante esta análise foi possível verificar o comportamento da tensão de saída em relação ao erro de regulação e mensurar a contribuição do regulador de tensão mesmo fora de sua banda de operação, na manutenção das faixas determinadas pelo Prodist em seu módulo 8. Ainda no que se refere à análise com carga resistiva relacionou-se a

tensão de entrada com o deslocamento da região de compensação, prevista inicialmente pelo modelo matemático. A implicação nas Perdas e Ganhos de Compensação, conforme a região de operação, também foi verificada.

A operação com carga indutiva permitiu verificar o funcionamento do RT quando a tensão e a corrente não estão em fase. O fator de potência indutiva implica em *notchings* na tensão de saída, de tal forma que o desempenho do RT em relação ao seu sincronismo pode ser avaliado. Também foi apurado o erro de regulação presente em um intervalo entre -20% até +20% de subtensão e sobretensão, respectivamente. Dessa forma, foi possível verificar o desempenho do RT fora de sua região de operação, o qual se mostrou eficaz mesmo nessa condição. No que respeita às variações de tensão de curta duração, com amplitudes dentro da faixa operacional do RT, verificou-se que o erro de regulação ficou dentro dos valores esperados. Assim sendo, o RT mostrou ser uma boa opção para a regulação de tensão tanto em carga resistiva quanto em carga indutiva, além de contribuir para a melhoria no perfil de tensão quando se opera fora de sua faixa dinâmica.

# Capítulo 6

## 6 Resultados Experimentais de um RT com Topologia S-DVR

A coleta dos resultados experimentais visa a validar, ao menos em parte, as premissas adotadas e as conclusões inferidas ao longo dos capítulos anteriores. O modelo matemático, a metodologia construtiva e a estratégia de controle serão avaliados. Também se pretende verificar o quanto fidedigno é o modelo digital em relação ao sistema físico. Por fim, será verificada a viabilidade técnica da implementação de um RT com topologia S-DVR.

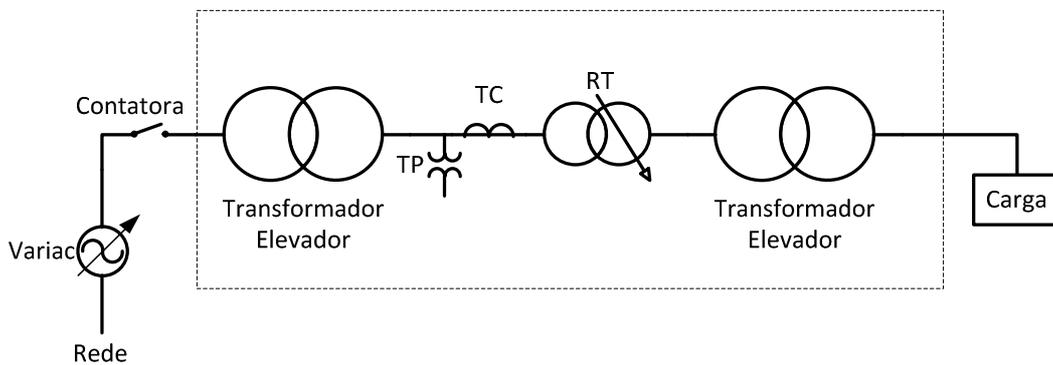
Quanto à complexidade do protótipo montando, cabe ressaltar alguns números que não podem deixar de ser considerados. O protótipo é formado por 96 tiristores ligados em antiparalelo, agrupados em conjuntos de 8, formando 12 chaves estáticas, as quais são ligadas em uma configuração de *ponte H*. Para o acionamento dos tiristores são utilizados 12 transformadores de pulso com cinco secundários com nível de isolamento

de 15kV. Transformador de pulso originou uma dissertação de Mestrado, devido ao nível de pesquisa e dedicação necessário ao seu desenvolvimento [41].

Em relação às adaptações necessárias ao desenvolvimento do protótipo, foi indispensável a montagem de uma subestação elevadora e abaixadora, a qual possibilitou os ensaios e a operação do regulador dentro de um nível de segurança adequado.

## 6.1 Montagem da bancada experimental

A bancada experimental é composta pelo RT e um conjunto que simula o alimentador e o consumidor. O alimentador é constituído por um transformador de distribuição ligado como elevador. Em seu primário utiliza-se um *variatic* para controlar a amplitude da tensão de entrada. Na saída do transformador elevador está ligado o Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de *Tap's*. A saída do regulador de tensão está ligada a um transformador de distribuição abaixador, o qual tem em seu secundário a ligação da carga – Figura 6.1.



**Figura 6.1 - Bancada experimental.**

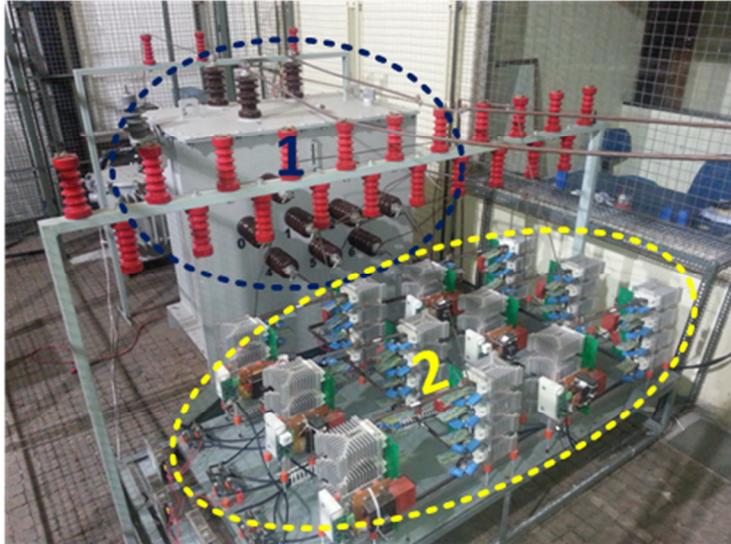


Figura 6.2 - Fotografia do protótipo do RT.

Nas Figura 6.2 e Figura 6.3 é apresentada a bancada de teste composta pelo comutador eletrônico de *Tap's* (chaves estáticas, 2), transformadores de elevação (3), abaixadores (4) e autotransformador (1) do RT.

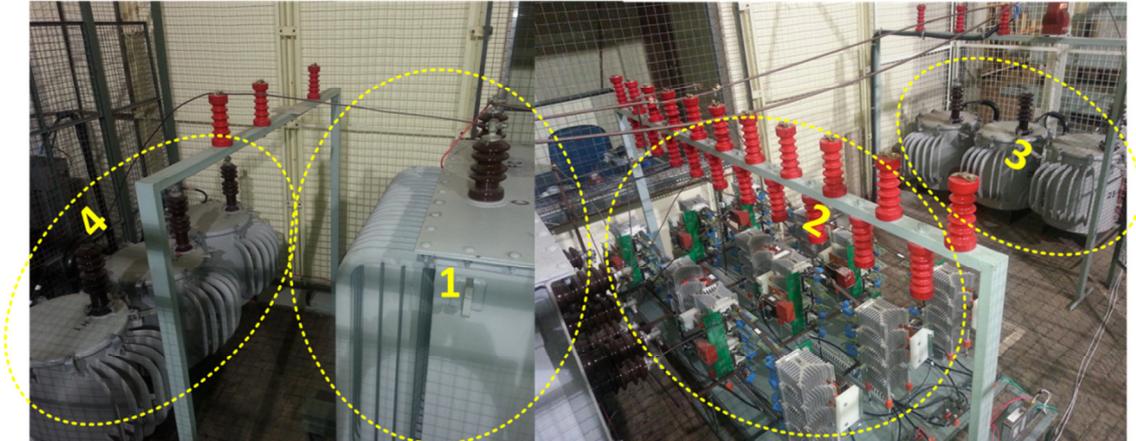


Figura 6.3 – Bancada de teste e protótipo de RT.

## 6.2 Autotransformador

O autotransformador foi construído pela Indústria de Transformadores Birigui Ltda. (ITB), sendo constituído por duas bobinas de regulação e uma de excitação, as quais podem ser acessadas via buchas com isolamento de 15kV. As vistas frontal, lateral e superior do autotransformador estão dispostas nas Figura 6.4 e Figura 6.5.

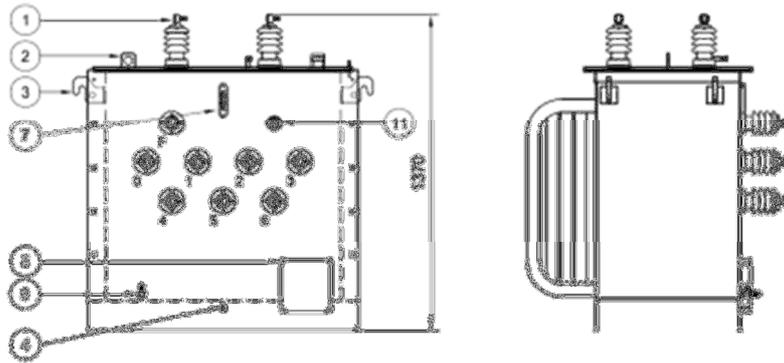
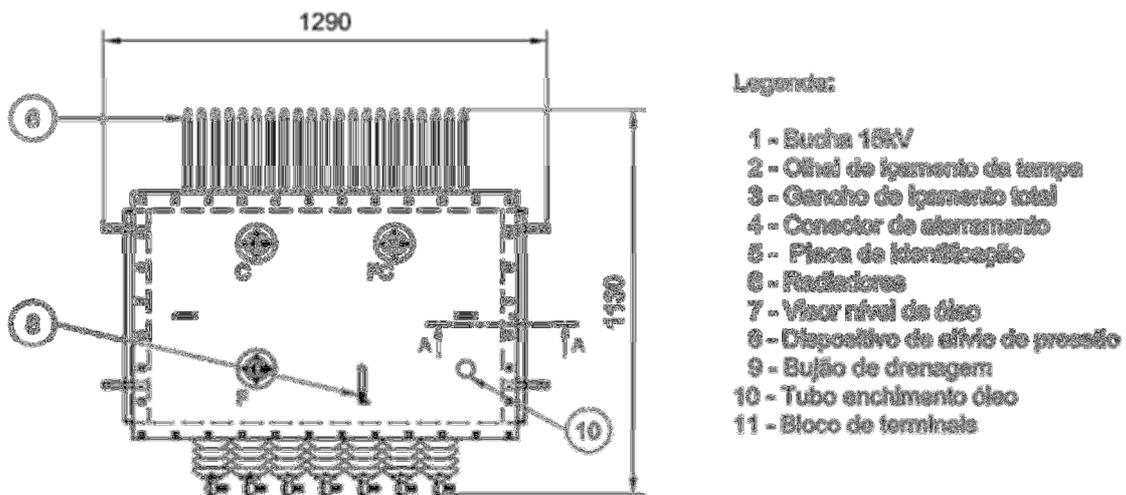


Figura 6.4 – Vista frontal e lateral do autotransformador.



Legenda:

- 1 - Bucha 15kV
- 2 - Orelha de içamento da tampa
- 3 - Gancho de içamento total
- 4 - Conector de alimentação
- 5 - Placa de identificação
- 6 - Radiadores
- 7 - Visor nível de óleo
- 8 - Dispositivo de alívio de pressão
- 9 - Bujão de drenagem
- 10 - Tubo enchimento óleo
- 11 - Bloco de terminais

Figura 6.5 – Vista superior do autotransformador.

Os enrolamentos de regulação e a bobina de excitação podem ser acessados via buchas frontais – Figura 6.4. A Figura 6.6 mostra o arranjo esquemático das bobinas de regulação e sua disposição dentro da bancada experimental. Na bobina de regulação 1, buchas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, pode-se localizar as derivações de 0,5% e 1%; nesse caso o  $T_1 = 0,5\%$  e  $T_2 = 1\%$ . Por sua vez, as buchas 7, 8, 9, 10, 11 e 12 dão acesso à bobina de regulação 2 com derivações de 2,5% ( $T_5$ ) e 6% ( $T_{12}$ ). As funções de ganho nessa configuração topológica são:  $\varphi(1,1) = 1$  e  $\varphi(1,2) = 2$ , na bobina 1 e  $\varphi(2,1) = 5$  e  $\varphi(2,2) = 12$ , para a bobina 2.

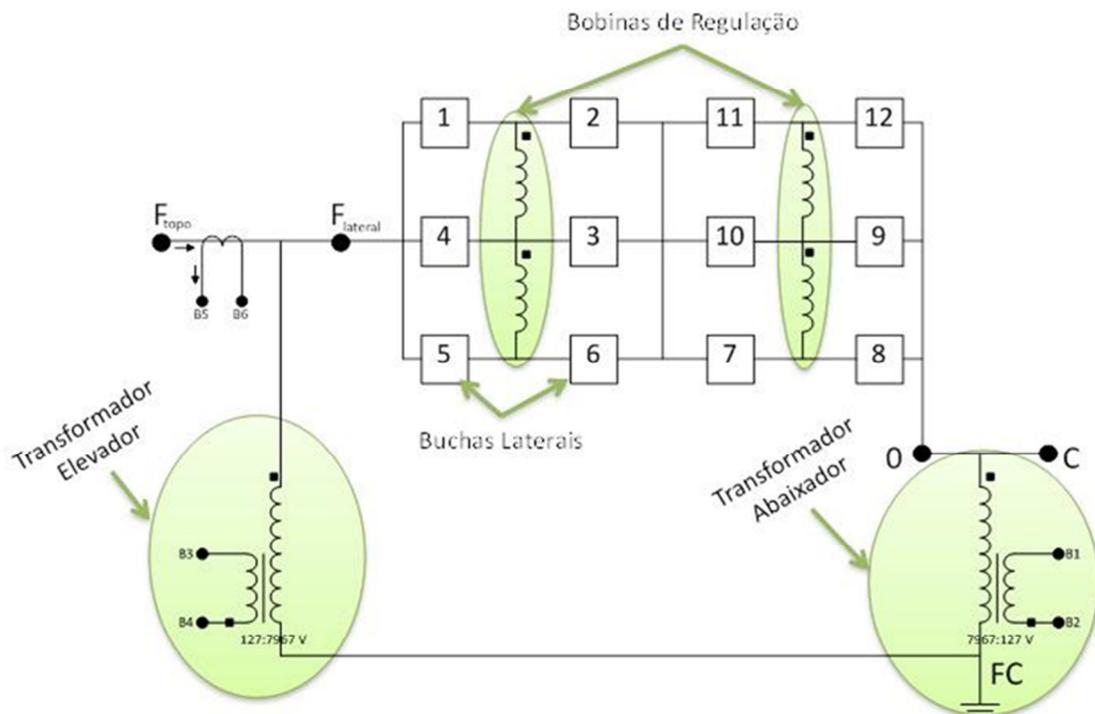


Figura 6.6 - Vista esquemática da ligação do autotransformador na bancada de teste.

### 6.3 Circuitos de instrumentação e controle

A estratégia de controle do regulador de tensão foi codificada em um DSP (Processador Digital de Sinais), da *Texas Instruments*, denominado TMS320F28335. Esse MCU é responsável por: digitalizar as variáveis de controle (Tensão e Corrente), garantir o sincronismo via PLL e efetuar o cálculo do *Tap* que proverá a parcela de compensação, de tal forma que *V<sub>reg</sub>* seja o mais próximo possível da tensão de referência. O DSP também é responsável por acionar a sequência de chaves que formam o *Tap* calculado.

A Figura 6.7 apresenta o sistema de instrumentação e controle: onde 1 é O DSP + EMULADOR/GRAVADOR; 2 são as placas de medição de corrente e tensão, as quais recebem seus sinais de tensão e corrente, respectivamente; 3 é formado por placas com emissores de luz e as fibras ópticas responsáveis por levar os sinais de comando até os circuitos *gate drivers*; e a região 4 tem por função o condicionamento dos sinais

medidos pelas placas de tensão e corrente (item 2), a fim de adequá-los à faixa dinâmica do conversor analógico digital incorporado no DSP.

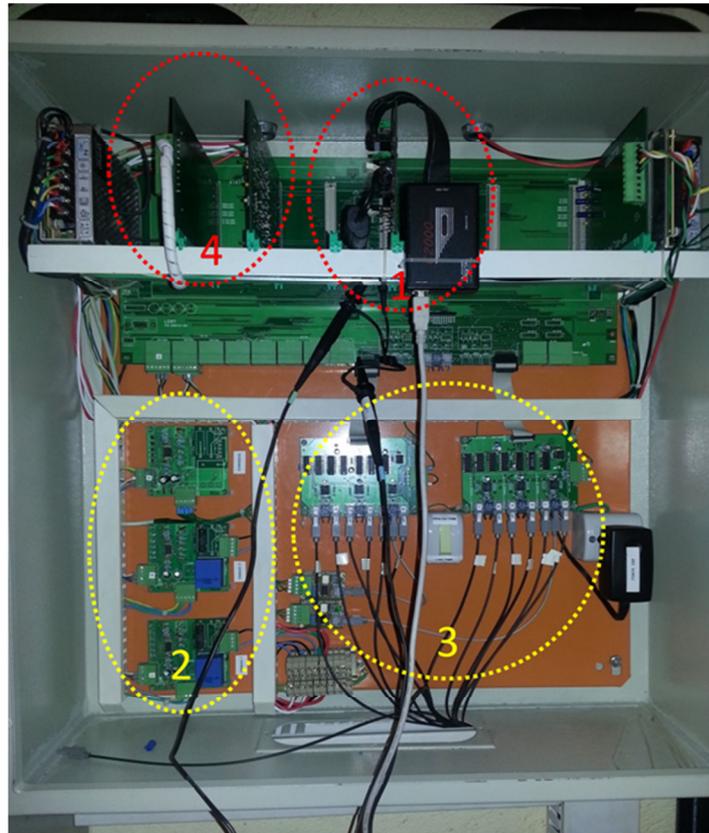


Figura 6.7 - Sistema de instrumentação e controle RT

## 6.4 Chave estática

O comutador eletrônico de *Tap's* é composto por 12 chaves estáticas. Nessa subseção serão apresentados os aspectos construtivos e operacionais relacionados a esse dispositivo. A Figura 6.8 apresenta a localização das chaves estáticas no RT. Nessa Figura pode ser verificado que cada chave é composta por um total de oito tiristores do tipo SCR. A ligação em antiparalelo dos tiristores garante a condução de corrente em ambos os sentidos. Por sua vez, a conexão em série permite que a tensão suportada pelo conjunto seja 4 vezes maior que a suportada por um tiristor individual. O tiristor utilizado na montagem da chave estática é SKKT162E18, capaz de suportar 1800V e 110A [40]. Dessa forma, a chave estática é capaz de suportar 7200V.

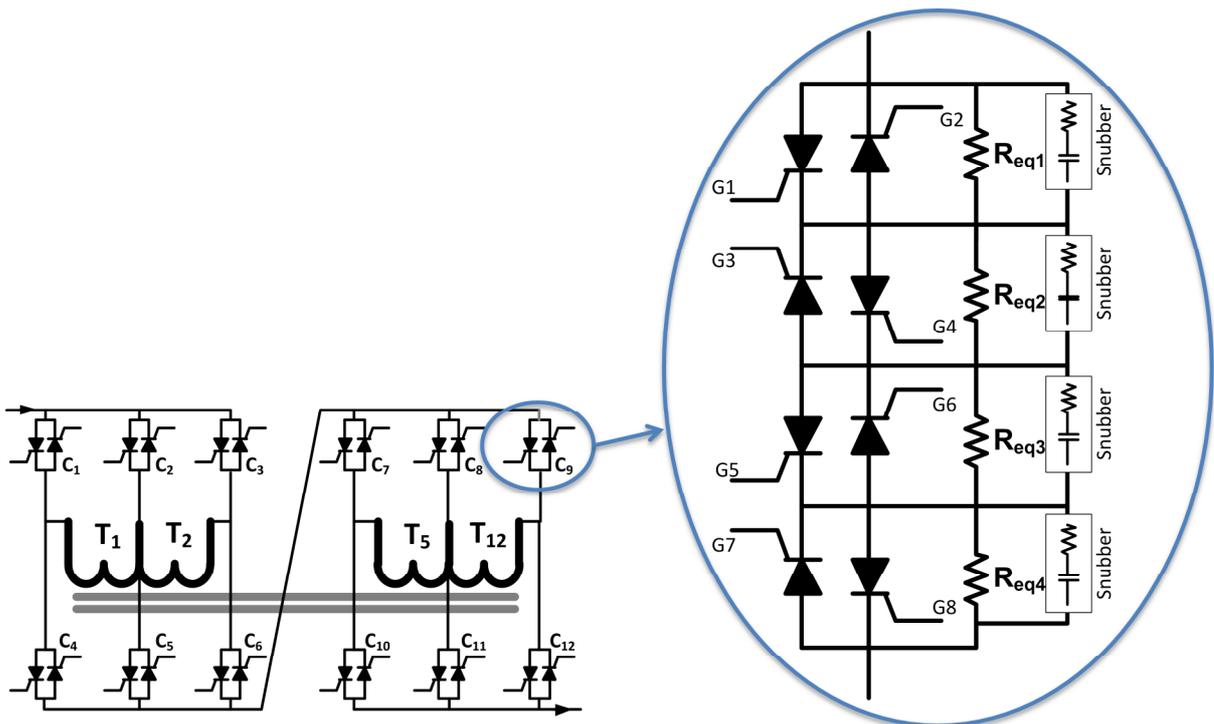
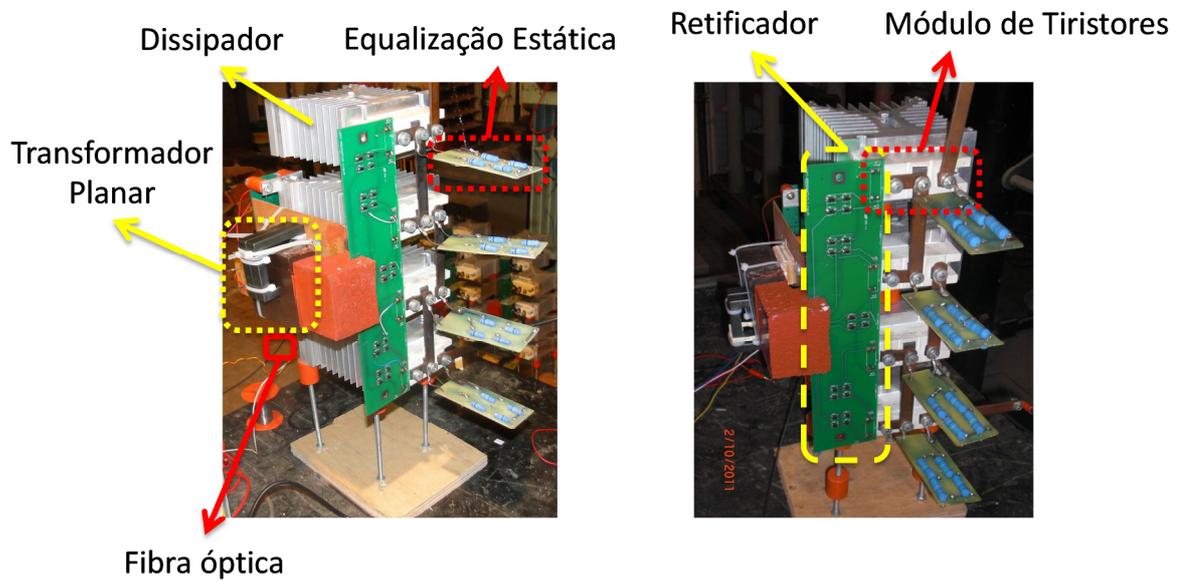


Figura 6.8 - Configuração da chave estática utilizada no protótipo do RT.

Quando tiristores são associados em série faz-se necessária a utilização de resistores de equalização ( $R_{eq}$ ) para garantir a divisão uniforme da tensão entre todas as chaves. Para o circuito de resistores ligados em paralelo com os tiristores dá-se o nome de rede de equalização estática. A determinação do  $R_{eq}$  toma como base a resistência interna do tiristor no estado de bloqueio. Essa resistência varia com a temperatura. Uma metodologia para a determinação da resistência interna do tiristor, de forma experimental, e seu emprego para a realização do cálculo da resistência de equalização, foi desenvolvido no Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão (LEMT). Essa metodologia foi documentada no Trabalho de Conclusão de Curso de Netto, E. E. S. [42]. Também se deve observar que cada tiristor está em paralelo com um snubber. Esse circuito é responsável por amortecer as variações bruscas de tensão que podem surgir devido a indutâncias parasitas, indutâncias de dispersão e da própria carga que o

RT alimenta. O objetivo do snubber, nesse caso, é de garantir que a taxa de crescimento de tensão não ultrapasse  $1kV/\mu s$  [40].



**Figura 6.9 - Chave estática do RT.**

Na Figura 6.9 é mostrada uma das chaves estáticas construídas para compor o Comutador Eletrônico de *Tap's*. A fibra óptica é responsável por trazer os sinais de controle do DSP até o circuito que aciona o Transformador Planar (Transformador de Pulso). Os dissipadores são utilizados para garantir que a temperatura máxima da junção não seja ultrapassada; nesse caso  $125^{\circ}C$  [40]. Isso é conseguido pela redução da resistência térmica entre o ar e o case do SKKT162E18.

## 6.5 Troca de *Tap's*

Os testes experimentais do Regulador de Tensão com topologia S-DVR operando com excitação variável tem, inicialmente, o objetivo de promover a excursão dos *tap's*, validação da estratégia de controle e sincronismos. Para isso, a referência foi fixada em 7967V e a tensão de entrada ( $V_{i^*}$ ) é modificada de forma manual dentro do

software de controle, utilizando uma estrutura algébrica mostrada na (6.1). Na bancada utilizou-se uma carga resistiva de  $7,5\Omega$  no lado de baixa tensão (após o transformador abaixador – Figura 6.1).

$$Tap = \frac{7967 - V_i^*}{0,005 \cdot V_i^*} \quad (6.1)$$

Os testes que geram os dados mostrados na Figura 6.10 são referentes às medições realizadas no lado de baixa tensão do transformador elevador, por isso, para encontrar a tensão expressa nos gráficos, será necessário dividi-la pela relação de transformação 220/7967.

Na Figura 6.10 (a) o RT trocou do *tap* 0 para o *tap* 3. Isso é conseguido modificando a tensão de entrada no software para 7850V. A real tensão de entrada está em 7967V (220V, onda amarela). A onda em roxo equivale à corrente. Pode-se verificar uma pequena descontinuidade na hora da troca de *taps* (degrau em azul), a qual é análoga ao tempo morto. Por sua vez, a Figura 6.10 (b) mostra o instante de troca do *tap* 0 para o *tap* 12. Nesse caso a tensão de entrada foi alterada para 7500V.

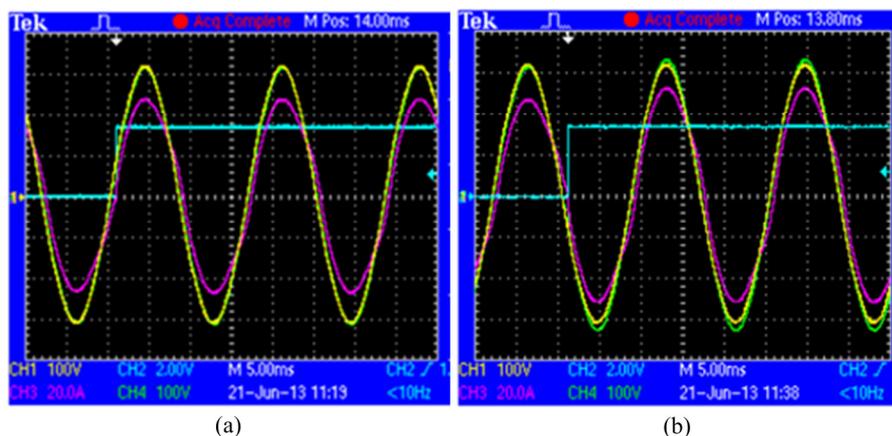


Figura 6.10 - Formas de onda das tensões e correntes para mudanças dos *tap* 0 para *tap* 3 (a) e do *tap* 0 para *tap* 12 (b).

## 6.6 Operação do Regulador de Tensão com Excitação Variável

A seguir serão apresentadas as formas de onda referentes ao regulador operando com excitação variável e controle automático de tensão. Inicialmente será verificada a capacidade de operação com carga puramente resistiva; após isso, será observado o desempenho do regulador de tensão operando com carga indutiva. Os experimentos visam a determinar a capacidade de regulação do RT. Objetiva-se conferir o desempenho operacional ao longo da faixa dinâmica do equipamento.

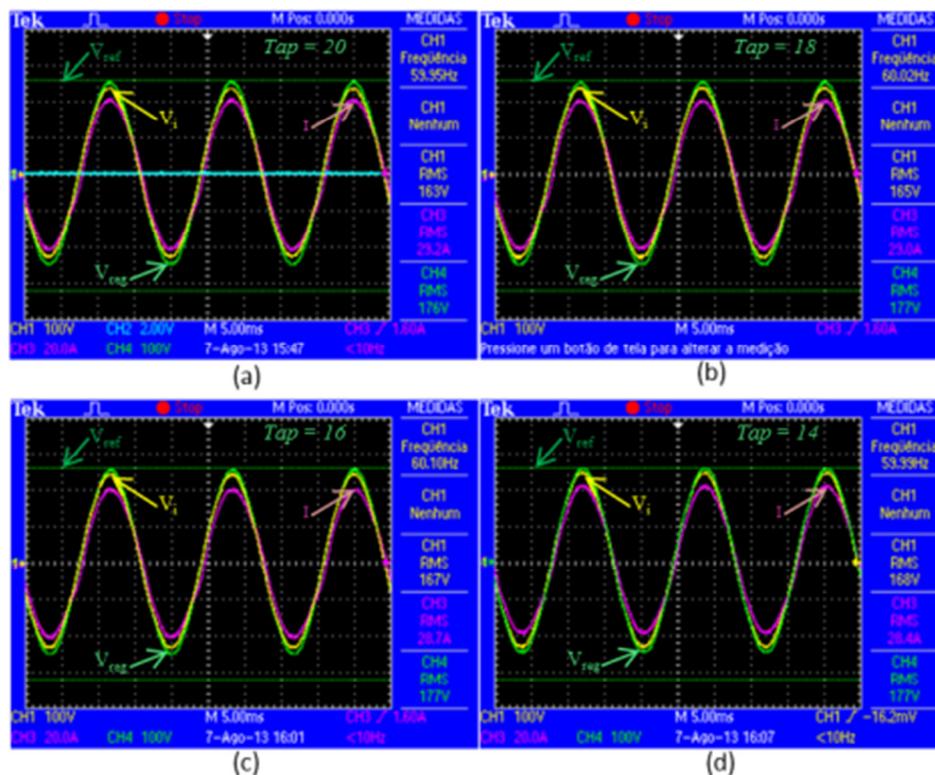
Nas oscilografias pode-se identificar a tensão de entrada (amarela), a tensão de saída compensada (verde) e a corrente no circuito (roxo). Vale ressaltar que a referência de tensão no lado BT é de aproximadamente  $177\text{ Vrms}$  (6409,8V no lado de alta) e que a relação de transformação do transformador elevador e abaixador é de 220/7967 V.

## 6.7 Teste com carga resistiva

As formas de ondas mostradas a seguir são referentes à operação do RT em excitação variável, com carga resistiva de 7,5 ohms no lado de baixa tensão. Como as tensões foram medidas no lado de baixa tensão, podem ser encontrados alguns erros referentes ao valor indicado nas medidas eficazes, seja nas sondas de tensão utilizadas, seja em pequenos desvios na relação de transformação dos transformadores da bancada de teste, além de erros de calibração. A tensão de entrada ( $V_i$ ) está sendo medida no lado de baixa, após o *variac* e antes do transformador elevador (Figura 6.1). A corrente mostrada nos gráficos ( $I$ ) também está sendo medida no mesmo nó de  $V_i$ . A tensão de saída ou  $V_{reg}$  está sendo medida depois do transformador abaixador e antes da carga (Figura 6.1). Por fim,  $V_{ref}$  foi fixada como um patamar para possibilitar a comparação,

de forma gráfica, da tensão de saída regulada e do valor de referência adotado no controle de tensão.

Na Figura 6.11 é apresentado o desempenho do RT compensando afundamentos de tensão de 163V, 165V, 167V e 168V, os quais resultaram no acionamento dos *tap's* 20, 18, 16 e 14. A tensão foi regulada igual ao valor de referência. A única exceção está mostrada na Figura 6.11, na qual a tensão de saída ficou em 176V. Isso equivale a um erro de 1,22 divisões do RT, porém se deve observar que a histerese do controle está em  $\pm 1$  divisão e, portanto, o erro de regulação pode ser considerado 0,22%.



**Figura 6.11 – Tensão de entrada (amarela), tensão de saída compensada (verde) e corrente (roxo) para os *taps* 20, 18, 16 e 14.**

Tomando como base os valores de  $V_i$  apresentados na Figura 6.11, pode-se inferir os valores expostos na Tabela 6, na qual a coluna Entrada AT estimada se refere à obtenção da  $V_i$  no lado de alta utilizando a “Entrada BT” e a relação de transformação. Com base nisso, pode-se calcular o *Tap* (Tap estimado) necessário para

compensar o afundamento. Também são obtidos dessa forma a Saída BT e a Saída AT estimadas.

**Tabela 6 – Estimação de valores com base na tensão de entrada em BT**

<b>Entrada BT (medida)</b>	<b>Entrada AT (estimada)</b>	<b>Tap (estimado)</b>	<b>Saída BT (estimada)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>
163	5902,822727	17	176,855	6404,562659
165	5975,25	15	177,375	6423,39375
167	6047,677273	12	177,02	6410,537909
168	6083,890909	11	177,24	6418,504909

Utilizando os valores de tensão regulada medidos e o *Tap* assumido pelo regulador (Figura 6.11), pode-se estimar qual seria a tensão de entrada. Comparando a tensão de entrada medida – Tabela 6 – com o valor de entrada estimado – Tabela 7 – obtém-se um erro médio de 2,826307V, com um desvio padrão de 0,269V. O erro médio em degraus de regulação é de 3,19 divisões do regulador, porém a incerteza na faixa dinâmica do RT está em  $\pm 1$  divisão, de tal forma que o erro considerado deve ser de 2,19 divisões. Como o desvio padrão é baixo, pode-se afirmar que não existe uma dispersão dos erros de regulação, ou seja, o regulador de tensão nessas condições apresenta uma elevada precisão, e o problema relacionado à exatidão pode ser reduzido por uma sucessiva rodada de calibrações, podendo chegar a um erro de  $\pm 1$  divisão.

**Tabela 7 – Estimação de valores com base na tensão de saída em BT**

<b>Tap (medido)</b>	<b>Saída BT (medida)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>	<b>Entrada AT (Estimada)</b>	<b>Entrada BT (estimada)</b>
20	176	6373,6	5794,181818	160
18	177	6409,81364	5880,562969	162,3853211
16	177	6409,81364	5935,012626	163,8888889
14	177	6409,81364	5990,480034	165,4205607

Na Figura 6.12 é apresentado o desempenho do RT compensado afundamentos e sobretensões de 169, 170, 172, 174, 175, 178, 179 e 182, os quais resultaram no

acionamento dos *tap's* 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0, -2, respectivamente. Tomando como base os valores de  $V_i$  apresentados na Figura 6.12, podem-se inferir os valores expostos na Tabela 8, em que a coluna Entrada AT estimada se refere à obtenção da  $V_i$  no lado de alta utilizando a “Entrada BT” e a relação de transformação. Com base nisso, pode-se calcular o *Tap* (Tap estimado) necessário para compensar o afundamento. Também são obtidos, dessa forma, a Saída BT e a Saída AT estimadas.

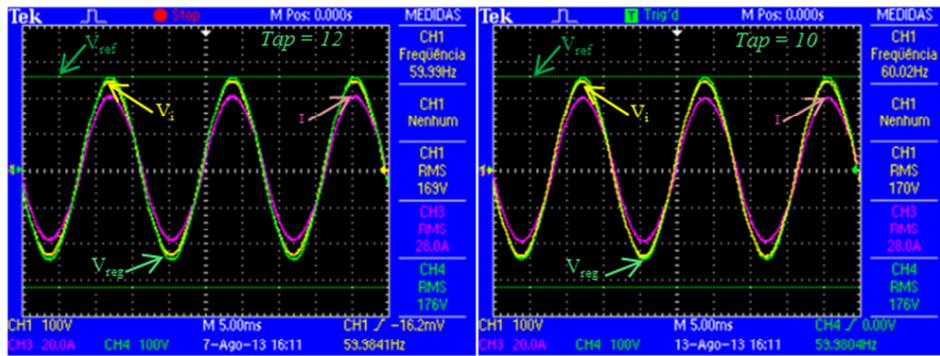
**Tabela 8 - Estimação de valores com base na tensão de entrada em BT.**

<b>Entrada BT (medida)</b>	<b>Entrada AT (estimada)</b>	<b>Tap (estimado)</b>	<b>Saída BT (estimada)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>
169	6120,10455	9	176,605	6395,50925
170	6156,31818	8	176,8	6402,57091
172	6228,74545	6	177,16	6415,60782
174	6301,17273	3	176,61	6395,69032
175	6337,38636	2	176,75	6400,76023
178	6446,02727	-1	177,11	6413,79714
179	6482,24091	-2	177,21	6417,4185
182	6590,88182	-5	177,45	6426,10977

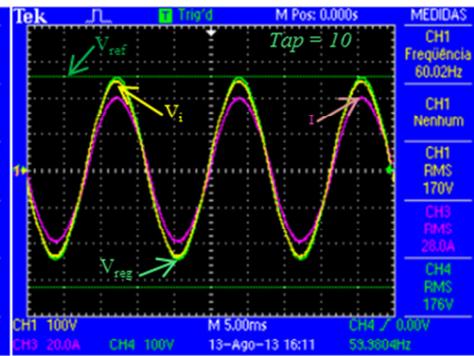
Utilizando os valores de tensão regulada que foram medidos, e o *Tap* assumido pelo regulador (Figura 6.12), pode-se estimar qual seria a tensão de entrada – Tabela 9. Comparando a tensão de entrada (medida) – Tabela 8 – com o valor de entrada estimado – Tabela 9 – obtém-se um erro médio de 2,70678V, com um desvio padrão de 0,40948V. O erro médio em degraus de regulação é de 3,06 divisões do regulador, porém a incerteza na faixa dinâmica do regulador está em  $\pm 1$  divisão, de tal forma que o erro considerado deve ser de 2,06 divisões. Como o desvio padrão é baixo pode-se afirmar que não existe uma dispersão dos erros de regulação, ou seja, o regulador de tensão nessas condições apresenta uma elevada precisão, e o problema relacionado à exatidão pode ser reduzido pela calibração do sistema e, dessa forma, o erro fica em  $\pm 1$  divisão.

**Tabela 9 - Estimação de valores com base na tensão de saída em BT e o Tap medido.**

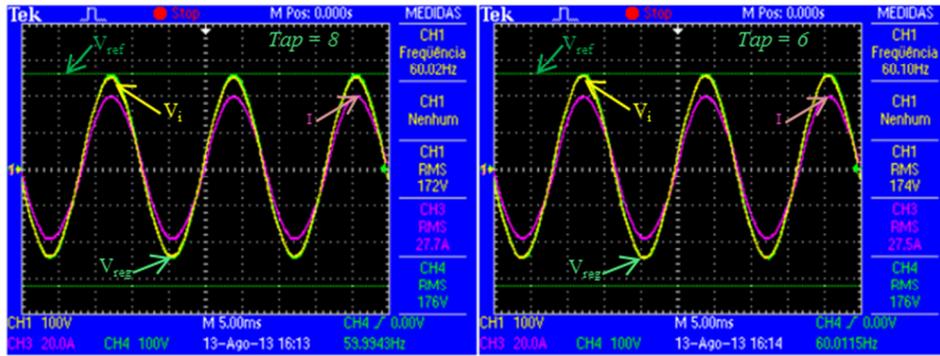
<b>Tap (medido)</b>	<b>Saída BT (medida)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>	<b>Entrada AT (Estimada)</b>	<b>Entrada BT (estimada)</b>
12	176	6373,6	6012,83019	166,037736
10	176	6373,6	6070,09524	167,619048
8	176	6373,6	6128,46154	169,230769
6	176	6373,6	6187,96117	170,873786
4	176	6373,6	6248,62745	172,54902
2	177	6409,8136	6346,35014	175,247525
0	177	6409,8136	6409,81364	177
-2	177	6409,8136	6474,55923	178,787879



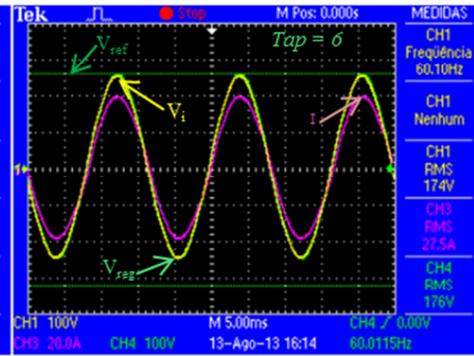
(a)



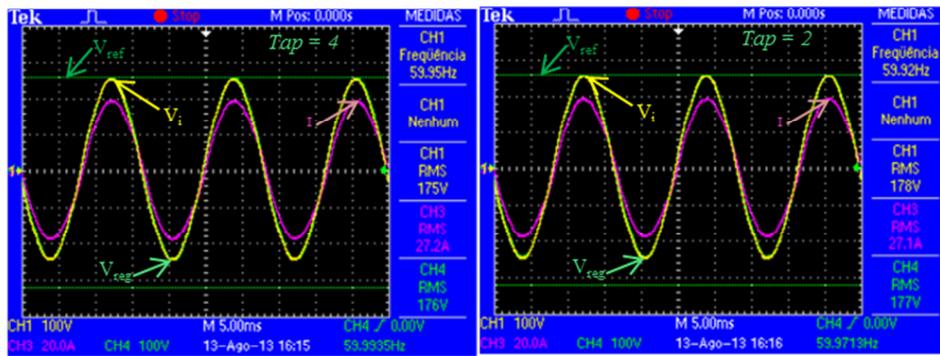
(b)



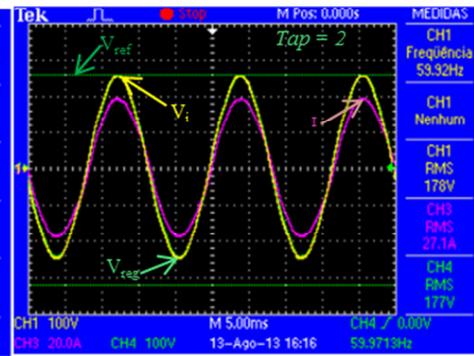
(c)



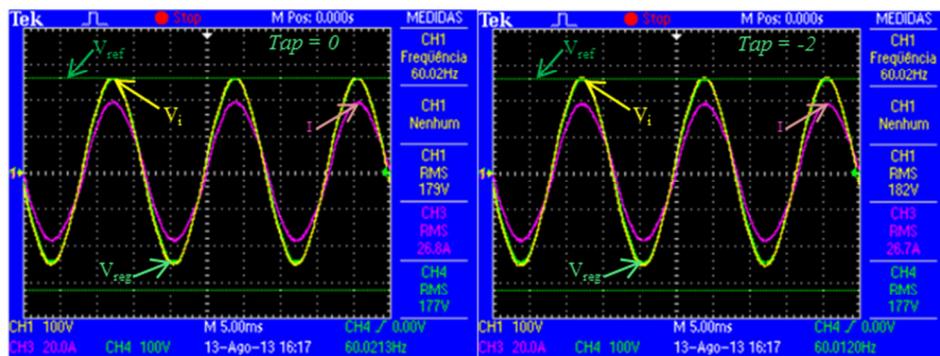
(d)



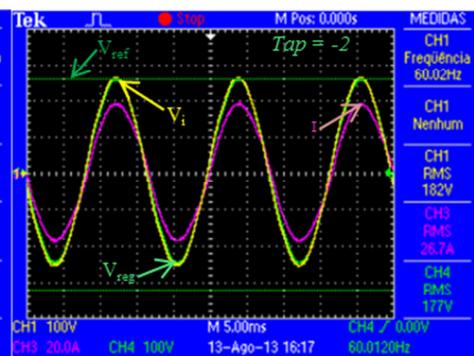
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 6.12 - Tensão de entrada (amarela), tensão de saída compensada (verde) e corrente (roxo) para os taps 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0, -2.

Nas Figura 6.13 e Figura 6.14 é apresentado o desempenho do RT compensando sobretensões de 184, 186, 188, 189, 192, 194, 196, 198 e 200, as quais resultaram no acionamento dos *tap's* -4, -6, -8, -10, -12, -14, -16, -18 e -20. Tomando como base os valores de  $V_i$  apresentados nas Figura 6.13 e Figura 6.14, pode-se inferir os valores expostos na Tabela 10, na qual a coluna Entrada AT estimada se refere à obtenção da  $V_i$  no lado de alta utilizando a “Entrada BT” e a relação de transformação. Com base nisso, pode-se calcular o *Tap* (Tap estimado) necessário para compensar o afundamento. Também são obtidos, dessa forma, a Saída BT e a Saída AT estimadas.

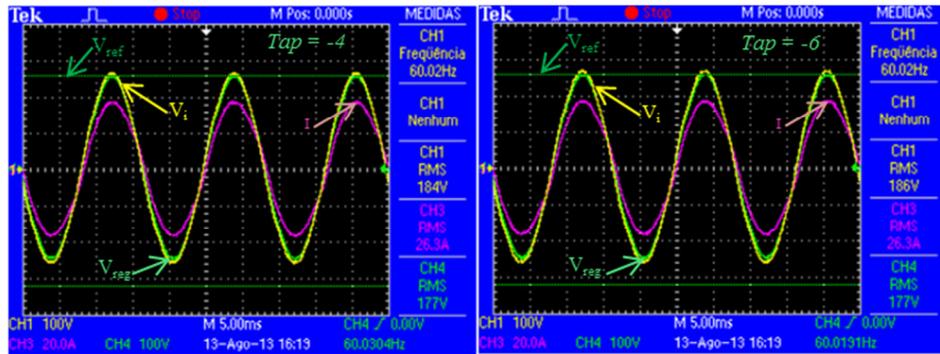
**Tabela 10 – Estimação de valores com base na tensão de entrada em BT**

<b>Entrada BT (medida)</b>	<b>Entrada AT (estimada)</b>	<b>Tap (estimado)</b>	<b>Saída BT (estimada)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>
184	6663,309091	-8	176,64	6396,776727
186	6735,736364	-10	176,7	6398,949545
188	6808,163636	-12	176,72	6399,673818
189	6844,377273	-13	176,715	6399,49275
192	6953,018182	-16	176,64	6396,776727
194	7025,445455	-18	176,54	6393,155364
196	7097,872727	-19	177,38	6423,574818
198	7170,3	-20	178,2	6453,27
200	7242,727273	-20	180	6518,454545

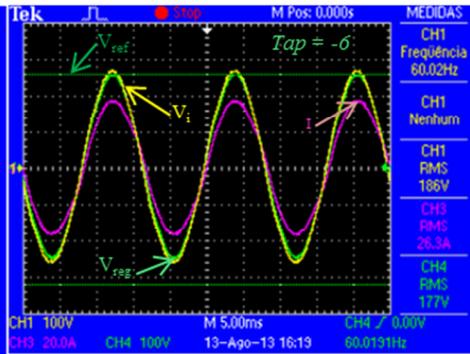
Para a estimação da tensão de entrada (Tabela 11) são utilizados os valores de tensão regulada medidos e o *Tap* assumido pelo regulador (Figura 6.13). Comparando a tensão de entrada medida – Tabela 10 – com valor de entrada estimado – Tabela 11 –, obtém-se um erro médio de 2,72901V com um desvio padrão de 0,43693V. O erro médio em degraus de regulação é 3,08 divisões do regulador, porém a incerteza na faixa dinâmica do regulador está em  $\pm 1$  divisões, de tal forma que o erro considerado deve ser de 2,08 divisões. Novamente pode-se perceber que a dispersão dos erros de regulação é baixa, ou seja, o regulador de tensão apresenta uma elevada precisão.

**Tabela 11 - Estimação de valores com base na tensão de saída em BT e o Tap medido.**

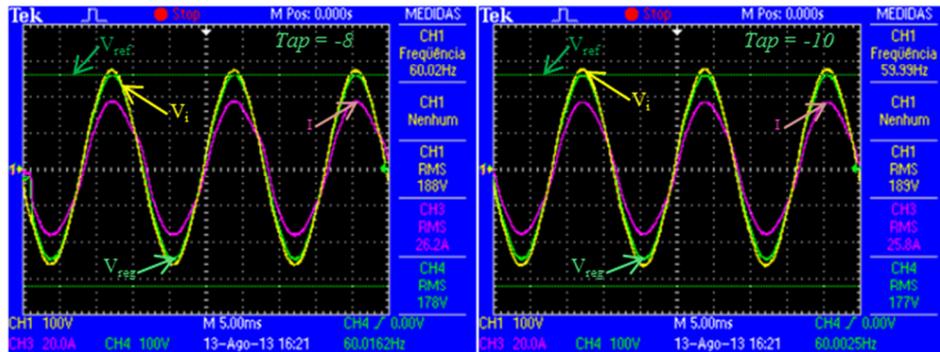
<b>Tap (medido)</b>	<b>Saída BT (medida)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>	<b>Entrada AT (Estimada)</b>	<b>Entrada BT (estimada)</b>
-4	177	6409,8136	6540,62616	180,612245
-6	177	6409,8136	6608,0553	182,474227
-8	178	6446,0273	6714,61174	185,416667
-10	177	6409,8136	6747,17225	186,315789
-12	178	6446,0273	6857,47582	189,361702
-14	178	6446,0273	6931,21212	191,397849
-16	178	6446,0273	7006,55138	193,478261
-18	178	6446,0273	7083,54645	195,604396
-20	178	6446,0273	7162,25253	197,777778



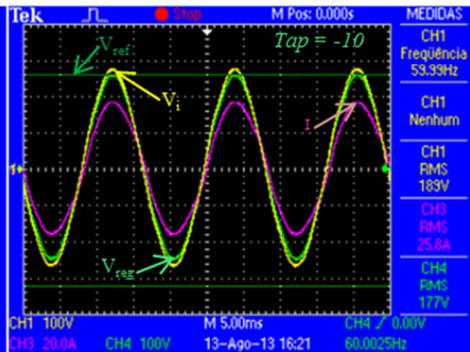
(a)



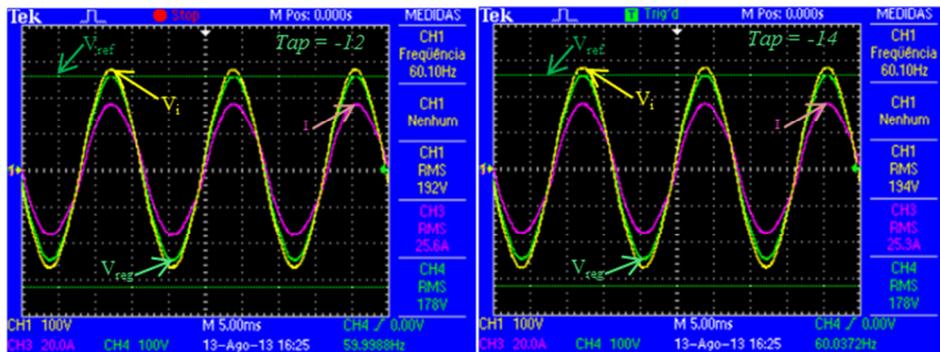
(b)



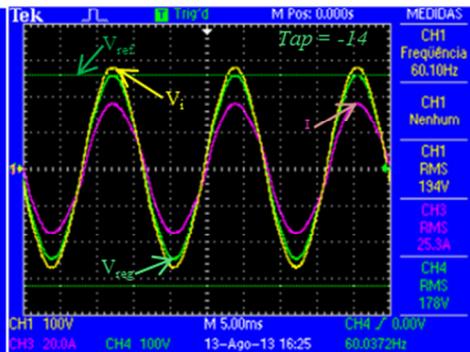
(c)



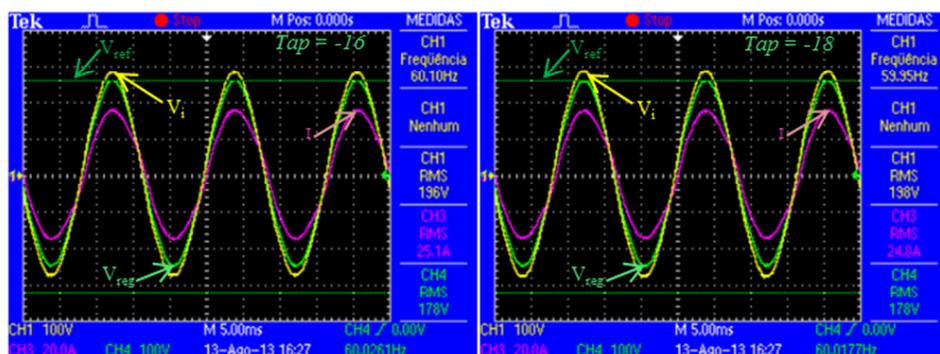
(d)



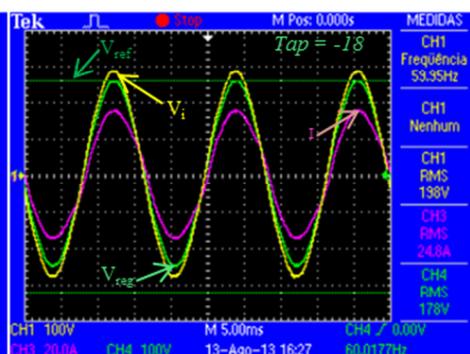
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 6.13 - Tensão de entrada (amarela), tensão de saída compensada (verde) e corrente (roxo) para os taps  $-4$ ,  $-6$ ,  $-8$ ,  $-10$ ,  $-12$ ,  $-14$ ,  $-16$  e  $-18$ .

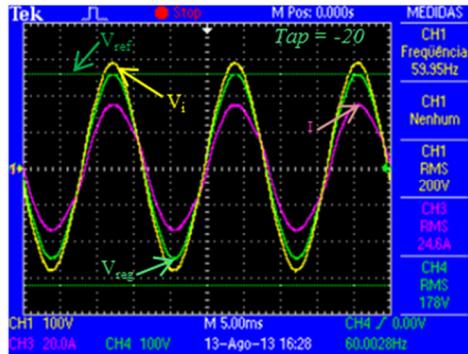
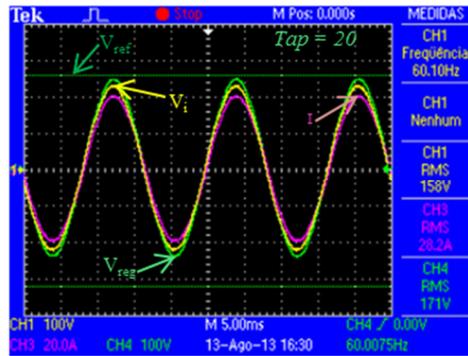


Figura 6.14 - Tensão de entrada (amarela), tensão de saída compensada (verde) e corrente (roxo) para o tap -20.

## 6.8 Compensação fora da Faixa Dinâmica do Equipamento

A seguir serão apresentados dois casos do RT operando com um afundamento (Figura 6.15) e uma sobretensão (Figura 6.16), fora dos limites de compensação. Na Figura 6.15, uma tensão de entrada de 5629,57V produz uma saída de 171V, ou seja, 6192,53V. Para compensar um afundamento de 5721,75V seria necessário 24 tap's, porém o regulador está limitado a 20 tap's. Dessa forma, a tensão de saída fica 217V abaixo da tensão de referência ( $V_{ref} = 6409,81V$ ). No capítulo que trata da simulação foi feita uma análise –Figura 5.8– na qual o RT opera fora de sua região de compensação. São adotadas as recomendações do Prodist em seu módulo 8 para verificar as contribuições do RT nessa situação. A tensão de entrada está com um afundamento de 12%, podendo ser considerado crítico – Tabela 5 – porém na saída do RT verifica-se uma tensão com um afundamento de 3%, ou seja, que pode ser considerado *Adequada* [39].

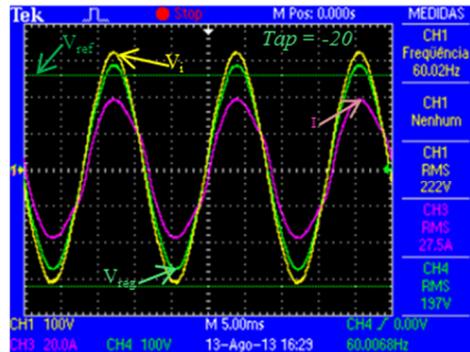


**Figura 6.15 - Tensão de entrada (amarela), tensão de saída compensada (verde) e corrente (roxo) para o tap 20, abaixo do limite de compensação.**

A Figura 6.15 mostra o RT operando fora de sua região de compensação (Figura 4.3). Ficam evidentes as previsões do modelo teórico acerca da perda na capacidade de compensação (ver página 75). Tomando como base o fato do RT não ter compensado 10% do afundamento e sim 9%, uma vez que a tensão de saída está afundada em 3% ao invés de 2%, pode-se evidenciar o fenômeno relacionado à Perda da Capacidade de Compensação. Também cabe ressaltar que tal resultado corrobora com as simulações relativas à sensibilidade do RT em relação a  $V_i$ , quando opera em excitação variável, conforme pode ser verificado em *Análise da sensibilidade dos valores de tensão dos Taps Reais no modo excitação variável* (página 131).

Na Figura 6.16 é possível observar que a tensão compensada ultrapassou o patamar da tensão de referência ( $V_{ref}$ ). Isso ocorre porque o limite de compensação do equipamento foi excedido:  $V_i$  maior que 7162V ou 197V em BT. Nessa situação seria necessária uma capacidade de compensação de -20,5% ou seja -41 graus. Como o regulador está limitado a -20 graus de 0,005%, a capacidade do regulador foi ultrapassada, e o sistema ficou submetido a uma sobretensão de 11,29%, ou seja, nível crítico [39]. A tensão de entrada está com uma sobretensão de 24%. Como o regulador tem uma capacidade de compensação de 10%, a tensão de saída apresentaria uma

sobretensão de 14%, porém os RTs trabalhando em excitação variável têm uma capacidade maior de compensar sobretensão do que afundamento (fenômeno relacionado ao Ganho na Capacidade de Compensação – ver páginas 75 e 100). Dessa forma, o ganho de compensação chega a 2,71%, ou seja, ao invés da sobretensão na saída do RT estar em 14%, o RT apresenta em sua saída uma sobretensão de 11,29%.



**Figura 6.16 - Tensão de entrada (amarela), tensão de saída compensada (verde) e corrente (roxo) para o tap -20, acima do limite de compensação.**

A Figura 6.17 mostra o equipamento atuando na compensação de uma variação de tensão de curta duração (VTCD): a Figura 6.17 (a) apresenta o comportamento do RT para carga resistiva e a Figura 6.17 (b) exhibe o desempenho do RT para carga indutiva. No início, a tensão de entrada ( $V_i$ ) estava com um valor abaixo do limite suportado pelo equipamento; logo, o *tap* acionado foi o 20. Em um determinado momento, a tensão de entrada foi elevada de forma rápida, como pode ser visto no gráfico. Neste instante, a tensão de saída também se elevou, porém o equipamento atuou de forma a manter a tensão próxima do valor de referência ( $V_{ref}$ ), como pode ser visto no gráfico de cor verde ( $V_{reg}$ ). Este teste foi realizado tanto com carga resistiva quanto com carga indutiva, mostrando que o controle atuou, fazendo com que a tensão de saída convergisse para a tensão de referência,  $V_{ref}$ .

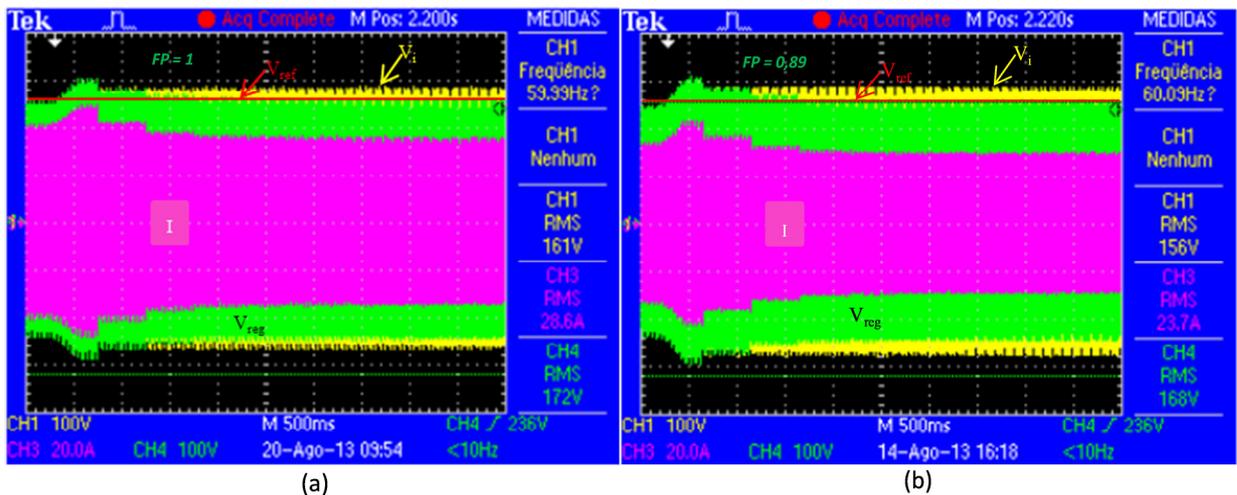


Figura 6.17 - Tensão de entrada (amarela), tensão de saída compensada (verde) e corrente (roxo) para um VTCD, (a) carga resistiva e (b) carga indutiva com FP=0,89.

## 6.9 Teste com carga Indutiva

As formas de onda a seguir são referentes à operação do RT em excitação variável e com controle automático de tensão. Esse experimento tem como objetivo verificar a capacidade de operação com carga indutiva. Os experimentos visam a determinar a capacidade de regulação do RT para afundamentos e sobretensões.

Nas oscilografias pode-se identificar a tensão de entrada (em cor amarela,  $V_i$ ), a tensão de saída compensada (em cor verde,  $V_{reg}$ ) e a corrente no circuito (em cor roxa,  $I$ ). Vale ressaltar que a referência de tensão no lado BT é de  $177 V_{rms}$  (6409,8V, em AT) e que a relação de transformação do transformador elevador e abaixador é de 220/7967 V. O teste do RT operando com carga indutiva foi realizado utilizando um indutor de 10mH em série com o resistor de 7,5 ohms. Dessa forma, o fator de potência da carga é de 0,89.

Na Figura 6.18 é apresentado o desempenho do RT compensando afundamentos de tensão de 163V, 165V, 166V, 169V, 170V, 172V, 173V e 175V, os quais resultaram

no acionamento dos *tap's* 19, 17, 15, 13, 11, 9, 7 e 5. A tensão regulada está abaixo do valor de referência. Isso se deve ao fato de a carga indutiva contribuir para afundar a tensão. Como o RT analisa a tensão de entrada ( $V_i$ ) para determinar o *Tap*, o impacto do fator potência indutivo não é levado em conta nas quedas produzidas nas impedâncias entre a entrada do RT e a carga.

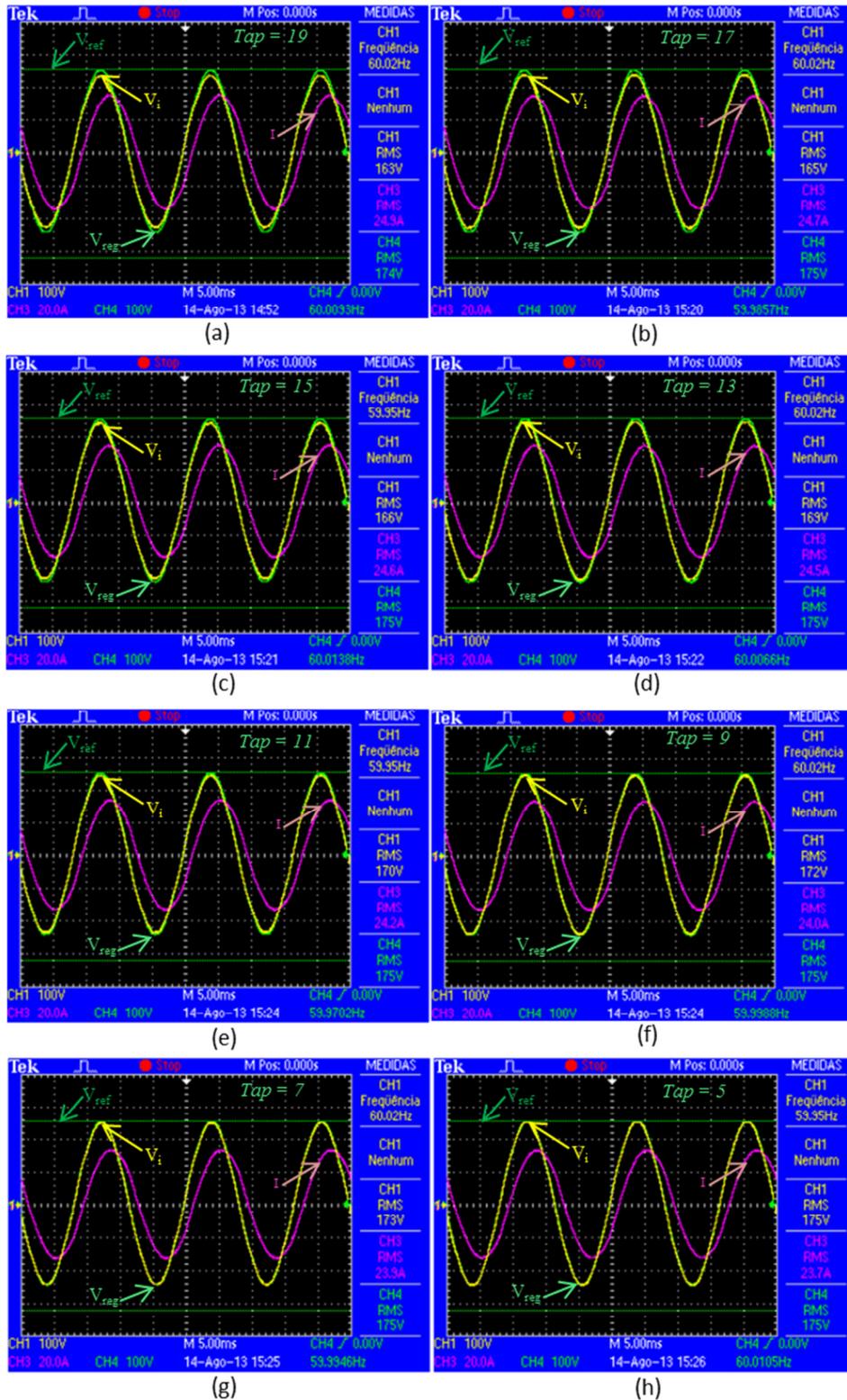


Figura 6.18 – Formas de onda do RT referentes a regulação de afundamentos de tensão de 163V, 165V, 166V, 169V, 170V, 172V, 173V e 175V.

Na Figura 6.18 é apresentado o desempenho do RT compensando afundamentos de tensão de 176V, 179V, 181V, 183V, 184V, 187V e 189V, os quais resultaram no acionamento dos *tap's* 3, 0, -1, -3, -5, -7 e -9. Na condição de afundamento leve e sobretensão, a  $V_{reg}$  segue a tensão de referência ( $V_{ref}$ ), considerando que os erros encontrados são devido à histerese imposta no controle. Essa mesma análise vale para os afundamentos e sobretensões da Figura 6.19 e Figura 6.20.

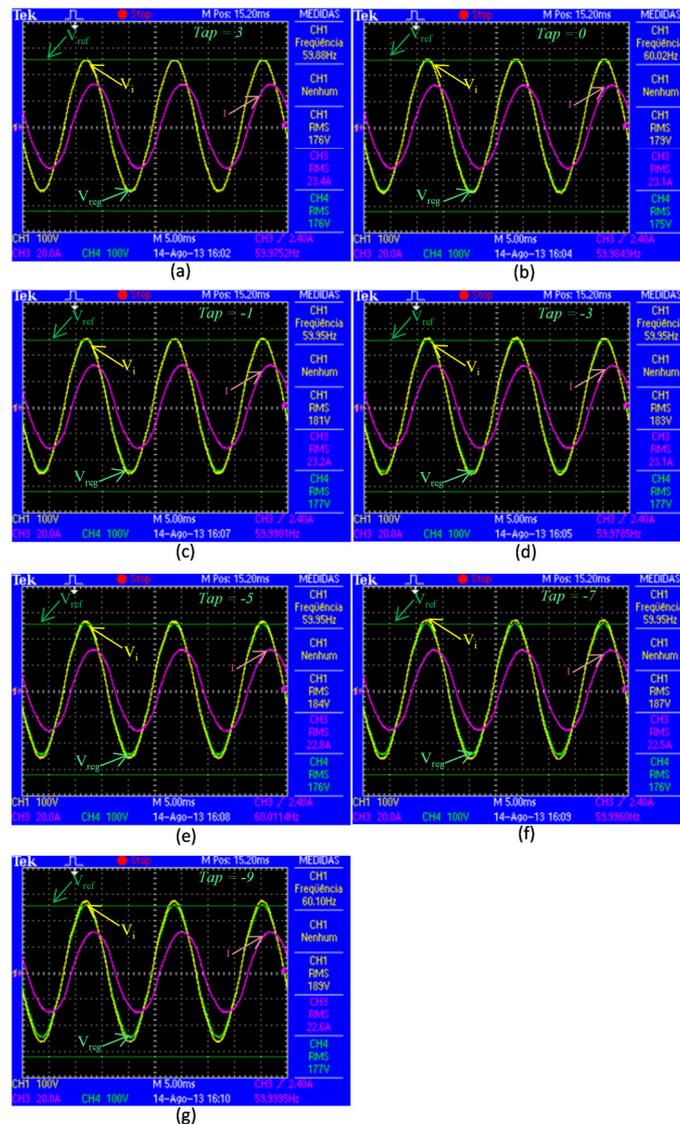


Figura 6.19 - Formas de onda do RT referente a regulação de afundamentos de tensão de 176V e sobretensões de 179V, 181V, 183V, 184V, 187V e 189V.

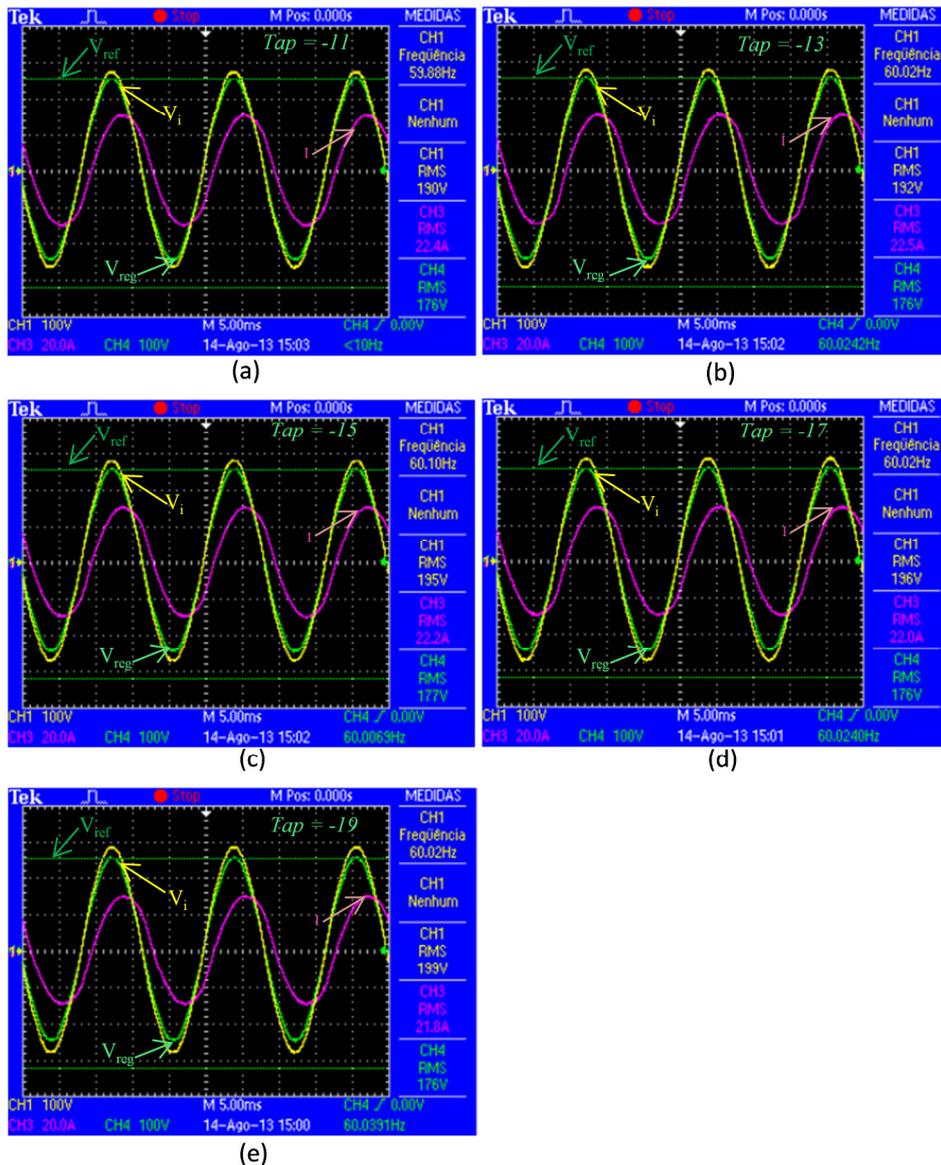


Figura 6.20 - Formas de onda do RT referentes a regulação de sobretensões de 190V, 192V, 195V, 196V e 199V.

Tomando como base os valores de  $V_i$  “Entrada BT (medida)”, apresentados nas Figura 6.18, Figura 6.19 e Figura 6.20, pode-se inferir os valores expostos na Tabela 12, onde a coluna “Entrada AT (estimada)” se refere à obtenção da  $V_i$  no lado de alta utilizando a “Entrada BT” e a relação de transformação. Com base nisso, pode-se calcular o  $Tap$  (Tap estimado) necessário para compensar o afundamento. Também são obtidas, dessa forma, a Saída BT e a Saída AT estimadas. Essa análise contribui para a

compreensão das quedas internas do aparato experimental, ou seja, após o ponto de medição da tensão de entrada.

**Tabela 12 – Estimação de valores com base na tensão de entrada em BT**

<b>Entrada BT (medida)</b>	<b>Entrada AT (estimada)</b>	<b>Tap (estimado)</b>	<b>Saída BT (estimada)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>
163	5902,822727	17	176,855	6404,562659
165	5975,25	15	177,375	6423,39375
166	6011,463636	13	176,79	6402,208773
169	6120,104545	9	176,605	6395,50925
170	6156,318182	8	176,8	6402,570909
172	6228,745455	6	177,16	6415,607818
173	6264,959091	5	177,325	6421,583068
175	6337,386364	2	176,75	6400,760227
176	6373,6	1	176,88	6405,468
179	6482,240909	-2	177,21	6417,4185
181	6554,668182	-4	177,38	6423,574818
183	6627,095455	-7	176,595	6395,147114
184	6663,309091	-8	176,64	6396,776727
187	6771,95	-11	176,715	6399,49275
189	6844,377273	-13	176,715	6399,49275
190	6880,590909	-14	176,7	6398,949545
192	6953,018182	-16	176,64	6396,776727
195	7061,659091	-18	177,45	6426,109773
196	7097,872727	-19	177,38	6423,574818
199	7206,513636	-20	179,1	6485,862273

Utilizando-se os valores de tensão regulada medidos e o *Tap* assumido pelo regulador (Figura 6.18, Figura 6.19 e Figura 6.20), pode-se estimar qual seria a tensão de entrada – Tabela 13. Comparando a tensão de entrada medida – Tabela 12 – com o valor de entrada estimado – Tabela 13 – obtém-se um erro médio de 3,83328V, com um desvio padrão de 0,42639V. Isso implica que o sistema montado para os experimentos apresenta um erro de regulação com baixa dispersão entre os valores medidos e a média. Essa medida correlaciona a tensão de entrada medida, o *Tap* escolhido pelo RT e a

tensão de saída medida, ou seja, serve para verificar o impacto das quedas internas do RT, e do sistema montado para o experimento sobre a tensão regulada.

**Tabela 13 – Estimação de valores com base na tensão de saída em BT e o Tap medido**

<b>Tap (medido)</b>	<b>Saída BT (medida)</b>	<b>Saída AT (estimada)</b>	<b>Entrada AT (Estimada)</b>	<b>Entrada BT (estimada)</b>
19	174	6301,172727	5754,495641	158,9041096
17	175	6337,386364	5840,909091	161,2903226
15	175	6337,386364	5895,243129	162,7906977
13	175	6337,386364	5950,597525	164,3192488
11	175	6337,386364	6007,001293	165,8767773
9	175	6337,386364	6064,484559	167,4641148
7	175	6337,386364	6123,078612	169,0821256
5	175	6337,386364	6182,815965	170,7317073
3	176	6373,6	6279,408867	173,3990148
0	175	6337,386364	6337,386364	175
-1	177	6409,813636	6442,023755	177,8894472
-3	177	6409,813636	6507,425012	179,6954315
-5	176	6373,6	6537,025641	180,5128205
-7	176	6373,6	6604,766839	182,3834197
-9	177	6409,813636	6711,84674	185,3403141
-11	176	6373,6	6744,550265	186,2433862
-13	176	6373,6	6816,684492	188,2352941
-15	177	6409,813636	6929,528256	191,3513514
-17	176	6373,6	6965,68306	192,3497268
-19	176	6373,6	7042,651934	194,4751381

Utilizando a Tabela 13 para verificar o erro de regulação na tensão de saída, pode-se concluir que o valor médio da tensão de saída está em 175,7V (6362,73591V), com desvio padrão de 0,8645V (31,30686V). O erro médio em degraus de regulação é de 1,46893 divisões do regulador, com um desvio padrão de 0,97684, entretanto a incerteza na faixa dinâmica do regulador está em  $\pm 1$  divisão, de tal forma que o erro considerado deve ser de 0,46893 divisões. Como o desvio padrão é baixo, pode-se

afirmar que não existe uma dispersão dos erros de regulação, ou seja, o regulador de tensão nessas condições apresenta uma elevada precisão, e o problema relacionado à exatidão pode ser reduzido calibrando o sistema.

# Capítulo 7

## 7 Conclusões Finais e Trabalhos Futuros

Neste trabalho realizou-se um estudo sobre os Reguladores de Tensão com Comutadores Eletrônicos de *Taps*. Também foram abordados os aspectos relacionados ao funcionamento de RTs com comutadores eletromecânicos. Após uma análise desses dois tipos de RTs, constatou-se que os comutadores eletrônicos propiciam um desempenho operacional superior aos reguladores de tensão eletromecânicos, tanto no tempo de resposta quanto na confiabilidade do sistema. No que se refere ao tempo necessário para a troca entre *taps*, o RT com comutador eletrônico mostrou ser o mais rápido. Os comutadores eletrônicos necessitam menos manutenção do que os com partes móveis, têm uma estrutura menos complexa e são mais leves.

Primeiramente, foram relatadas as características construtivas e operacionais de comutadores eletromecânicos, inclusive descrevendo seu funcionamento. Outro ponto importante estudado refere-se aos problemas relacionados à manutenção dos comutadores eletromecânicos relatados na pesquisa bibliográfica, os quais serviram de

motivação para o desenvolvimento de comutadores eletrônicos capazes de superar essa limitação.

A dinâmica superior, no que respeita ao tempo necessário a uma troca de *taps*, é uma das principais vantagens do RT com comutador eletrônico. Isso se deve à utilização de chaves semicondutoras ao invés de chaves mecânicas. Outra característica que torna o RT no estado sólido mais rápido está relacionada à troca direta entre qualquer *tap*, uma vez que os comutadores eletromecânicos trocam os *taps* de forma sequencial. Com o emprego de tiristores como chaves eletrônicas, o RT eletrônico pode levar apenas 8,33ms para acessar qualquer derivação, enquanto o RT eletromecânico chega a levar de 4s a 42s. No caso do protótipo de RT com comutador eletrônico implementado, o tempo entre as trocas de *taps* foi fixado em 50ms, a fim de respeitar o tempo de acomodação do sistema de medição de tensão desenvolvido.

Visando a agregar subsídios para a concepção da topologia do regulador de tensão com comutador eletrônico de *taps*, obteve-se um modelo matemático dos reguladores de tensão. Dessa forma, foram criados os meios que possibilitaram a determinação das combinações de chaves para cada configuração topológica do sistema, bem como as condições de curto-circuito (restrições topológicas). Esses elementos servem tanto para o projeto do comutador eletrônico de *tap's* quanto para o mapeamento das possibilidades de acionamento das chaves semicondutoras. Também cabe ressaltar o desenvolvimento de uma metodologia para determinar a combinação dos *tap's* para cada configuração topológica, possibilitando uma investigação completa das possíveis combinações de *tap's* e de suas condições de redundância.

Durante o desenvolvimento teórico do modelo comportamental do RT, operado em excitação variável, cunharam-se as definições de perda e ganho de compensação, as quais permitem, via aparato matemático desenvolvido, um estudo do desempenho do RT ao longo de toda sua faixa de compensação. Utilizando essa teoria, foi possível comprovar que o RT do Tipo A é um regulador com um desempenho superior na regulação de sobretensão. Foram identificados problemas relacionados à perda na capacidade de compensação dos RTs operando na regulação de afundamentos. Essa sensibilidade foi descrita matematicamente e propôs-se uma metodologia que permite solucioná-la por meio da escolha adequada de uma relação mínima de transformação – resolução  $T_1$ .

Em relação à determinação dos parâmetros do autotransformador que compõe o RT, foi possível o desenvolvimento de um algoritmo que possibilita a determinação das relações de transformação que maximizam a faixa dinâmica de compensação ou a redundância de *tap's*, de tal forma que se consiga um RT mais confiável ou com uma dinâmica de compensação estendida. No que se refere à relação de transformação, foi desenvolvida uma metodologia que permite a determinação da menor resolução de compensação a fim de reduzir a perda de compensação do RT, quando este opera no modo de excitação variável. Dentro desse contexto, pode-se também determinar qual é a melhor resolução do RT para compensar afundamentos de tensão ou sobretensões, em uma faixa dinâmica de operação.

O protótipo experimental apresentado mostrou a viabilidade técnica do RT com comutador eletrônico de *tap* e mais de um enrolamento de regulação. Foi verificada a manutenção da amplitude da tensão na carga, mesmo com sobretensões e subtensões na entrada do RT. Também foi possível analisar a operação utilizando os parâmetros

descritos no Prodist em seu módulo 8. Dessa forma, foi constatado que, mesmo fora da região de operação, é possível garantir níveis adequados de regulação.

Trabalhos futuros:

- desenvolver um modelo que possibilite relacionar a determinação dos *taps* e das chaves semicondutoras, em uma única estrutura algébrica;
- utilizar a proposta de modelagem em outros circuitos que utilizam chaves eletrônicas;
- fazer o controle do Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de *Taps* do Tipo A em malha fechada;
- desenvolver um o algoritmo de RMS instantâneo, aplicado ao controle de RT;
- estudar o Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de *Taps* operando como Tipo B.

# Bibliografia

- [1] ANEEL, *RESOLUÇÃO 676/2003.*, 2003.
- [2] J. P. Laflamme and G. Simard, "Six Steps to Improve Distribution Voltage Quality," *T&D World Magazine*, Dezembro 2004. [Online]. [2013](#)
- [3] "POWER QUALITY - TWO DIFFERENT PERSPECTIVES," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, 1990.
- [4] T.J. Leszczynski, "Voltage Regulation Selection in Power Distribution Design," in *Textile Industry Technical Conference*, Greenville, USA, 1988.
- [5] T. Larsson, R. Innanen, and G. Norstrom, *Static Electronic Tap-Changer for Fast Phase Voltage Control*, 1997.
- [6] J. R. Felício, *MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO MONOFÁSICOS COM 32 DEGRAUS PARA ESTUDOS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO*. Uberlândia: Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- [7] B. Handley, M. Redfern, and S. White, "On load tap-changer conditioned based maintenance," *Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol. 148, pp. 296-300, julho 2001.

- [8] IEEE Standard Requirements for Tap Changers, IEEE Std C57.131-2012 (Revision of IEEE Std C57.131-1995), 2012.
- [9] IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage Regulators," IEEE Std C57.15-2009 (Revision of IEEE Std C57.15-1999), 2009.
- [10] G. Spence and A.C. Hall, "On-Load Tap-Changers Current Experience and Future Development – Users Experience and Perspective," *Developments On-Load Tapchangers: Current Experience and Future, IEE European Seminar on*, pp. 1-6, Nov. 1995.
- [11] D.A. Peck, "On-Load Tap-Changers Current Experience and Future Development – Principles and Resulting Benefits of Separate Tank (External) Tap-Changers," *Developments On-Load Tapchangers: Current Experience and Future, IEE European Seminar on*, pp. 1-3, 1995.
- [12] J. Faiz and B. Siahkollah, "Optimal configurations for taps of windings and power electronic switches in electronic tap-changers," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol. 149, pp. 517-524 , 2002.
- [13] R.C. Degeneff, "A New Concept for a Solid-State On-Load Tap Changers," in *Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 438)*, 1997.
- [14] O. Demirci, D.A. Torrey, R.C. Degeneff, F.K. Schaeffer, and R.H. Frazer, "A new approach to solid-state on load tap changing transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, pp. 952-961, 1998.

- [15] Jiang Hao, R. Shuttleworth, B. Al Zahawi, and A. Power, "Fast Response GTO Assisted Novel Tap Changer," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 1, 1996.
- [16] F Q Yousef-Zai and D O'Kelly, "Solid-state on-load transformer tap changer," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 143, 1996.
- [17] R. Shuttleworth, X. Tian, C. Fan, and A. Power, "New tap changing scheme," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 143, Janeiro 1996.
- [18] Gao Dawei, Lu Qingchun, and Luo Jishou, "A new scheme for on-load tap-changer of transformers," *Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on*, vol. 2, 2002.
- [19] J. Faiz and B. Siahkollah, "New Solid-State Onload Tap-Changers Topology for Distribution Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, pp. 136-141, janeiro 2003.
- [20] Mauricio Aredes, Mauro S. Reis, Jão Moor, and Lucas Frizera Encarnação, "Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração," *VIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, vol. 1, 2009.
- [21] Egoitz Martinez, Iosu Fernandez, and Jose M Canales, "Thyristor based solid state tap changer for distribution transformers," *Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM), 2013 IEEE 11th International Workshop of*, 2013.

- [22] J. Faiz and H. Javidnia, "Fast response solid-state on load transformers tap-changer," *Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 475)*, 2000.
- [23] G. H. Cooke and K. T. Williams, "New thyristor assisted diverter switch for on load transformer tap changers," *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, vol. 139, 1992.
- [24] C.W. Toh, C.S. Lock, S. Chen, and S.S. Choi, "A Voltage Quality Improvement Solution Using Step Dynamic Voltage Regulator," *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on* , vol. 2, 2000.
- [25] M. S. Reis, J. S. Menas, T. A. Brasil, and M. Aredes, "A general S-DVR symmetrical model and implementation," *Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on*, 2012.
- [26] IEEE Standard Requirements, "Terminology, and Test Code for Step-Voltage and Induction-Voltage Regulators," *ANSI/IEEE Std C57.15-1986*, 1988.
- [27] J. Faiz and B. Siahkollah, "Differences between conventional and electronic tap-changers and modifications of controller," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 21, pp. 1342-1349, 2006.
- [28] C. A. Ferreira and V. M. Costa, *CONTROLE DE TENSÃO NO FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO – MODELAGENS E EFEITOS NA ESTABILIDADE DE TENSÃO*, 2004.

- [29] Dawei Gao, Qingchun Lu, and Jishou Luo, "A New Scheme for On-Load Tap-Changer of Transformers," *IEEE*, 2002.
- [30] ITB, "Regulador de Tensão Monofásico RAV-2 comando CTRL-1," 2007.
- [31] IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage Regulators, IEEE Std C57.15-2009 (Revision of IEEE Std C57.15-1999), 2009.
- [32] ANSI/IEEE C57.15, "IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage and Induction-Voltage Regulators," 1986.
- [33] ABNT, "NBR11809 – Reguladores de Tensão," 1992.
- [34] IEEE Emerald Book, - *IEEE Standard 1100 - 1999. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.*, 1999.
- [35] IEC 60214, "On-Load Tap Changer," 1964.
- [36] ANEEL. (2001, novembro) Resolução 505. [Online].  
[www.aneel.gov.br/cedoc/res20011505.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/res20011505.pdf)
- [37] G. Spence and A. C. Hall, "On-Load Tap-Changers Current Experience and Future Development – Users Experience and Perspective," *National Grid Company*, outubro 1999.
- [38] R. C. FERREIRA, "Lógica matemática e álgebra de Boole: uma breve introdução," in *XV Encontro Brasileiro de estudantes de Pós-graduação em Educação Matemática*, 2011.

- [39] ANEEL , "Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica," *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST* , 2010.
- [40] Semikron, "Datasheet SKKT 162," 2004.
- [41] V.L. MAIA, "Projeto de um transformador planar para o isolamento e chaveamento de tiristores," *Dissertação de Mestrado - UFRJ*, 2013.
- [42] E.E.S. NETTO, "Montagem e Testes em Média Tensão de Chaves Estáticas para um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de TAPS," *Trabalho de Conclusão de Curso - UFRJ*, 2013.
- [43] J. H. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions.*: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- [44] ONS, "Submódulo 2.2, Padrões de Desempenho da Rede Básica," 2002.
- [45] R. CALVAS, "Les Perturbations Électriques en BT," *Cahier Technique Schneider Electric*, Maio 2001.
- [46] IEEE Std 1159, "Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," 1995.
- [47] J. W. Schwartzberg and R. W. Doncker, "15 kV Medium Voltage Static Transfer Switch," *Industry Applications Society Annual Meeting*, 1995.
- [48] J. Afsharian, Bin Wu, and N. Zargari, "Self-Powered Supplies for SCR, IGBT, GTO and IGCT Devices: A Review of The State of The Art," *Electrical and*

*Computer Engineering*, pp. 920-925, 2009.

- [49] D. M. Raonic, "SCR self-supplied gate driver for medium-voltage application with capacitor as storage element," vol. 36, no. 1, 2000.
- [50] D. S. Maclellan and K. R. Hilderley, "Self powered gate driver system - US Patent Application PCT/US 2007/0070557," Março 2007.
- [51] H. Tai, "Gate power supply circuit - US Patent 5483192," Janeiro 1996.
- [52] H. Tai, "Gate power supply circuit - US Patent 5450308," setembro 1995.
- [53] H. Wang, A. Q. Huang, and F. Wang, "Development of a scalable power semiconductor switch (SPSS)," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 22, pp. 364–373, Março 2007.
- [54] D.M. Raonic, S. D. Maclellan, and G. D. Rouaud, "Self-powered gate driver board - US Patent 5796599," Agosto 1998.
- [55] J. Holtz and R. Rosner, "Gate drive power recovery and regenerative snubber scheme for series-connected GTOs in high voltage inverters," *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 3, pp. 1535–1540, 1999.
- [56] R. Rosner, J. Holtz, and R. Kennel, "Cellular driver/snubber scheme for series connection of IGCTs," *IEEE Conf. on Power Electronics Specialists*, vol. 2, pp. 637–641, 2001.
- [57] W. Hu, B. Wu, N. Zargari, and Z. Cheng, "A novel self-powered supply for GCT gate drivers," *IEEE Applied Power Electronics Conference*, vol. 2, pp. 1275–1279,

2007.

- [58] C. A. Smith and G. K. Woodworth, "Self-powered SCR gate drive circuit with optical isolation - US Patent 5028825," Julho 1991.
- [59] S. C. Glidden, "Compact high voltage solid state switch - US Patent 6624684," setembro 2003.
- [60] H. Sanders and S. C. Glidden, "High power solid state switch module," *IEEE 26th Int'l Symposium on Power Modulator*, pp. 563–566, Maio 2004.
- [61] J. Zhang, R. Ding, and Song H., "A new reliable supplied gate drive circuit for SCRs with breakover diodes for protection," Maio 2004.
- [62] J.V. Lopez et al., "Electronic Tap-Changing Stabilizers for Medium-Voltage Lines Optimum Balanced Circuit," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 1909-1918, 2012.



# Apêndice B

## B.1 Álgebra Booleana

A álgebra booleana se baseia na existência de constantes binárias, cujo valor pode ser apenas 1 (nível alto) ou 0 (nível baixo). Tais constantes nunca podem assumir dois valores simultâneos, implicando os seguintes axiomas:

$$X = 0 \leftrightarrow X \neq 1 \quad (\text{B.1})$$

$$X = 1 \leftrightarrow X \neq 0 \quad (\text{B.2})$$

Os postulados numerados de (a) a (h) são os pilares das operações booleanas:

a)  $X + 1 = 1$

b)  $X + 0 = X$

c)  $X \cdot 0 = 0$

d)  $X \cdot 1 = X$

e)  $X + X = X$

f)  $X \cdot X = X$

g)  $X + \bar{X} = 1$

h)  $X \cdot \bar{X} = 0$

As operações booleanas possuem propriedades semelhantes às operações algébricas com escalares:

Associativa

$$(X \cdot Y) \cdot Z = X \cdot (Y \cdot Z)$$

$$(X + Y) + Z = X + (Y + Z)$$

Comutativa

$$X \cdot Y = Y \cdot X$$

$$X + Y = Y + X$$

Distributiva

$$X \cdot (Y + Z) = X \cdot Y + X \cdot Z$$

$$X + (Y \cdot Z) = (X + Y) \cdot (X + Z)$$

Algumas propriedades booleanas podem ser utilizadas para simplificar expressões:

$$X + X \cdot Y = X$$

$$X \cdot (X + Y) = X$$

$$X + X \cdot Y = X + Y$$

$$X(\bar{X} + Y) = X \cdot Y$$

Sejam  $X$  e  $Y$  variáveis binárias, o teorema de De Morgan resulta nas seguintes implicações:

$$\overline{(X \cdot Y)} = \bar{X} + \bar{Y} \quad (\text{B.3})$$

$$\overline{(X + Y)} = \bar{X} \cdot \bar{Y} \quad (\text{B.4})$$