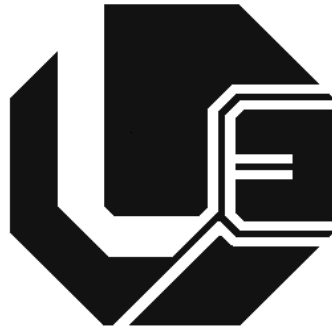


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



DESENVOLVIMENTO E
IMPLEMENTAÇÃO DE UMA
METODOLOGIA DE CHAVEAMENTO
PARA REGULADORES ESTÁTICOS
DE BAIXA TENSÃO

Rodrigo Nobis da Costa Lima

Uberlândia

2022

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

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
UMA METODOLOGIA DE CHAVEAMENTO
PARA REGULADORES ESTÁTICOS
DE BAIXA TENSÃO

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia como requisito para a obtenção do
título de Doutor em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Rubens Macedo Junior, **Dr – UFU (Orientador)**

Ernane Antônio Alves Coelho, **Dr – UFU**

Isaque Nogueira Gondim, **Dr. – UFU**

José Antenor Pomilio, **Dr. – UNICAMP**

José Carlos de Melo Vieira Jr, **Dr. – USP/São Carlos**

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE CHAVEAMENTO PARA REGULADORES ESTÁTICOS DE BAIXA TENSÃO

Rodrigo Nobis da Costa Lima

Tese apresentada por Rodrigo Nobis da
Costa Lima à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Rubens Macedo Junior, Dr.
Orientador

Prof. Luiz Carlos Gomes de Freitas, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

Reitor: Valder Steffen Junior

Pró-Reitor de Graduação: Kárem Cristina de Sousa Ribeiro

Pró-Reitor de Pós-graduação: Carlos Henrique de Carvalho

Diretor da Faculdade de Engenharia Elétrica: Sérgio Ferreira de Paula Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica: Luiz Carlos Gomes de Freitas

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

L732 Lima, Rodrigo Nobis da Costa, 1992-
2022 Desenvolvimento e implementação de uma metodologia de chaveamento para reguladores estáticos de baixa tensão [recurso eletrônico] / Rodrigo Nobis da Costa Lima. - 2022.

Orientador: José Rubens Macedo Junior.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.248>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Macedo Junior, José Rubens
,1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

CDU: 621.3

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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 298, PPGEELT				
Data:	Treze de maio de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	11813EEL008				
Nome do Discente:	Rodrigo Nobis da Costa Lima				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento e implementação de uma metodologia de chaveamento para reguladores estáticos de baixa tensão				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Distribuição de energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: José Rubens Macedo Junior. Título do projeto: Análise dos impactos da mini e microgeração distribuída com fonte fotovoltaica na qualidade da energia elétrica em redes de distribuição. Agência financiadora: Light Serviços de Eletricidade S.A. – P&D ANEEL . Número do processo na agência financiadora: 4500-433844 . Vigência do projeto: 26/11/2019 – 26/05/2022.				

Reuniu-se, por meio de videoconferência em sessão fechada (devido ao potencial do trabalho para proteção de propriedade intelectual), a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Ernane Antônio Alves Coelho - FEELT/UFU; Isaque Nogueira Gondim- FEELT/UFU; José Antenor Pomilio - UNICAMP; José Carlos de Melo Vieira Junior - USP; José Rubens Macedo Junior - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a) José Rubens Macedo Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença dos membros da banca, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

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

Aprovado(a).

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/05/2022, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/05/2022, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ernane Antonio Alves Coelho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/05/2022, às 12:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Melo Vieira Júnior, Usuário Externo**, em 13/05/2022, às 12:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSÉ ANTENOR POMILIO, Usuário Externo**, em 13/05/2022, às 12:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3556435** e o código CRC **367E86F0**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que se aventuraram na árdua, capciosa e, muitas vezes, altruísta tarefa de fazer ciência neste País.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à vida pela energia e saúde disponibilizadas, coragem exigida diante das dificuldades e, o mais importante, pela possibilidade de fazer escolhas, nem sempre acessíveis a todos.

Ao professor José Rubens Macedo Junior, meus agradecimentos pela orientação, apoio, amizade e confiança depositada, imprescindíveis para realização deste trabalho e também para uma melhor formação profissional e pessoal. Foi um enorme privilégio trabalhar ao lado de um pesquisador tão dinâmico, polivalente e proativo em prol do desenvolvimento da ciência brasileira.

À minha família, em especial à minha mãe Ana Lucia e ao meu pai Sebastião, pelo carinho, dedicação e apoio que sempre me proporcionaram, e, principalmente, pela oportunidade proporcionada para que este trabalho pudesse ter sido realizado.

À minha namorada Saemi pela compreensão e pelo carinho, não podendo esquecer-se das palavras de incentivo nos momentos difíceis, da força e do estímulo que foram essenciais para desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, por terem acompanhado, apoiado e também elucidado o caminho rumo ao desenvolvimento desse trabalho. Dentre eles, um especial agradecimento aos companheiros de laboratório Eduardo, Isabela, Lucas, Vanildo e aqueles da família do Ultimate uberlandense.

Ao professor Ernane Antônio Alves Coelho pelo imenso auxílio durante a etapa de desenvolvimento do protótipo. A paciência e tempo despendidos foram, com certeza, primordiais para a realização desse trabalho.

À ARSOL Energia Solar pela confiança que tem depositado em mim nos últimos anos e pelas oportunidades de crescimento intelectual e pessoal.

Aos professores da pós-graduação pela amizade e auxílio mediante os conhecimentos transmitidos.

Aos demais funcionários do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da instituição como um todo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

RESUMO

Dentre os diversos fenômenos relacionados com a qualidade da energia elétrica, as variações de tensão de longa e curta duração representam os fenômenos mais comuns nos sistemas elétricos de uma maneira geral. Nesse contexto, particularmente, as variações de tensão de curta duração (VTCDs) representam o fenômeno que mais causa prejuízos à sociedade, protagonizando paradas de processos produtivos em diversos tipos de instalações industriais e comerciais. Não obstante, existem atualmente várias formas de atenuação dos efeitos decorrentes desses eventos e uma delas é o emprego de reguladores estáticos de tensão, os quais são equipamentos magnéticos, transformadores ou autotransformadores, que realizam o controle da tensão através do chaveamento estático dos *taps* em suas bobinas primária ou secundária. O tema em questão tem sido explorado pela comunidade científica desde o início da década de 1990, porém, várias das metodologias propostas apresentam limitações difíceis de serem transpostas em algumas situações, como, por exemplo, a necessidade do conhecimento da passagem por zero da corrente instantânea para efetivação dos acionamento das chaves estáticas, assim como a falta do detalhamento técnico necessário para a replicação de algumas dessas metodologias e dos custos exorbitantes de implementação, inviabilizando seu uso para a maioria das aplicações práticas. Diante disso, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar uma proposta de concepção de um novo regulador estático de tensão capaz de realizar chaveamentos de *taps* com intervalos de tempo menores do que aqueles apresentados na literatura disponível. Essa nova concepção de regulador estático de tensão contempla ainda uma fácil implementação, com poucas variáveis de controle e, principalmente, sem a necessidade de medição do sinal de corrente instantânea para identificação de sua passagem por zero. Para apresentação da metodologia proposta, foram implementados modelos matemáticos, consubstanciados por diversas simulações computacionais, visando a análise de desempenho dos principais aspectos da metodologia proposta. Finalmente, a metodologia de chaveamento apresentada foi implementada em um protótipo laboratorial de escala reduzida. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica do método proposto, assim como a possibilidade de sua aplicação em redes reais de forma bastante promissora.

Palavras-chave: Regulador de tensão estático; chaveamento estático; variações de tensão de longa duração; variações de tensão de curta duração, comutação de *taps* sob carga; qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

Among the several phenomena related to power quality issues, long and short-term voltage variations represent the most common phenomena in electrical systems in general. In this context, in particular, voltage dips and swells represent the most harmful disturbances to electric power utility customers, leading to stoppages in production processes in a large number of commercial and industrial facilities. Fortunately, there are currently some technical solutions commercially available to mitigate the effects of these voltage events. One of these solutions is the use of static voltage regulators, which are basically composed of magnetic devices (transformers or autotransformers) that perform voltage control through static switching of taps in their primary or secondary coils. The subject has been explored by the scientific community since the early 1990s. However, several of the proposed methodologies have limitations that are difficult to overcome in some situations, such as, for example, the need for knowledge of the instantaneous current zero crossing to perform the switching of static switches, as well as the lack of technical detail necessary for the replication of some of these methodologies and the exorbitant costs of implementation, making its use unfeasible for most practical applications. In this sense, the present work has the goal of presenting a proposal for the design of a new static voltage regulator capable of performing tap changes faster than those presented in the available literature. This new concept of static voltage regulator also includes an easy implementation, with few input variables and, mainly, without the need to measure the instantaneous current signal to identify zero crossing. To present the proposed methodology, resulting in a new concept of static voltage regulator, mathematical models were implemented based on computer simulations, aiming the analysis of the performance of the main aspects of the proposed methodology. Finally, the presented switching methodology was implemented in a small-scale laboratory prototype. The results demonstrated the technical feasibility of the proposed method, as well as the possibility of its application in real networks in a very promising way.

Keywords: Static voltage regulator; static switching; long duration voltage variations, short duration voltage variations; on-load *tap* changing; power quality.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	19
1.3 ESTRUTURA DA TESE DE DOUTORADO.....	19
2. METODOLOGIA DE CHAVEAMENTO PARA REGULADORES DE TENSÃO ESTÁTICOS DE BAIXA TENSÃO.....	21
2.1 AUTOTRANSFORMADOR	25
2.2 RESISTORES DE CHAVEAMENTO	28
2.3 CHAVES ESTÁTICAS.....	28
2.4 CONTROLE DO REGULADOR DE TENSÃO ESTÁTICO	29
2.5 PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DO RTE.....	34
2.6 ACIONAMENTOS DO RTE.....	36
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	36
3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO REGULADOR DE TENSÃO ESTÁTICO	38
3.1 SIMULAÇÕES COM O RTE OPERANDO A VAZIO	39
3.2 SIMULAÇÕES COM O RTE SUPRINDO CARGA RESISTIVA.....	44
3.3 SIMULAÇÕES COM O RTE SUPRINDO CARGA NÃO LINEAR.....	49
3.4 SIMULAÇÕES COM O RTE SUPRINDO CARGA INDUTIVA	55
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO RTE	59
4. TESTES DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO.....	62
4.1 ENSAIOS NO RTE OPERANDO A VAZIO.....	64
4.1.1 Variações Temporárias de Tensão.....	64
4.1.2 Variações Momentâneas de Tensão	69
4.2 ENSAIOS DO RTE ALIMENTANDO CARGA RESISTIVA	73
4.2.1 Variações Temporárias de Tensão.....	73
4.2.2 Variações Momentâneas de Tensão	80
4.3 ENSAIOS DO RTE ALIMENTANDO CARGA NÃO LINEAR	84

4.3.1 Variações Temporárias de Tensão.....	84
4.3.2 Variações Momentâneas de Tensão	88
4.4 ENSAIOS DO RTE ALIMENTANDO CARGA COM FATOR DE POTÊNCIA INDUTIVO.....	90
4.4.1 Variações Temporárias de Tensão.....	91
4.4.2 Variações Momentâneas de Tensão	95
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS TESTES LABORATORIAIS.....	97
5. CONCLUSÕES	99
5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1. INTRODUÇÃO

O termo *Power Quality*, traduzido no Brasil como Qualidade da Energia Elétrica, foi utilizado pela primeira vez em um trabalho produzido pela marinha dos Estados Unidos da América (EUA), em 1968 [1]. Entretanto, a preocupação com o tema é muito mais antiga; concessionárias de energia elétrica do mundo todo já se preocupavam em melhorar o que chamamos atualmente de qualidade da energia elétrica há muito mais tempo [2].

Atualmente, o termo qualidade da energia elétrica trata de representar as condições do suprimento de energia através da sua continuidade, assim como da divergência das ondas de tensão e corrente com padrões considerados ideais para o desempenho do sistema elétrico [3].

O assunto ganhou uma maior relevância nos últimos anos devido a diversos fatores, como: aumento de equipamentos com microprocessadores e/ou que empregam eletrônica de potência, naturalmente mais sensíveis a problemas relacionados à qualidade da energia; aumento da atenção e conhecimento dos consumidores finais em relação ao tema; crescimento da interconexão do sistema, o que faz com que falhas tenham impacto maior e consequências mais relevantes; entre outros [4].

Dentre os diferentes distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica, estão as variações de tensão de curta duração (VTCDs). A norma IEEE 1159-2019 [5] classifica as VTCDs como sendo distúrbios que promovam uma mudança no valor eficaz da tensão, com duração variando de meio ciclo a 1 minuto. A referida norma estabelece que variações de tensão com durações menores que meio ciclo não podem ser caracterizadas efetivamente como mudanças no valor eficaz da componente de frequência fundamental da tensão, sendo, assim, classificadas como transitórios. Adicionalmente, variações de tensão com duração maior que 1 minuto podem ser controladas por reguladores de tensão eletromecânicos, sendo, então, classificadas como variações de tensão de longa duração.

Ainda segundo [5], as VTCDs podem ser separadas em 3 categorias, de acordo com a magnitude da tensão remanescente: interrupções de curta duração, que são eventos em que a tensão eficaz fica abaixo de 10% da tensão de referência; afundamentos de curta duração, que são eventos em que a tensão remanescente fica igual ou maior que 10% e menor que 90% da tensão de referência e, finalmente, elevações de curta duração, que são eventos em que a tensão eficaz fica acima de 110% da tensão de referência.

As regulamentações técnicas vigentes no Brasil, representadas pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [6] e pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de

Rede [7], utilizam limites diferentes de magnitude e duração para caracterização das VTCDs, conforme mostrado na Fig. 1.

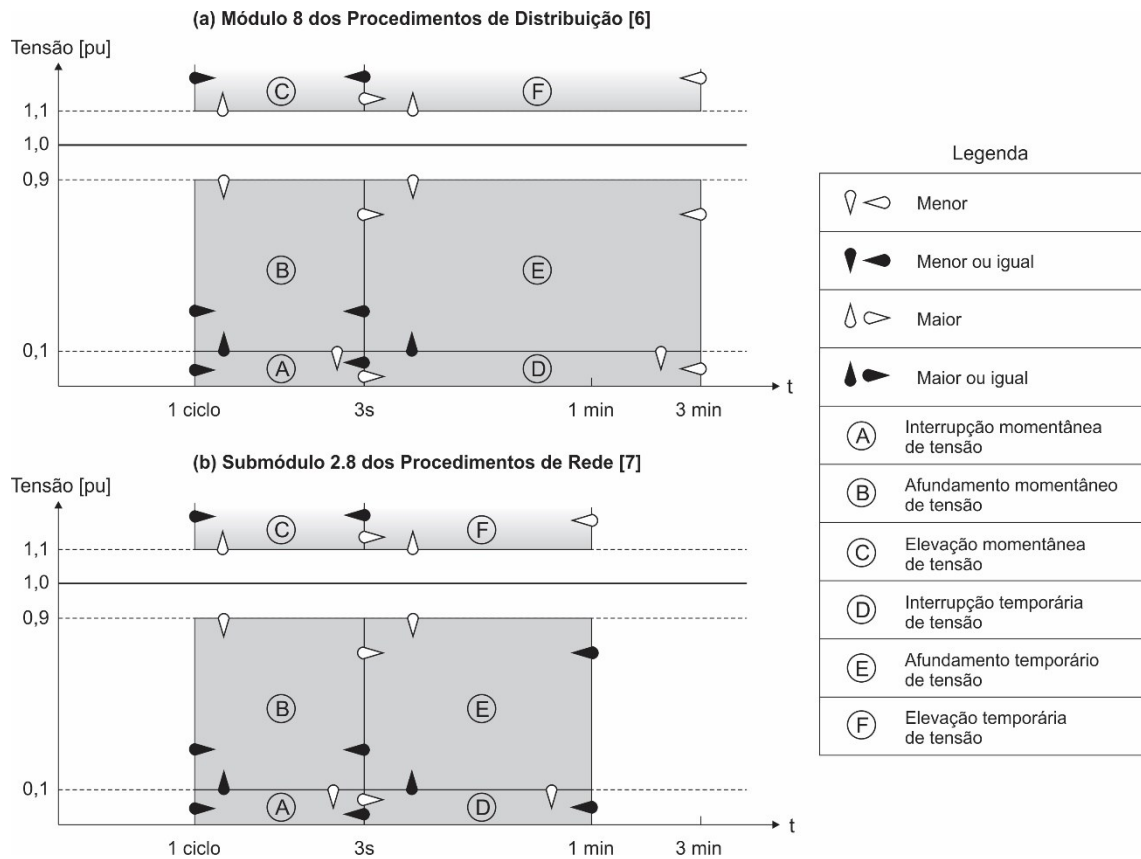


Figura 1 - Caracterização das VTCDs conforme (a) Procedimentos de Distribuição [6] e (b) Procedimentos de Rede [7].

Apesar das variações de tensão de longa duração (regime permanente) representarem um dos problemas mais comuns em sistemas elétricos, principalmente nos circuitos de distribuição de baixa e média tensão, as variações de tensão de curta duração (especialmente os afundamentos e interrupções momentâneas de tensão) são, de longe, os dois distúrbios da qualidade da energia elétrica que mais causam problemas a equipamentos, promovendo paradas de processos industriais e comerciais [8]. Sendo assim, é de interesse para o sistema elétrico como um todo diminuir a frequência e a severidade desses eventos, seja através da melhoria da qualidade da rede em si, através da intensificação das ações de manutenção, ou empregando equipamentos que promovam a atenuação das VTCDs.

Em se tratando de equipamentos para regulação de tensão em regime permanente, assim como atenuação de VTCDs, os reguladores de tensão estáticos (RTEs) são uma alternativa interessante, porém pouco explorada na prática. Os RTEs são equipamentos com o

princípio de transformação eletromagnética de um transformador, porém as derivações (*taps*) são acionadas estaticamente e, assim, conseguem modificar a tensão na sua saída em poucos ciclos. É importante salientar que os reguladores estáticos, por terem velocidade de acionamento de seus *taps* na ordem de dezenas de milissegundos, também atenuam variações de tensão de longa duração, atuando mais rapidamente que reguladores eletromecânicos e sem a presença de arco elétrico em seus contatos.

A presente tese de doutorado irá tratar de todo o desenvolvimento de um RTE, abordando uma nova metodologia de chaveamento de *taps*, apresentando a simulação computacional da metodologia desenvolvida e, por fim, mostrando os aspectos construtivos e os resultados de testes laboratoriais realizados em um protótipo de baixa potência. Adicionalmente, devido à sua maior relevância, todos os aspectos práticos neste trabalho serão abordados com foco específico na habilidade do equipamento desenvolvido em atenuar as variações de tensão de curta duração (VTCDs), apesar de sua capacidade intrínseca de também promover adequadamente a regulação da tensão em regime permanente.

As maiores contribuições do trabalho de doutorado desenvolvido e apresentado ao longo deste documento são: a concepção de uma metodologia de chaveamento para reguladores estáticos que não necessita da medição de corrente nas chaves estáticas e/ou nos enrolamentos do aparato magnético, além da utilização de triodos de corrente alternada (*TRIACs*, em inglês) como chaves estáticas, que, por serem chaves bidirecionais, reduzem pela metade o número de chaves e de circuitos de comando quando comparado com transistores de efeito de campo e tiristores.

A nova metodologia de chaveamento desenvolvida aliada ao emprego de *TRIACs* reduz a complexidade do controle como um todo, reduzindo o tamanho físico do circuito de acionamento das chaves, descartando a necessidade de sensores de corrente e simplificando a lógica de controle, uma vez que a única variável controlada é a tensão de saída.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As VTCDs são eventos muito comuns nas redes de distribuição de energia elétrica que atormentam consumidores finais, notadamente os consumidores da classe industrial, para os quais a maior parte das reclamações de caráter técnico estão relacionadas a esses tipos de eventos. Como exemplo, a ELEKTRO, distribuidora de energia brasileira, estima que 90% das reclamações de clientes de média e alta tensão estão relacionadas a VTCDs [9]. Olhando para dados de fora do Brasil, entre 2001 e 2002, o *Electric Power Research Institute* (EPRI) realizou

um trabalho sobre qualidade da energia elétrica utilizando dados de monitoramento de diversas concessionárias de energia elétrica dos EUA. Tal estudo mostrou que as VTCDs são, majoritariamente, os eventos que mais causam paradas de processo em instalações industriais [10]. Um outro trabalho, conduzido em 2004 na Europa, revelou que mais de 40% dos problemas relacionados à confiabilidade do sistema elétrico estavam relacionados à incidência de VTCDs [11].

Conforme exposto, as VTCDs fazem parte do dia a dia de sistemas elétricos no mundo todo; o que exige que concessionárias e consumidores trabalhem constantemente em prol da diminuição do impacto decorrente desses distúrbios no funcionamento da rede e de seus processos produtivos. De forma geral, as ações para diminuição e/ou amenização de VTCDs podem ser enquadradas, por exemplo, nos seguintes tópicos [2]:

- redução do número de faltas, através da manutenção do sistema;
- redução do tempo de eliminação de faltas, através de ajustes no sistema de proteção;
- melhoria da rede elétrica de forma a deixar os eventos menos severos, aumentando o

nível de curto-circuito;

- redução da sensibilidade dos equipamentos às VTCDs e
- instalação de equipamentos de atenuação para cargas sensíveis.

Em se tratando de equipamentos para atenuação de VTCDs, pode-se listar:

- os controladores série (conhecidos como *Dynamic Voltage Restorers*, ou *DVR*), que aplicam à carga uma tensão sintetizada eletronicamente em série com a tensão da rede [12];

- os controladores em derivação (conhecidos como *Static Compensators*, ou *StatCom*), que são equipamentos que acionam eletronicamente um elemento reativo passivo, capacitor ou indutor, de forma a absorver ou despachar potência reativa para a rede, controlando a tensão através do controle de potência reativa [13];

- a composição dos compensadores série e paralelo, formando um dispositivo completo: os denominados controladores de fluxo de potência unificado (*UPFC*, em inglês) [14];

- as fontes de energia ininterrupta (*UPS*, em inglês), que são equipamentos que assumem (*UPS offline*) ou mantêm (*UPS online*) a alimentação da carga no instante de uma VTCD. Tais equipamentos utilizam algum tipo de armazenador de energia para manter o funcionamento dos equipamentos e podem alimentar a carga por alguns ciclos ou segundos, a depender da quantidade de energia armazenada e da potência da carga [15];

- os reguladores de tensão do tipo conversor CA-CA *chopper* [16], que, como o próprio nome aponta, utiliza o princípio de um conversor eletrônico CA-CA do tipo *chopper* para regular a tensão na carga e
- os RTEs, que são equipamentos que chaveiam estaticamente as bobinas de um aparato eletromagnético alterando a tensão de saída em relação à tensão de entrada.

Estes últimos equipamentos compõem o tema de trabalho do presente documento.

O primeiro texto do qual se tem registro, acerca da idealização de reguladores de tensão empregando eletrônica de potência, é representado por uma patente escrita em 1963 [17]. O trabalho aborda um transformador de dois enrolamentos com a bobina secundária dividida em dois *taps*, sendo, cada um deles, acionado por um circuito eletrônico aliado a válvulas elétricas ou tiristores. A tensão de compensação dos *taps*, que é adicionada à tensão da fonte e aplicada à carga, varia de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores. Como a forma da tensão de compensação pode variar de uma senoide completa até uma tensão nula, a depender do ângulo de disparo dos tiristores, o regulador é capaz de gerar distorções harmônicas expressivas na tensão de saída em grande parte da faixa de regulação do equipamento.

Uma segunda patente [18], escrita em 1967, apresenta um equipamento que pode ser considerado uma melhoria do regulador descrito em [17]. Os autores propõem um equipamento com um circuito de comutação composto por um reator, que tem a função de evitar o curto-circuito das bobinas de *tap*. Entretanto, para o funcionamento desse equipamento, uma corrente ficará circulando no circuito de comutação sempre que o regulador estiver fora da posição neutra. Além disso, para o funcionamento adequado, essa corrente circulante deve ser maior do que metade da corrente de carga, o que aumenta a corrente demandada pelo conjunto e, por consequência, pode aumentar as perdas. Por fim, o sentido dessa corrente é sempre o mesmo, independente do semiciclo da onda de tensão, o que causa assimetria na forma de onda da corrente demandada da fonte.

Desde então, diversos reguladores de tensão que empregam eletrônica de potência em sua concepção foram apresentados na literatura técnica. De forma geral, as chaves estáticas foram utilizadas inicialmente em circuitos auxiliares de reguladores eletromecânicos convencionais, compondo os denominados reguladores híbridos [19-24].

Em reguladores eletromecânicos convencionais, a interrupção mecânica da corrente resulta em um arco elétrico capaz de desgastar os seus contatos móveis e degradar o óleo isolante. A princípio, o propósito de se empregar chaves estáticas nesses equipamentos foi o de

diminuir, ou até eliminar, os arcos elétricos durante as mudanças de *tap*. Dessa forma, é válido afirmar que a introdução de chaves estáticas no âmbito dos reguladores de tensão teve como objetivo primário o aumento da vida útil destes equipamentos, e não a redução do tempo de mudança de *taps*.

Os trabalhos referenciados em [19-20] apresentam melhorias no circuito de comutação de reguladores eletromecânicos convencionais através do emprego de chaves estáticas. Os autores propõem circuitos eletrônicos que entram em funcionamento no momento da troca de *tap*, extinguindo a presença de arcos elétricos e, por consequência, aumentando a vida útil do sistema de comutação.

Os autores em [21] propõem uma nova concepção para o circuito de comutação, composto por chaves mecânicas e estáticas. O equipamento apresentado nesse artigo emprega dois conjuntos de chaves estáticas para realizar o chaveamento de *taps*: o primeiro conjunto de chaves deve ser capaz de interromper corrente fora do seu instante de passagem por zero, como transistores bipolares de porta isolada (*IGBTs*, em inglês), por exemplo. Em contrapartida, o segundo conjunto de chaves não necessita dessa funcionalidade, sendo possível empregar tiristores ou mesmo *IGBTs*. Nesse trabalho, as chaves estáticas realizam a mudança dos *taps*, enquanto que as chaves mecânicas conduzem a corrente em regime permanente. Todavia, a metodologia para mudança de *tap* é dependente do conhecimento da polaridade, e por consequência da medição adequada, dos sinais de tensão e corrente dos enrolamentos de *taps*. É importante notar que a aquisição de sinais de tensão e de corrente depende de transdutores que podem apresentar erros e ruídos, principalmente na presença de harmônicas e em situações de baixo carregamento, o que pode ser problemático para a aplicação dessa metodologia.

Em [22-23], os autores apresentam um regulador híbrido composto por chaves a vácuo, responsáveis pelo acionamento mecânico dos enrolamentos de *taps*, e por tiristores, alocados em um circuito auxiliar incumbido de dissipar a energia de comutação, que seria extinta na forma de um arco elétrico em um regulador eletromecânico convencional. Um ponto de atenção é que a metodologia de mudança de *taps* descrita neste trabalho requer que o chaveamento dos enrolamentos seja feito no instante de passagem por zero da corrente das chaves. Similarmente ao observado em [21], a metodologia de mudança de *tap* deste trabalho é dependente da medição adequada da forma de onda da corrente em alguns pontos do circuito, o que pode ser um impedimento para a aplicação desta metodologia em algumas situações operacionais.

A referência [24], de outra forma, apresenta um circuito eletrônico capaz de zerar a corrente em um dos dois ramos do reator de comutação de um regulador eletromecânico

convencional. Dessa forma, a mudança de um *tap* para outro, que ainda ocorre de forma mecânica, não interrompe corrente, mitigando, ou até mesmo extinguindo, a presença de arcos elétricos durante as mudanças de *tap*. Essa metodologia não é dependente do conhecimento da passagem por zero da corrente para realizar o chaveamento dos *tap*, não tendo restrição operativa para nenhuma situação de carga e distorção de corrente.

A evolução da tecnologia das chaves estáticas levou a eletrônica de potência ao protagonismo de um novo tipo de regulador de tensão: o regulador totalmente estático. Diversos reguladores deste tipo foram apresentados na literatura nos últimos anos [25-28].

O trabalho [25] apresenta uma simulação computacional de um *DVR* baseado na mudança estática de *taps* de um transformador. As referências [26-27] também propõem equipamentos que utilizam o conceito de chaveamento estático de um transformador para realizar o reforço série na tensão. Nestes três trabalhos, a tensão aplicada ao transformador série é controlada através do chaveamento estático de *taps* de um transformador auxiliar. Assim como em algumas metodologias citadas anteriormente, o controle das chaves estáticas destes artigos é dependente do conhecimento dos instantes de passagem por zero das correntes e das tensões dos tiristores. Caso o acionamento das chaves seja realizado em instante diferente da passagem por zero das suas correntes, o transformador auxiliar pode entrar em curto-circuito ou uma sobretensão perigosa pode aparecer no primário do transformador série devido à sobre-excitação do seu núcleo magnético. Dessa forma, pode-se afirmar que a metodologia em questão pode ter limitações de aplicabilidade em situações onde o instante de passagem por zero da corrente não pode ser tão facilmente definido.

A referência [28] propõe um transformador de dois enrolamentos com regulação estática feita por tiristores em seu primário. Nessa metodologia, o controle deve acionar as chaves em momentos específicos das formas de onda de tensão e corrente dos tiristores, determinados pelo deslocamento angular entre esses dois sinais. De forma semelhante às metodologias anteriores, esse método de chaveamento é altamente dependente da correta medição dos sinais de tensão e corrente das chaves o que, a depender da situação operacional da rede onde o equipamento está instalado, pode ser problemático.

O estudo [29] também apresenta um transformador de dois enrolamentos com regulação estática feita em seu lado primário. Diferentemente de [28], neste artigo, os autores propõem a utilização de *TRIACs* como chaves estáticas, pois os mesmos são dispositivos bidirecionais, o que diminui pela metade a quantidade de chaves estáticas em comparação com um dispositivo que emprega tiristores. Neste trabalho, o controle envia comando para a abertura e fechamento

dos *TRIACs* no instante de passagem por zero de suas correntes, logo, novamente, a medição e a identificação precisa do instante de passagem por zero da corrente das chaves é decisiva para a operação adequada do regulador.

Em [30], os autores também apresentam um regulador estático fundamentado em um transformador de dois enrolamentos. Entretanto, de forma diferente do apresentado em [28] e [29], neste estudo, os autores propõem a utilização de *IGBTs* como chaves estáticas. O emprego desse tipo de chave garante uma maior flexibilidade e segurança nas mudanças de *tap*, uma vez que elas conseguem interromper a sua corrente passante em momentos diferentes da passagem por zero, ao custo de uma sobretensão em seus terminais. No entanto, neste trabalho, os *IGBTs* ainda são chaveados no instante de passagem por zero de sua corrente visando minimizar a sobretensão em seus terminais e aumentar a segurança operativa das chaves. Dessa forma, semelhantemente às diversas metodologias supracitadas, o controle das mudanças de *tap* depende do conhecimento do instante de passagem por zero da corrente das chaves, o que pode ser um fator limitante para a sua aplicação.

A referência [31] apresenta uma metodologia de comutação de *taps* que não é dependente do conhecimento do instante de passagem por zero da corrente, mas somente da polaridade da tensão. Um ponto de atenção em relação à metodologia é que, a depender do defasamento entre tensão e corrente, da tensão do *tap* e da indutância do enrolamento sendo chaveado, os *IGBTs* podem abrir uma corrente elevada, causando sobretensão às chaves, podendo até danificá-las. O trabalho [32] apresenta os resultados da implementação dessa metodologia de chaveamento em uma simulação e um protótipo de 10kV/400V e 500 kVA.

As referências [33-35] avaliam configurações estruturais de reguladores estáticos objetivando otimizar seu projeto, observando a quantidade de chaves de cada arranjo, a quantidade de degraus de tensão e a possibilidade de se atenuar afundamentos e elevações com o mesmo equipamento, por exemplo.

Os trabalhos apresentados em [36] e [37] abordam alguns pontos relativos ao controle de reguladores estáticos, além de confrontar algumas metodologias para medição de amplitude e ângulo de sinais periódicos. Entretanto, um dos focos desta comparação é encontrar uma metodologia ótima para detecção da passagem por zero dos sinais de tensão e corrente. Conforme explanado anteriormente, a dependência do conhecimento da passagem por zero da tensão e da corrente pode ser um fator limitante à aplicação do método de chaveamento em questão.

As dissertações de mestrado [38] e [39] apresentam a concepção de um regulador de tensão estático e o seu controle, respectivamente. São apresentadas três configurações distintas para o circuito de comutação. Dentre os três arranjos, o autor escolhe para aprofundar e explorar computacionalmente um modelo de regulador sem reator de comutação, o que reduz o número de componentes, diminui a quantidade de chaves, aumenta a velocidade de comutação e facilita a lógica do controle; entretanto, a opção escolhida interrompe a tensão e corrente na carga por até 1 ciclo e meio, o que é uma grande fragilidade desta metodologia. Por fim, o controle desenvolvido é testado em protótipos de baixa e de média tensão.

O trabalho desenvolvido em [40] apresenta o protótipo de um regulador estático com a capacidade de aplicar 41 níveis de tensão diferentes à carga (20 degraus positivos, 20 degraus negativos e a posição neutra). Também nesse trabalho, a técnica de chaveamento se baseia na passagem por zero da corrente. O documento não aprofunda no controle desenvolvido para tal equipamento.

O artigo apresentado em [41] aborda a especificação dos componentes de um regulador estático: tiristores, transformador de potência, transformador de corrente e transformador de potencial para duas configurações possíveis de um transformador regulador de 69/34,5 kV e 10 MVA. O trabalho mostra que, dependendo da configuração escolhida, a potência nominal dos componentes pode ser reduzida. O trabalho cita que o regulador proposto tem reatores de comutação para o controle de curto-circuito durante a troca de *taps*; no entanto, o controle do chaveamento não é explorado.

O livro indicado em [42] apresenta a evolução da tecnologia dos reguladores de tensão, abordando os reguladores eletromecânicos, evoluindo para os híbridos e, por fim, avançando para os totalmente estáticos. O documento também trata das configurações das bobinas e chaves, analisando a quantidade de degraus de tensão, número de chaves estáticas empregadas e capacidade de atenuar afundamentos e elevações com o mesmo equipamento. O livro apresenta uma metodologia de chaveamento que é embasada no monitoramento da tensão das chaves, e não da corrente, porém ela necessita de transistores de efeito de campo de óxido de metal semicondutor (*MOSFETs*, em inglês) ou *IGBTs* para conseguir interromper a corrente das chaves a qualquer momento. Ainda de acordo com o documento, realizar a abertura das chaves estáticas na passagem por zero das suas correntes diminui a magnitude das sobretensões em seus terminais, sendo, portanto, recomendado que assim o seja feito. Adicionalmente, o autor indica a instalação de capacitores de amortecimento em paralelo com os terminais de potência das chaves de forma a amenizar tais sobretensões. Por fim, o autor apresenta um

protótipo de RTE com 49 posições (24 para elevar, 24 para rebaixar e o ponto neutro). O protótipo regula a tensão em, aproximadamente, 5 ciclos.

Os artigos indicados em [43] e [44] apresentam uma tecnologia emergente no que tange o assunto regulação de tensão em redes elétricas: o transformador de estado sólido. Tal equipamento é composto por um transformador de alta frequência com conversores eletrônicos conectados em seu primário e secundário. Os conversores do primário transformam a tensão na frequência fundamental em outra, na ordem de kHz. Com isso, o volume do núcleo magnético do transformador diminui drasticamente. Os conversores do secundário retornam a tensão para a frequência fundamental, além de controlar o valor eficaz da mesma, corrigindo VTCDs.

A Tabela I.1 apresenta, de forma resumida, os principais aspectos das metodologias apresentadas ao longo deste capítulo e a nova metodologia de chaveamento desenvolvida e detalhada ao longo deste documento.

Tabela I.1 – Comparação entre as metodologias referenciadas e a nova metodologia de chaveamento proposta.

Referência	Tipo	Medição de corrente	Chaves estáticas utilizadas	Observação
[17-18]	Totalmente estático	Sim	Tiristores	Alta distorção harmônica na tensão
[19-20]	Híbrido	Não	Tiristores	-
[21]	Híbrido	Sim	<i>IGBTs</i> com Tiristores ou <i>IGBTs</i>	-
[22-23]	Híbrido	Sim	Tiristores	-
[24]	Híbrido	Não	Tiristores	-
[25-27]	Totalmente estático	Sim	Tiristores	Necessidade de dois transformadores
[28]	Totalmente estático	Sim	Tiristores	-
[29]	Totalmente estático	Sim	<i>TRIACs</i>	-
[30]	Totalmente estático	Sim	<i>IGBTs</i>	-
[31-32]	Totalmente estático	Não	<i>IGBTs</i>	-
[38-39]	Totalmente estático	Sim	Tiristores	Mudança de <i>tap</i> interrompe a carga por 1,5 ciclo
[40]	Totalmente estático	Sim	Tiristores	-
[41]	Totalmente estático	Não	Tiristores	-
[42]	Totalmente estático	Sim	<i>IGBTs</i>	-
[43-44]	Transformador de estado sólido	Não se aplica	<i>IGBTs</i>	-
Nova metodologia	Totalmente estático	Não	<i>TRIACs</i>	-

1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição desta Tese de Doutorado é a concepção, em ambientes computacional e laboratorial, de um regulador de tensão estático com as características abaixo.

- Regulação de tensão com distorção harmônica baixa;
- Equipamento composto por apenas 1 elemento magnético, no caso 1 autotransformador;
- Chaveamento totalmente estático, sem a presença de chaves eletromecânicas;
- Mudança de *tap* sem desconexão da carga;
- Proposta de uma nova metodologia de chaveamento dependente somente do monitoramento da tensão de saída;
- Emprego de *TRIACs* como chaves estáticas, e não de *IGBTs* ou *MOSFETs*, diminuindo o preço do equipamento;
- Construção de um protótipo de equipamento, de fácil instalação, para atendimento a cargas de baixa tensão sensíveis a VTCDs.

1.3 ESTRUTURA DA TESE DE DOUTORADO

Com o intuito de atender os objetivos estabelecidos, o presente documento de Tese de Doutorado encontra-se estruturado, a partir deste ponto, da seguinte forma:

Capítulo 2 – Apresentação da metodologia de chaveamento e de cálculo dos componentes utilizados na simulação computacional e também no protótipo laboratorial. O objetivo desse capítulo é apresentar qualitativamente o conceito do regulador de tensão estático e seu controle, assim como calcular os parâmetros mais importantes dos elementos e componentes que serão implementados na ferramenta computacional e no protótipo desenvolvido.

Capítulo 3 – Apresentação dos resultados da simulação computacional. Nesse capítulo, serão discutidos os resultados da simulação computacional para diversas mudanças de *tap*. O objetivo desse capítulo é avaliar e ratificar a eficiência da metodologia proposta e também dos componentes especificados

Capítulo 4 – Apresentação dos resultados obtidos durante os testes laboratoriais realizados no protótipo desenvolvido. Esse capítulo tem como objetivo demonstrar na prática a

efetividade da metodologia de chaveamento desenvolvida, tanto do ponto de vista de funcionalidade da mesma quanto da segurança dos componentes e da carga sendo atendida.

Capítulo 5 – Apresentação das conclusões gerais do trabalho.

2. METODOLOGIA DE CHAVEAMENTO PARA REGULADORES DE TENSÃO ESTÁTICOS DE BAIXA TENSÃO

Neste capítulo, será apresentada a metodologia de chaveamento para reguladores de tensão estáticos desenvolvida ao longo do projeto de doutorado. Conforme apresentado no capítulo anterior, os grandes diferenciais da metodologia de chaveamento proposta neste documento são: (i) a independência da medição da corrente nos enrolamentos ou chaves estáticas, o que simplifica o controle e reduz o número de transdutores, e (ii) o emprego de *TRIACs* como chaves, diminuindo o número de circuitos de acionamento e o tamanho do circuito de potência.

Além da metodologia em si, também será apresentada a especificação dos principais componentes do protótipo desenvolvido, visando facilitar o entendimento do novo método de chaveamento para reguladores de tensão de tensão estáticos de baixa tensão.

A nova metodologia de chaveamento foi implementada em um autotransformador monofásico em que a bobina secundária foi dividida em dois enrolamentos com números de espiras diferentes, denominados enrolamentos de *taps* 1 e 2, respectivamente. O esquemático do circuito de potência do regulador é mostrado na Fig. 2.

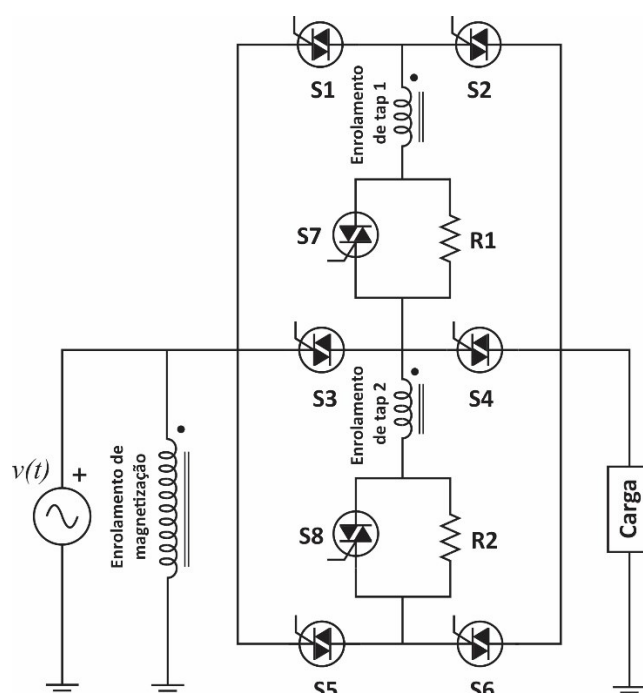


Figura 2 - Esquemático do circuito de potência do regulador de tensão estático desenvolvido.

Os oito *TRIACs* estão enumerados na figura anterior de S_1 a S_8 . Os elementos R_1 e R_2 são resistores, denominados resistores de chaveamento, que entram em operação durante o processo de mudança de *tap*. Eles são os componentes responsáveis pela segurança do chaveamento dos *TRIACs*, encarregados de limitar a magnitude de uma eventual corrente de curto-circuito nos enrolamentos secundários do autotransformador.

A mudança de um *tap* para outro requer o acionamento de um *tap* intermediário, caracterizado pelo acionamento dos referidos resistores de chaveamento. A Tabela II.1 apresenta as chaves acionadas em cada uma das possíveis posições de *taps*.

Tabela II.1 – Chaves estáticas acionadas em cada uma das posições de *tap*.

Tap	Chaves acionadas
0	S_3 e S_4
Intermediário +1	S_2 e S_3
+1	S_2 , S_3 e S_7
Intermediário +2	S_4 e S_5
+2	S_4 , S_5 e S_8
Intermediário +3	S_2 e S_5
+3	S_2 , S_5 , S_7 e S_8
Intermediário -1	S_1 e S_4
-1	S_1 , S_4 e S_7
Intermediário -2	S_3 e S_6
-2	S_3 , S_6 e S_8
Intermediário -3	S_1 e S_6
-3	S_1 , S_6 , S_7 e S_8

Para o arranjo de autotransformador adotado, em que o secundário está dividido em 2 bobinas, 7 posições de *tap* diferentes são possíveis, sendo 3 *taps* elevadores, 3 rebaixadores mais o *tap* 0.

O processo de mudança *tap* demanda o acionamento de um ou de ambos resistores, leia-se acionamento do *tap* intermediário, antes do chaveamento do *tap* final. Ou seja, antes do controle do RTE acionar o *tap* que melhor atenuará uma certa variação de tensão, os resistores de chaveamento são colocados em operação, visando limitar um eventual curto-circuito nas bobinas secundárias. Somente depois de garantir que a corrente das chaves que tiveram seu sinal de *gate* retirado estão efetivamente abertas, o controle aciona o *tap* final, retirando os resistores R_1 e/ou R_2 de operação.

De forma a ilustrar o processo de troca de *tap*, serão apresentadas a seguir as etapas para a transição do *tap* 0 para a posição +1.

Na posição de *tap* 0, de acordo com a Tabela II.1, o RTE está com as chaves S_3 e S_4 fechadas, conforme apresenta a Fig. 3.

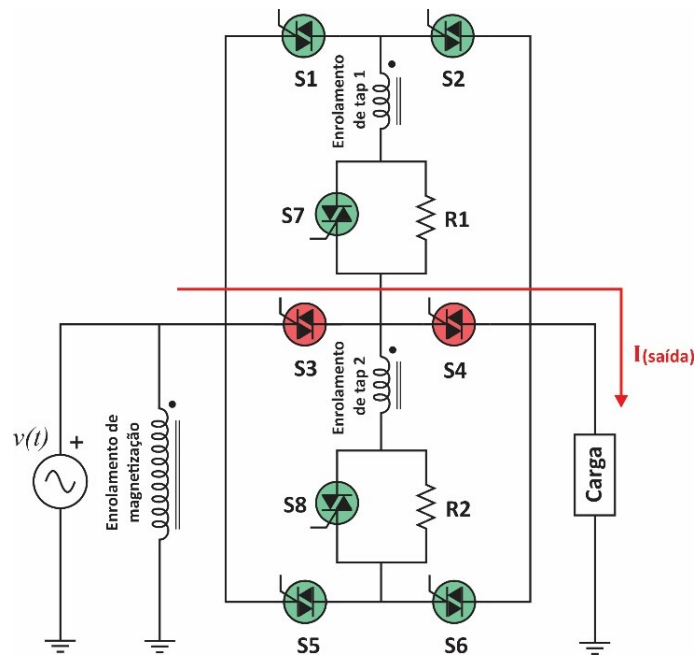


Figura 3 - RTE na posição de *tap* 0.

Na ocorrência de um afundamento que requisita o acionamento do *tap* +1, o controle do regulador determina que o *tap* intermediário +1 seja acionado, fechando as chaves S_3 e S_2 e abrindo S_4 , assim como apresentado na Tabela II.1 e ilustrado na Fig. 4.

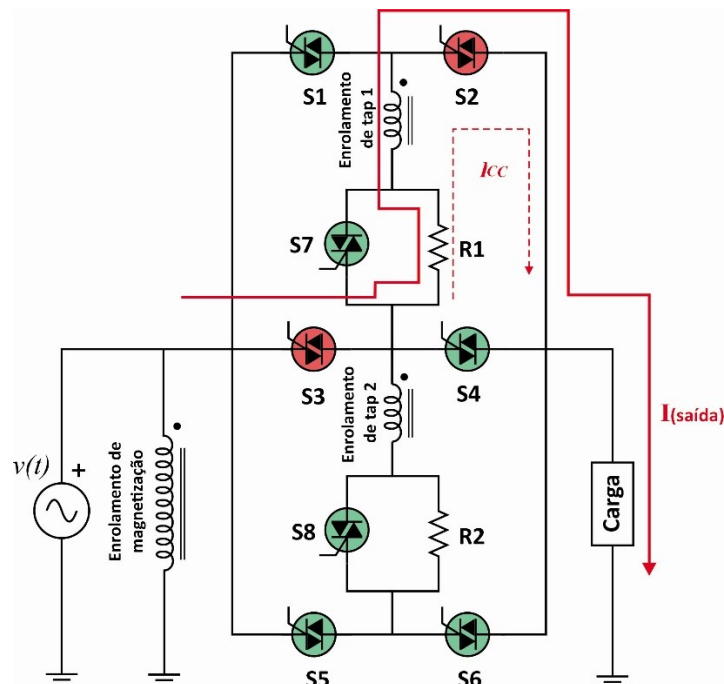


Figura 4 - RTE no *tap* intermediário +1.

No instante em que o controle aciona a chave S_4 e retira o sinal de *gate* de S_2 , a depender da situação, pode ocorrer um curto-circuito da bobina de *taps* 1, indicado na Figura 4 como I_{CC} . Isso ocorre porque a abertura e fechamento das chaves não ocorrem de forma instantânea, aliados ao fato de os *TRIACs* só abrirem efetivamente no instante em que a sua corrente instantânea se reduz além do valor da corrente de manutenção (*holding current*, em inglês) após terem os seus sinais de *gate* retirados. Como a corrente de manutenção é relativamente próxima de zero (máximo de 75 mA para o *TRIAC* especificado), na sequência do documento, visando uma maior clareza nas análises, será considerado que a chave estática irá se abrir quando a sua corrente passar por zero após a chave ter seu sinal de *gate* retirado.

O curto-circuito da bobina de *taps* 1 irá se manter enquanto a chave S_4 não se abrir, ou seja, enquanto a corrente dessa chave não ficar menor do que a sua corrente de manutenção. A magnitude dessa sobrecorrente será determinada por três fatores: a tensão do enrolamento de *taps*, a queda de tensão em condução dos *TRIACs* na malha do curto-circuito e o valor da impedância vista por essa tensão, que é composta pela impedância da bobina de *taps* e da sua respectiva resistência de chaveamento.

De forma a garantir que a chave S_4 se abra efetivamente, o controle do regulador, conforme será apresentado com mais detalhamento ao longo deste capítulo, mantém o *tap* intermediário acionado por $\frac{3}{4}$ de ciclo. Em seguida, a chave S_7 é colocada em operação, retirando o resistor de chaveamento de funcionamento e finalizando a passagem do *tap* 0 para o *tap* +1, conforme apresenta a Fig. 5.

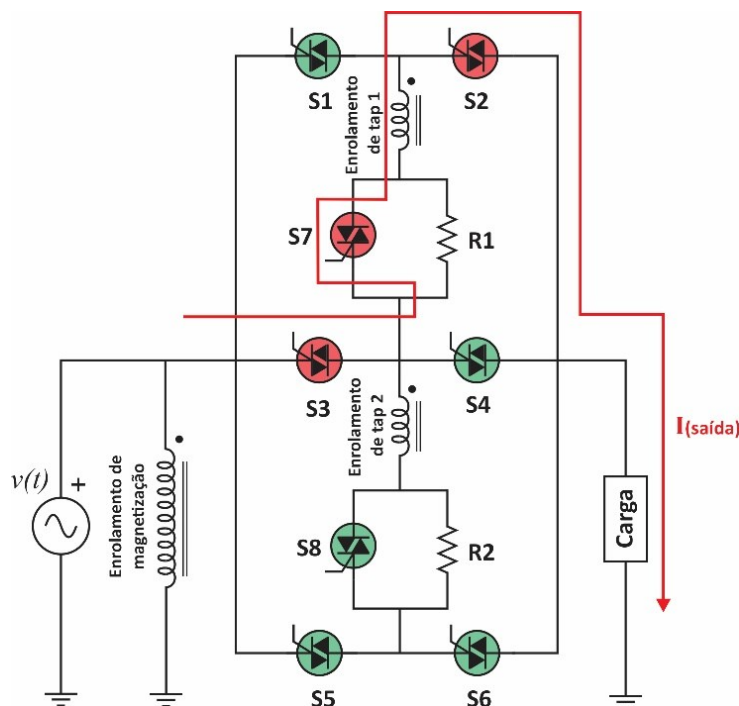


Figura 5 - RTE no $\text{tap} +1$.

A metodologia de chaveamento para todos os *taps* é a mesma da apresentada para a transição do *tap* 0 para o *tap* +1, ou seja, primeiramente aciona-se o *tap* intermediário, aguarda-se $\frac{3}{4}$ de ciclo para as chaves que tiveram seus sinais de *gate* retirados se abrirem e, finalmente, aciona-se o *tap* final.

Na sequência, serão apresentados com maior detalhamento os aspectos do controle do equipamento, assim como da especificação dos componentes do protótipo laboratorial regulador estático desenvolvido.

2.1 AUTOTRANSFORMADOR

O método de regulação de tensão do RTE proposto é baseado no chaveamento de *taps* de um autotransformador. Conforme apresentado anteriormente, para o protótipo desenvolvido, foi adotada a divisão do enrolamento secundário do equipamento em 2 parcelas, de modo a se obter 6 posições de compensação diferentes: 3 para elevar e 3 para rebaixar a tensão, fora a posição neutra.

Segundo a referência [45], na década de 90, nos EUA, 92% de todos os eventos relativos à qualidade da energia elétrica estavam relacionados a afundamentos de tensão com magnitude de até aproximadamente 50% e duravam menos de 2 segundos. Por essa razão, a correção de VTCDs muito severas e duradouras não apresenta uma relação custo/benefício

satisfatória, uma vez que elas são menos comuns e necessitam de modificações relativamente grandes nos equipamentos reguladores para alcançá-las. Dito isso, o regulador estático de tensão proposto não terá a capacidade de corrigir eventos muito severos.

A bobina de *taps* 1 do autotransformador tem tensão nominal igual a 0,15 pu, enquanto que bobina 2 apresenta tensão nominal igual a 0,25 pu, tomando como base a tensão primária do equipamento, igual a 127 V. Entretanto, tanto o número de enrolamentos de *taps* quanto as tensões nominais de cada bobina podem ser alterados de acordo com a necessidade de cada aplicação. Um número maior de bobinas secundárias reflete em uma quantidade maior de degraus de compensação de tensão.

Diante do exposto, determinou-se que a compensação máxima do regulador projetado vale 30%, de forma que afundamentos com magnitude igual a 0,7 p.u. (tensão residual) retornem para 1,0 p.u., desconsiderando a queda de tensão nas bobinas do autotransformador e nas chaves estáticas. Esse valor foi escolhido porque, para se obter a compensação supracitada, é necessário que a bobina primária e a bobina de *taps* tenham relação de transformação igual a 1,0/0,4. Para essa relação de espiras, no caso de um afundamento de tensão que demande que o RTE acione a sua bobina de *taps* inteira (*tap* +3), no instante em que a tensão da fonte retorna ao seu valor nominal, a carga ficará submetida a 1,4 p.u. de tensão por alguns ciclos, conforme será apresentado mais à frente.

Conforme será apresentado ao longo do trabalho, o controle do equipamento é capaz de atuar e realizar as mudanças de *tap* em menos de 4 ciclos da tensão fundamental. Dessa forma, para a situação supracitada, pode-se afirmar que a carga irá ser submetida a uma sobretensão de 1,4 pu de magnitude com duração menor que 4 ciclos.

Estudos mais recentes que investigaram as suportabilidades térmica e dielétrica de equipamentos domésticos mostraram que eventos com duração de 4 ciclos apresentam limites de suportabilidade muito maiores do que 1,4 pu.

O trabalho apresentado em [46] testou um televisor de tubo, assim como um equipamento de som, os quais suportaram 3,0 p.u. de tensão durante um intervalo de tempo de 2 ciclos. Em [47], os limites de suportabilidade foram de 2,0 p.u. por 0,5 segundo e 1,80 p.u. por 4,8 segundos para um computador com e sem estabilizador de tensão, respectivamente. O documento [48] apresenta as curvas de suportabilidade para televisores de tubo e, dentre todos os equipamentos ensaiados, o mais sensível apresentou avaria somente quando a tensão de 1,9 p.u. se manteve por mais de 0,27 segundo. Por fim, o documento [49] apresenta testes de suportabilidade realizados em diversos equipamentos, nos quais os limites encontrados foram:

2,4 p.u. por 5 segundos para um televisor de LED, 2,4 p.u. por 9,9 segundos para um refrigerador, 2,4 p.u. por 3,8 segundos para um freezer, 1,4 p.u. por 10 segundos para uma máquina de lavar roupas, 3,2 p.u. por 5 segundos para uma máquina de lavar louças e 1,75 p.u. por 10 segundos para um equipamento de ar-condicionado do tipo *split*.

Dessa forma, não são esperadas falhas ou danos às cargas quando submetidas a sobretensões de 1,4 pu de magnitude com duração menor que 4 ciclos. De qualquer forma, se for desejado aumentar a margem de segurança operacional dos equipamentos supridos pelo RTE, e/ou fazer uma regulação de tensão mais fina, pode-se reduzir a tensão nominal dos *taps* ao custo de uma redução da sua faixa de regulação.

A Tabela II.2 apresenta os parâmetros do autotransformador que foi usado no protótipo e que será utilizado também nas simulações computacionais. As impedâncias do núcleo e dos enrolamentos foram levantadas através dos ensaios a vazio e em curto-circuito, respectivamente. A impedância percentual dos enrolamentos foi dividida igualmente entre primário e secundário, enquanto que a impedância do secundário foi fragmentada proporcionalmente entre as duas bobinas de *taps*.

Tabela II.2 – Parâmetros elétricos do autotransformador utilizado no protótipo e nas simulações.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	1,5 kVA
Tensão nominal do enrolamento de magnetização	127 V (1,00 pu)
Impedância do enrolamento de magnetização	0,4051 + j0,5321 %
Tensão nominal do enrolamento de <i>taps</i> 1	19,05 V (0,15 pu)
Impedância do enrolamento de <i>taps</i> 1	0,1519 + j0,1995 %
Tensão nominal do enrolamento de <i>taps</i> 2	31,75 V (0,25 pu)
Impedância do enrolamento de <i>taps</i> 2	0,2532 + j0,3325 %
Tensão nominal do enrolamento de <i>taps</i> inteiro	50,8 V (0,40 pu)
Resistência do núcleo em paralelo	75,669 %
Reatância indutiva do núcleo em paralelo	24,225 %
Frequência nominal	60 Hertz
Número de fases	1

2.2 RESISTORES DE CHAVEAMENTO

Os resistores de chaveamento R_1 e R_2 apresentados na Figura 2 são os componentes responsáveis por limitar a corrente em eventuais curtos-circuitos dos enrolamentos de *taps*, que podem ocorrer no processo de mudança de posição do RTE. Tais componentes foram especificados para limitar a corrente de curto-circuito nesses enrolamentos a, no máximo, 3 pu quando a tensão de entrada for igual a 1,4 pu, logo:

$$R_1 = \frac{V_{entrada} \times V_{tap1}}{I_{CC}} = \frac{1,4 \times 0,15}{3} = 0,070 \text{ pu} = 0,753 \Omega \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{V_{entrada} \times V_{tap2}}{I_{CC}} = \frac{1,4 \times 0,25}{3} = 0,117 \text{ pu} = 1,258 \Omega \quad (2)$$

Os valores adotados como base são referentes ao enrolamento primário.

Onde:

- R_1 é o valor de resistência do resistor de chaveamento do enrolamento de *taps* 1;
- V_{tap1} é a tensão nominal do enrolamento de *taps* 1, em pu;
- R_2 é o valor de resistência do resistor de chaveamento do enrolamento de *taps* 2;
- V_{tap2} é a tensão nominal do enrolamento de *taps* 2, em pu;
- $V_{entrada}$ é a tensão de entrada do regulador estático, em pu;
- I_{CC} é a corrente de curto-circuito máxima nas bobinas, em pu;

No protótipo desenvolvido, assim como nas simulações que serão apresentadas, foram utilizados resistores comerciais de 100 W com valores iguais a 1,0 e 2,0 ohms para R_1 e R_2 , nesta ordem. É importante observar que os resistores de chaveamento somente estarão conduzindo corrente durante o funcionamento dos *taps* intermediários, que ficam acionados apenas por $\frac{3}{4}$ de ciclo.

2.3 CHAVES ESTÁTICAS

Os semicondutores empregados na metodologia de chaveamento proposta foram *TRIACs*. A escolha desse tipo de chave teve como fundamentos (i) o fato da mesma ser

bidirecional, reduzindo pela metade a quantidade de chaves e circuitos de acionamento, (ii) o seu custo mais baixo quando comparado com chaves como *IGBTs* ou transistores de efeito de campo, (iii) e a simplicidade do controle das mesmas, uma vez que o sinal em seu *gate* pode ser retirado a qualquer momento da forma de onda da corrente passante sem o perigo de uma sobretensão em seus terminais, como no caso dos *IGBTs*, por exemplo.

Os *TRIACs* utilizados no protótipo foram do modelo BTA24. Os parâmetros principais dessas chaves estão apresentados na Tabela II.3.

Tabela II.3– Parâmetros elétricos do *TRIAC* BTA24 utilizado no protótipo.

Parâmetro	Valor
Corrente eficaz máxima	25 A
Tensão de pico repetitiva no estado aberto	600V
Corrente de pico não repetitiva no estado fechado com o encapsulamento a 75° C	100A
Máxima queda de tensão em condução	1,55 V
Resistência do circuito de amortecimento (<i>snubber</i>)	100 Ω
Capacitância do circuito de amortecimento (<i>snubber</i>)	10 μ F

Os resistores e capacitores dos circuitos de amortecimento, que formam ramos RC série, são conectadas em paralelo com cada uma das 8 chaves. O cálculo dos valores da resistência e da capacitância foram feitos de acordo com a referência [50].

2.4 CONTROLE DO REGULADOR DE TENSÃO ESTÁTICO

A tensão de saída do RTE é a única grandeza utilizada pelo controle para realizar as mudanças de *tap*. Diferentemente dos métodos de chaveamento empregados em reguladores estáticos apresentados na literatura técnica, a metodologia aqui desenvolvida não necessita da medição da corrente em nenhum ponto do circuito para realizar as mudanças de *tap*.

A tensão de saída do regulador é condicionada por uma placa de condicionamento de sinais, responsável por transformar a tensão secundária do RTE, que é alternada e tem valor eficaz nominal igual a 127 V, em um sinal contínuo, que varia, no máximo, entre 0 e 3 V. A tensão condicionada é, então, aplicada à entrada do conversor analógico-digital (AD) do microcontrolador.

O microcontrolador utilizado no protótipo foi o LAUNCHXL-F28379D da Texas Instruments. A tensão condicionada é amostrada pelo conversor AD de 12 *bits* do microcontrolador a uma taxa amostral de, aproximadamente, 64 amostras por ciclo de 60 Hz, visto que a frequência do *clock* do microprocessador é igual a 200 MHz.

Com o sinal de tensão amostrado, o CPU do microcontrolador calcula a tensão eficaz da saída do RTE usando janelas de 1 ciclo com deslizamento amostral de $\frac{1}{2}$ ciclo.

Uma vez que o sinal de tensão eficaz é conhecido, o microcontrolador envia sinais lógicos a 8 de suas saídas, sinais estes que serão utilizados para acionar os *TRIACs* enumerados de S_1 a S_8 . Os sinais nos *gates* dos *TRIACs* são efetivamente aplicados através de transformadores de pulso com relação de transformação 1:1, que têm como objetivo isolar galvanicamente os *gates* das chaves do restante do circuito de controle.

O sinal de entrada dos transformadores de pulso é uma combinação das saídas do microcontrolador e um trem de pulso de 10,7 kHz. Esses dois sinais são aplicados a 8 portas lógicas NOR. A Figura 6 apresenta o esquemático do circuito de controle descrito acima.

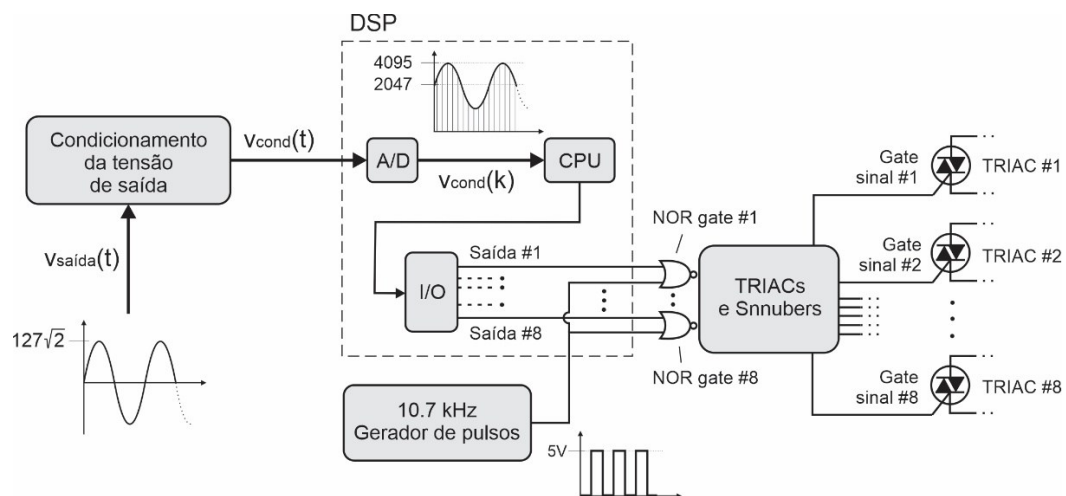


Figura 6 - Esquemático do circuito de controle do RTE.

Como a tensão eficaz de saída do RTE é calculada com $\frac{1}{2}$ ciclo de deslizamento amostral, o equipamento pode demorar, em um caso extremo, até 1,5 ciclo para detectar uma variação de tensão, a depender do instante na forma de onda da tensão onde evento ocorreu e também da sua severidade. De forma geral, quanto mais a magnitude da tensão de saída se afastar da tensão de referência, mais rapidamente o valor da tensão eficaz sairá da faixa adequada e, por consequência, mais depressa o controle do RTE irá detectar o evento e iniciar uma troca de *tap*.

De forma a se obter um valor eficaz mais preciso do evento, assim que a tensão eficaz de saída fica fora da faixa adequada, o controle aguarda $\frac{1}{2}$ ciclo para recalcular e atualizar o valor eficaz da tensão e tomar a decisão de qual *tap* será acionado. O motivo para tal é que, devido ao deslizamento amostral de $\frac{1}{2}$ ciclo no cálculo da tensão eficaz, o valor computado pode estar considerando muitas amostras anteriores ao início do evento. Isso resultaria em um valor intermediário entre a tensão eficaz de antes e de durante a variação de tensão.

Após a determinação do *tap* a ser colocado em operação, o controle aciona o *tap* intermediário antes de passar para a posição de *tap* final. Conforme exposto anteriormente, como os *TRIACs* somente se abrem efetivamente quando a sua corrente passa por zero, aliado ao fato da abertura e fechamento das chaves não ser idealmente instantânea, é possível que ocorra um curto-circuito nas bobinas secundárias durante a mudança de *tap*. Considerando um circuito de baixa tensão, em que a relação de X/R dos cabos tende a ser próxima de 1, eventuais correntes de curto-circuito passantes pelo regulador não terão componente contínua expressiva [51], logo, o curto-circuito dos enrolamentos de *taps* terá duração máxima de $\frac{1}{2}$ ciclo, que é o maior tempo que essa sobrecorrente levará para passar por zero e o *TRIAC* ser realmente aberto. Sendo assim, de forma a garantir que a corrente passe por zero e a chave seja aberta, o controle mantém o regulador durante $\frac{3}{4}$ de ciclo na posição de *tap* intermediária antes de acionar o *tap* final.

Em algumas situações, principalmente naquelas em que o RTE retorna à posição de *tap* 0, o curto-circuito das bobinas de *taps* irá acontecer no instante de ativação do *tap* final e não no acionamento do *tap* intermediário. Dessa forma, após o envio dos sinais para o acionamento do *tap* final, a corrente de curto-circuito das bobinas pode levar mais $\frac{1}{2}$ ciclo para ser extinta e, por consequência, a mudança de *tap* ser concluída.

No pior caso, a mudança de *tap* leva em torno de 3,5 ciclos para ser concluída, conforme será mostrado nos Capítulos 3 e 4, que apresentam as simulações computacionais e os testes laboratoriais realizados no protótipo desenvolvido, respectivamente.

É importante salientar que a mudança de *taps* de posições positivas para negativas, e vice-versa, requer que o RTE sempre passe pelo *tap* 0 antes de reverter a polaridade da tensão de compensação, uma vez que os enrolamentos de *taps* utilizados para elevar ou reduzir a tensão são os mesmos, apenas ligados com a polaridade invertida.

Finalmente, após toda mudança de *tap*, espera-se 2 ciclos antes de realizar um novo chaveamento, de forma que a tensão e corrente da carga se estabilizem em um novo patamar antes de uma nova troca de *tap*, caso necessária.

O fluxograma do algoritmo das mudanças de *tap* do RTE desenvolvido é apresentado na Fig. 7.

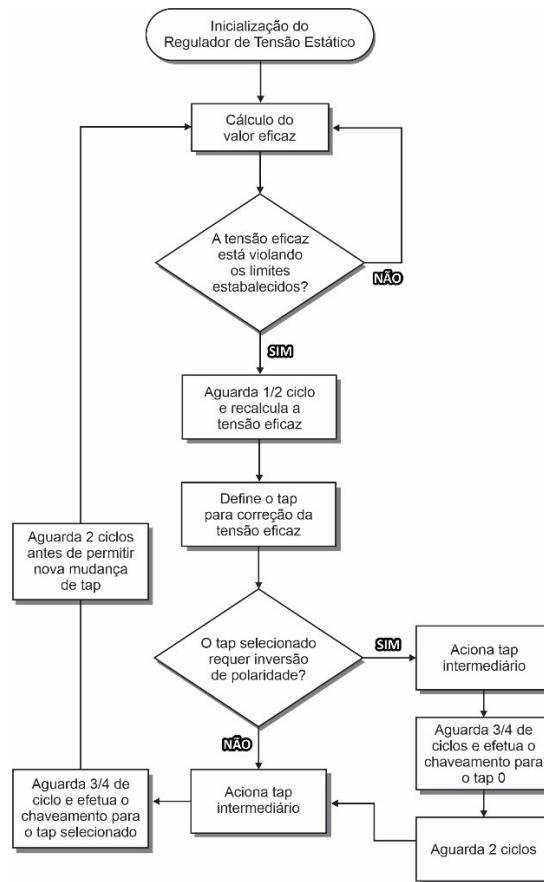


Figura 7 - Fluxograma do circuito de controle do RTE.

O acionamento dos *gates* dos *TRIACs* depende do *tap* a ser acionado pelo RTE. O *tap* a ser colocado em operação é calculado através das equações a seguir:

$$V_{saida} = V_{entrada} \times (V_{tap_atual} + 1) \quad (3)$$

Isolando-se a tensão de entrada, têm-se:

$$V_{entrada} = \frac{V_{saida}}{(V_{tap_atual} + 1)} \quad (4)$$

A tensão de referência especificada no controle do RTE é resultado da soma da tensão de entrada, determinada pela rede elétrica, com uma tensão de compensação, responsável por fazer a tensão de saída atingir o valor de referência, conforme apresenta a equação a seguir:

$$V_{refpu} = V_{entrada} \times (V_{tap_futuro} + 1) \quad (5)$$

Substituindo (4) em (5), e isolando-se a tensão de compensação, têm-se:

$$V_{tap_futuro} = \frac{V_{ref} \times (V_{tap_atual} + 1)}{V_{saída}} - 1 \quad (6)$$

Onde:

- $V_{saída}$ é a tensão eficaz de saída do regulador, em pu;
- $V_{entrada}$ é a tensão eficaz de entrada do regulador, em pu;
- V_{tap_atual} é a tensão nominal do tap acionado, em pu;
- V_{ref} é a tensão de referência, em pu (valor adotado igual a 1,0).
- V_{tap_futuro} é a tensão de compensação necessária para atingir V_{ref} , em pu.

Nota-se, através da equação (3), que a tensão de saída é dependente da tensão de entrada, uma vez que o aparato regulador é um autotransformador e as tensões em suas bobinas de *taps* são induzidas pelo enrolamento primário.

Observa-se, por intermédio da equação (6), que a tensão de compensação, aqui denominada de V_{tap_futuro} , é uma função contínua. No entanto, as tensões dos *taps* disponíveis são degraus (-0,40, -0,25, -0,15, 0,0, 0,15, 0,25 e 0,40 pu). Dessa forma, faz-se necessário definir faixas de tensão de compensação para cada um dos *taps* à disposição.

Por fim, mesmo o RTE sendo fisicamente capaz de acionar os *taps* -2 e -3, conforme apresentado na Tabela II.1, os mesmos foram desativados no controle do protótipo. A razão para tal é que as tensões de compensação nominais desses *taps* são iguais a -0,25 e -0,40 respectivamente. No instante em que a tensão de entrada retorna ao seu valor nominal, a carga iria sentir um afundamento de 0,75 ou 0,60, respectivamente.

Adicionalmente, essas duas posições de *tap* só seriam acionadas em elevações muito severas, atípicas em redes de distribuição reais. Por exemplo, considerando o regulador no *tap* 0, para o controle detectar a necessidade de acionamento do *tap* -2, seria necessário que a tensão na saída chegasse a, no mínimo, 1,33 pu, calculada a partir da equação (6):

$$-0,25 = \frac{1 \times (0 + 1)}{V_{saída}} - 1 \quad (7)$$

$$V_{saída} = 1,33 \text{ pu} \quad (8)$$

O acionamento do *tap* -3 requer que a tensão fique acima de 1,67 pu. Dessa forma, os dois *taps* foram desativados do controle e as eventuais elevações acima de 1,33 pu, que demandariam o acionamento de um desses dois *taps*, serão parcialmente corrigidas pelo *tap* -1.

Dito isso, as faixas de tensão de compensação versus *taps* a serem acionados são aquelas apresentadas na Tabela II.4.

Tabela II.4 – *Taps* a serem acionados de acordo com a tensão de compensação calculada.

Tap	Tap acionado
$V_{\text{tap_futuro}} > 0,40$	+3
$0,40 \geq V_{\text{tap_futuro}} > 0,15$	+2
$0,15 \geq V_{\text{tap_futuro}} \geq 0$	+1
$0,10 > V_{\text{tap_futuro}} > -0,10$	0
$V_{\text{tap_futuro}} \leq -0,10$	-1

2.5 PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DO RTE

No protótipo desenvolvido, além dos componentes descritos ao longo deste capítulo, foram adicionadas algumas proteções contra sobrecorrente ao longo do circuito de potência. Cada um dos dois enrolamentos de *taps* teve um fusível conectado em série consigo e um terceiro fusível foi instalado na entrada do RTE como proteção geral do autotransformador.

Os fusíveis utilizados no protótipo foram do tipo diazed categoria gG. Como o objetivo dos testes laboratoriais foi o de validar a metodologia de chaveamento, apenas, os ensaios de bancada foram realizados com corrente relativamente baixa, de forma a não elevar a temperatura dos *TRIACs* e do autotransformador a seus valores nominais. A maior corrente eficaz de carga dos ensaios foi igual a 2 A (17% da corrente nominal do autotransformador), registrada no ensaio em que o RTE estava alimentando uma carga resistiva. Dessa forma, a princípio, a corrente nominal dos dois fusíveis de proteção dos enrolamentos de *taps* foi igual a 6 A.

Substituindo os valores de R_1 (1,0 Ω) e R_2 (2,0 Ω) nas equações (1) e (2), obtém-se que as correntes de curto-circuito máximas nos enrolamentos de *taps* 1 e 2, considerando uma

sobretensão de 1,4 pu na entrada do regulador, valem 26,67 e 22,23 A, respectivamente. Conforme apresentado neste capítulo, e que será ratificado ao longo dos próximos, a corrente de curto-circuito das bobinas de *taps* tem duração máxima igual a $\frac{1}{2}$ ciclo (8,33 ms).

A maior corrente de curto-circuito dos enrolamentos secundários (26,67 A) somada à corrente de carga (2 A) pode chegar a, aproximadamente, 29 A e dura, no pior caso, $\frac{1}{2}$ ciclo. Essa relação de tempo por corrente pode ser observada na curva de fusão dos fusíveis de 6 A, apresentada na Fig. 8.

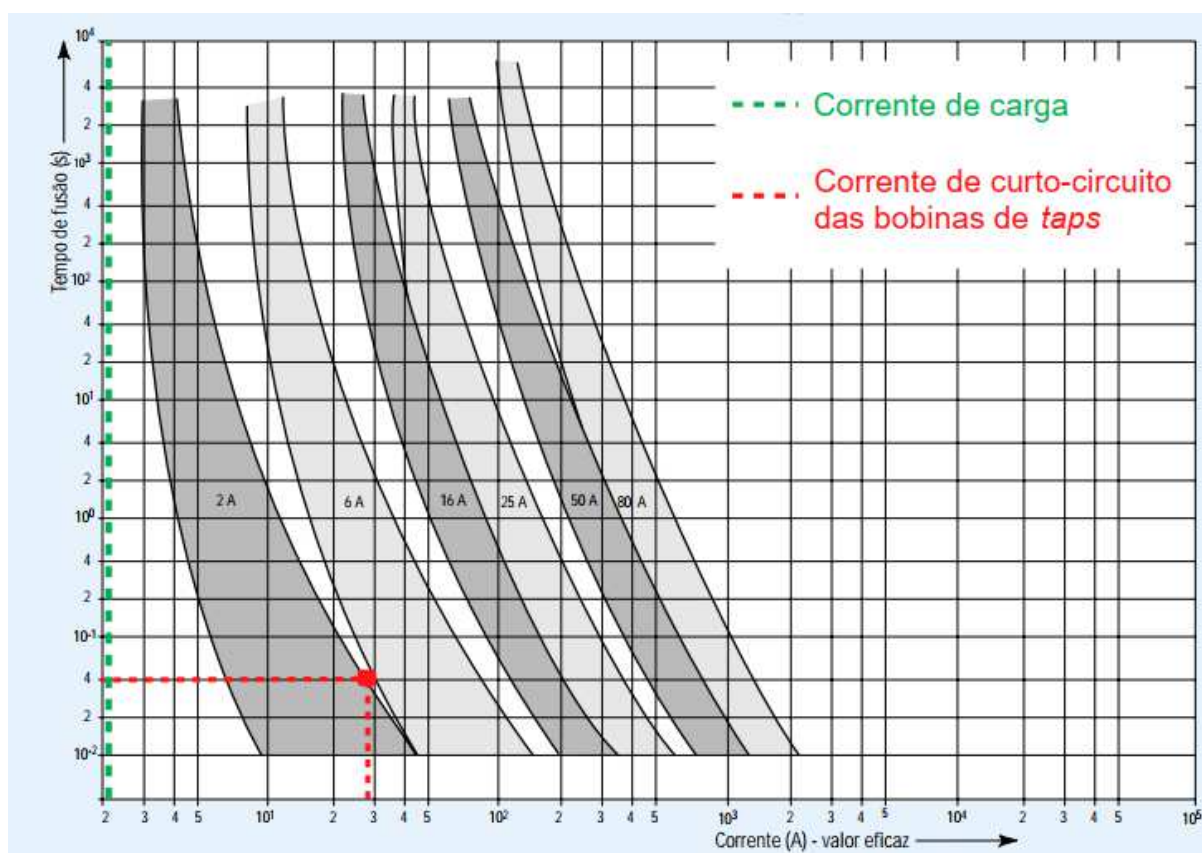


Figura 8 - Curva tempo x corrente dos fusíveis de 6 A utilizados no protótipo.

Conforme mostrado na Fig. 8, os fusíveis de 6 A irão levar, no mínimo, 40 ms para fundir com uma corrente de 29 A, garantindo uma certa folga de tempo para o chaveamento de *taps* ocorrer.

Visando garantir a seletividade da proteção, o fusível na entrada do RTE teve corrente nominal igual a 10 A.

Diante do exposto, nota-se que a proteção de sobrecorrente projetada teve como objetivo único e exclusivo a proteção do autotransformador para a condição de carregamento dos testes laboratoriais.

As proteções contra sobretensões, sobrecorrentes na carga e outros tipos de eventos cotidianos em redes elétricas não foram exploradas neste trabalho, mas são um dos objetivos da continuação da pesquisa, que visa a construção de um protótipo comercial para ser aplicado em redes de distribuição reais.

2.6 ACIONAMENTOS DO RTE

O acionamento do protótipo do RTE é feito através de dois dispositivos ligados em série: um disjuntor monopolar de 20 A e um contator monofásico de corrente nominal igual a 18 A.

No protótipo desenvolvido, a função de proteção do disjuntor é apenas de retaguarda do fusível de 10 A, sendo, *a priori*, responsável apenas pelo acionamento manual do RTE.

O contator, que é conectado em série após o disjuntor, é responsável pelo acionamento automatizado do RTE. O sinal de comando do contator é enviado pelo microprocessador.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

A Figura 9 apresenta a vista superior do protótipo laboratorial desenvolvido. Os parâmetros elétricos dos componentes do RTE são os mesmos apresentados ao longo deste capítulo, os quais também foram considerados na simulação computacional apresentada no Capítulo 3.

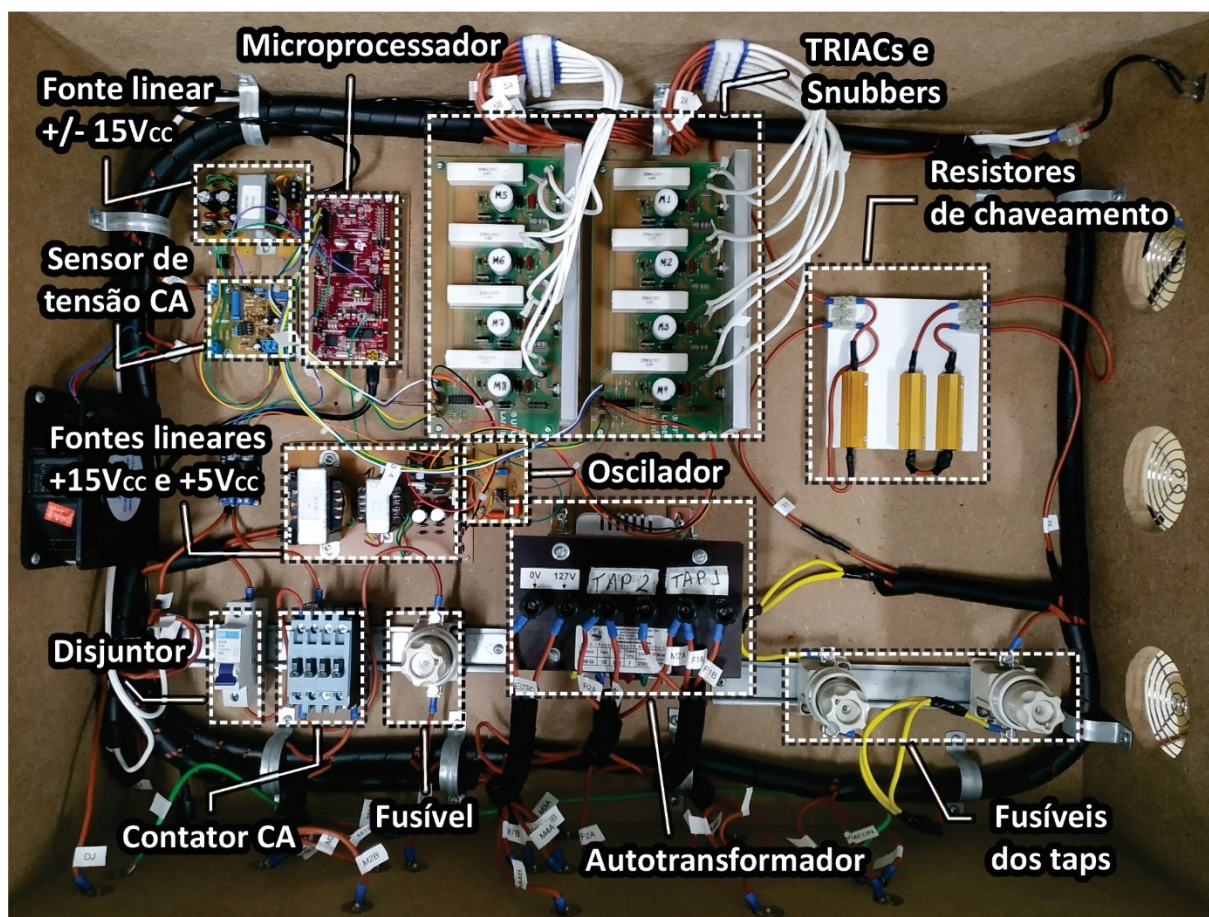


Figura 9 - Vista superior do protótipo do regulador de tensão estático desenvolvido.

3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO REGULADOR DE TENSÃO ESTÁTICO

A primeira validação da metodologia de chaveamento de *taps* proposta e da especificação dos componentes apresentada no Capítulo 2 foi feita através de simulações computacionais.

A plataforma escolhida para realizar as simulações foi o ambiente Simulink/MATLAB. As simulações tiveram como objetivo avaliar o desempenho do RTE em todas mudanças de *taps* possíveis, fornecendo embasamento teórico/prático e segurança para a construção do protótipo que será apresentado no Capítulo 4.

O esquemático simplificado do sistema simulado no Simulink/MATLAB é apresentado na Fig. 10. Os elementos responsáveis pelo controle, os sinais de *gate* dos TRIACs, os circuitos de amortecimento, assim como os elementos gráficos responsáveis pela visualização dos sinais de tensão e corrente não estão apresentados na imagem a seguir de forma a facilitar a visualização do circuito.

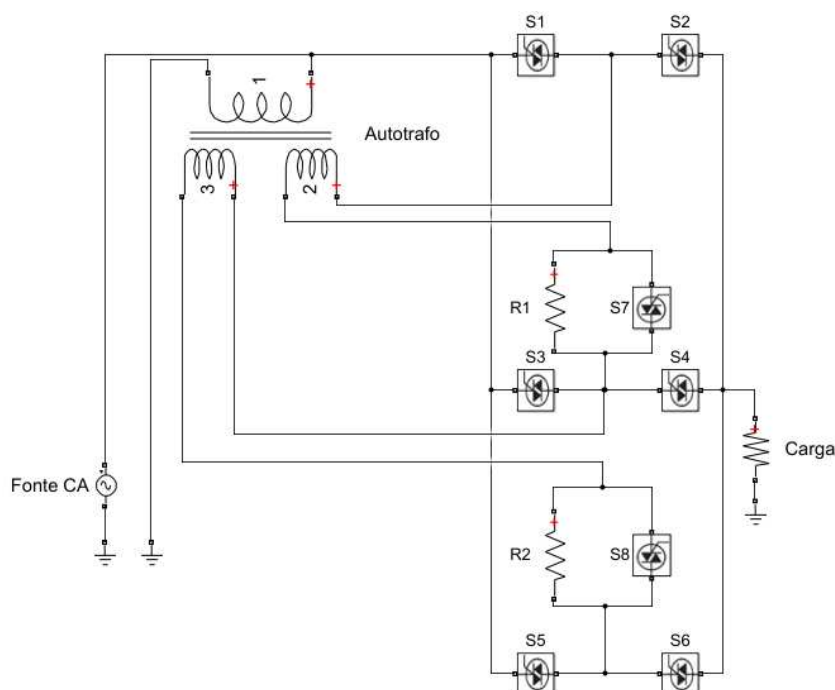


Figura 10 - Esquemático simplificado do sistema simulado na plataforma Simulink/MATLAB.

Os parâmetros dos componentes implementados na simulação computacional são os mesmos descritos no Capítulo 2.

É importante salientar que a plataforma computacional utilizada não tem o componente TRIAC em sua biblioteca, logo, as chaves estáticas foram simuladas por 2 tiristores em antiparalelo que são acionados ao mesmo tempo.

De forma a validar a efetividade da nova metodologia de chaveamento desenvolvida, foram aplicadas diversas variações momentâneas de tensão com duração de 15 ciclos à entrada do RTE. Os valores das tensões eficazes de todos os eventos, assim como o *tap* a ser acionado em cada um deles, são apresentados na Tabela III.1. Vale salientar que todos os eventos da referida tabela serão replicados nos testes laboratoriais. Por fim, a tensão antes e após os eventos é mantida em 127 V.

Tabela III.1 – *Taps* a serem acionados de acordo com a tensão de entrada do RTE – Simulações computacionais considerando-se a aplicação de variações momentâneas de tensão.

Evento	Tensão de entrada	Duração (ciclos)	<i>Tap</i> acionado
-	127V (1,00 pu)	-	0
I	112 V (0,88 pu)	15	+1
II	100 V (0,79 pu)	15	+2
III	88 V (0,69 pu)	15	+3
IV	150 V (1,18 pu)	15	-1

As variações momentâneas de tensão serão aplicadas em quatro condições de carregamento diferentes: RTE a vazio, alimentando carga puramente resistiva, suprimindo carga não linear (distorção harmônica de corrente) e alimentando carga puramente indutiva.

3.1 SIMULAÇÕES COM O RTE OPERANDO A VAZIO

A condição a vazio foi a primeira situação de carregamento do RTE simulada. O desempenho do regulador foi simulado e avaliado para todos os eventos da Tabela III.1, no entanto, nesta subseção, somente serão apresentados os resultados do afundamento mais severo (evento III) e da elevação de tensão (evento IV). Todas as variações de tensão ocorreram no instante de tempo da forma de onda de tensão correspondente a 60°.

As tensões na entrada e na saída do RTE durante o evento III da Tabela III.1 estando o regulador a vazio, são apresentadas na Fig. 11.

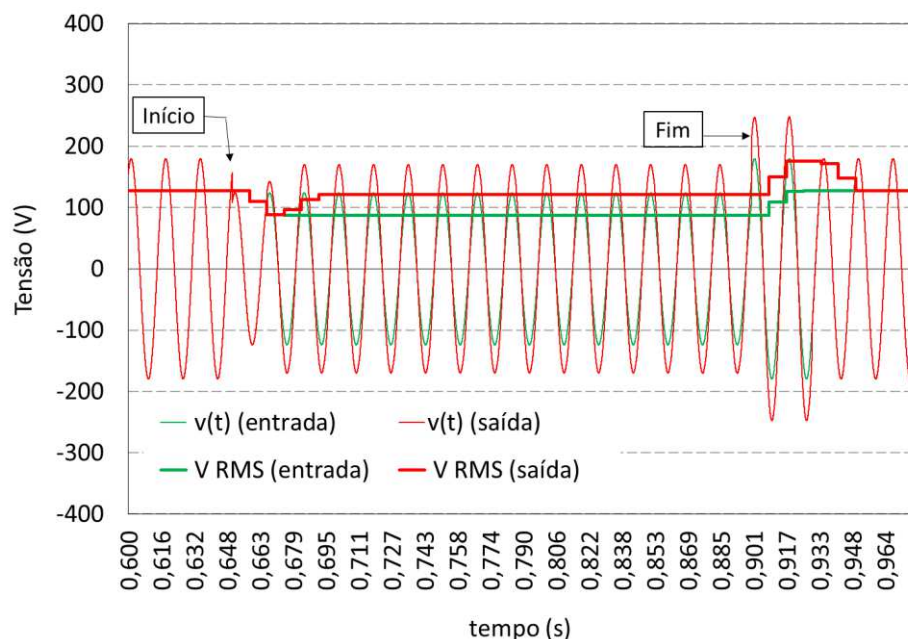


Figura 11 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,69 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento III da Tabela III.1) - Regulador a vazio.

Em primeiro lugar, observa-se que a variação de tensão no início do evento foi corrigida em menos de 2 ciclos, elevando a tensão na saída do RTE de 0,69 pu para 0,95 pu através do acionamento do *tap* +3. Ao final do evento, quando a tensão de entrada do equipamento retorna ao seu valor nominal, como consequência da ativação do *tap* +3, a tensão de saída sofreu uma elevação de 1,38 pu enquanto o regulador não retornou ao seu *tap* 0, o que, para este caso, levou menos de 2 ciclos para ocorrer. Conforme citado anteriormente, não são esperados danos a equipamentos quando submetidos a sobretensões de 1,4 pu por períodos de tempo menores que 4 ciclos.

As correntes na entrada, saída e nos 2 enrolamentos de *taps* durante esse evento são mostradas na Fig. 12.

Observa-se que mesmo o regulador estando a vazio, houve curto-circuito da bobina de *taps* 2 no processo de acionamento do *tap* +3. O maior valor de pico da corrente no enrolamento de *taps* 2 foi igual a 14,03 A. Lançando mão da equação (2) e considerando a tensão de entrada igual a 0,69 pu, calcula-se que o valor de pico da corrente de curto-circuito esperado seria de 15,49 A, considerando-se sinais puramente senoidais. A diferença entre as correntes calculada e simulada ocorreu devido ao fato da equação (2) não levar em consideração a impedância dos enrolamentos do autotransformador e a queda de tensão nos TRIACs, que entram em condução durante o curto-circuito.

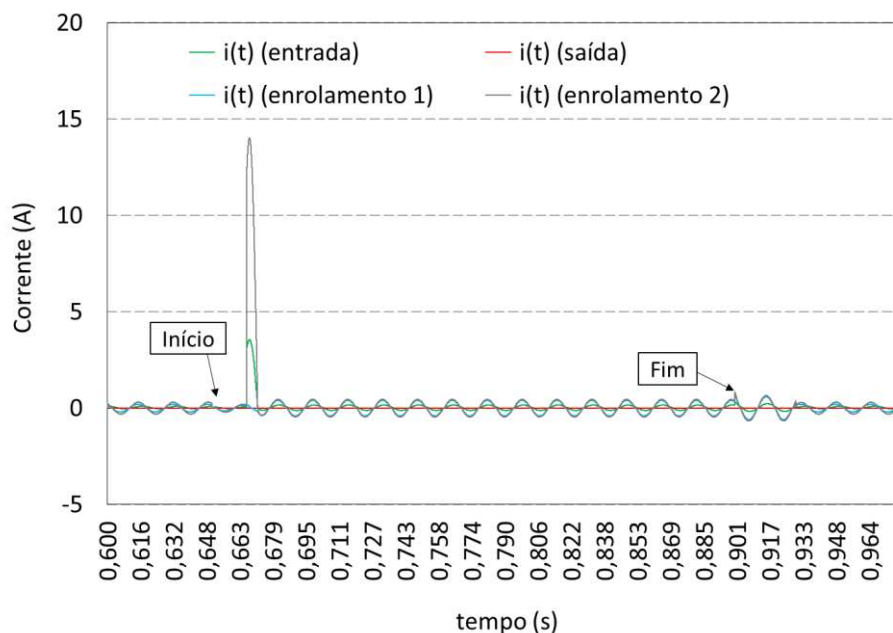


Figura 12 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,69 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento III da Tabela III.1) - Regulador a vazio.

De qualquer forma, o resistor de chaveamento, especificamente o resistor R_2 neste caso, diminuiu a corrente de curto-circuito de acordo com o projetado, garantindo a segurança operativa das chaves e do autotransformador. Adicionalmente, conforme mencionado no capítulo anterior, essa sobrecorrente irá se manter apenas por, no máximo, $\frac{1}{2}$ ciclo. No caso apresentado, o curto-circuito no início do evento durou $\frac{1}{4}$ de ciclo, enquanto que o retorno do regulador ao *tap* 0 não causou curto-circuito em nenhum dos dois enrolamentos de *taps*.

A Tabela III.2 apresenta o instante de tempo em que ocorreram as 6 etapas da troca de *tap*: início da variação de tensão, detecção do evento pelo controle, envio do sinal para acionamento do *tap* intermediário, acionamento efetivo do *tap* intermediário (extinção do curto-circuito, quando ocorrer), envio do sinal para acionamento do *tap* final e acionamento efetivo do *tap* final (extinção do curto-circuito, quando ocorrer).

Nota-se que a ativação do *tap* intermediário +3 no início do evento já foi capaz de compensar a tensão da saída, suavizando ainda mais o efeito da VTCD à qual a carga foi submetida. Isso ocorreu porque a ativação do *tap* intermediário significa a conexão dos resistores de chaveamento e também dos enrolamentos de *taps*, conforme exemplificou a Fig. 4, o que acarreta em uma compensação parcial da tensão da carga antes mesmo da conclusão da mudança de *tap*.

Tabela III.2 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento III da Tabela III.1 – Regulador a vazio.

Ação		Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	0,6500	-	123,9	0,69
	Deteção do evento	0,6583	0,50		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +3	0,6667	1,00	170,0	0,95
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +3	0,6722	1,33		
	Sinal <i>tap</i> +3	0,6792	1,75	170,0	0,95
	Fechamento <i>tap</i> +3	0,6792	1,75		
Fim do evento	Início da variação de tensão	0,9000	-	247,8	1,38
	Deteção do evento	0,9083	0,50		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +3	0,9167	1,00	247,8	1,38
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +3	0,9167	1,00		
	Sinal <i>tap</i> 0	0,9292	1,75	179,6	1,00
	Fechamento <i>tap</i> 0	0,9292	1,75		

Na sequência, será apresentado o desempenho do RTE durante a simulação do evento IV da Tabela III.1, que se trata de uma elevação de 1,18 pu de magnitude e duração igual a 15 ciclos na tensão da entrada.

As tensões na entrada e na saída do equipamento ao longo do referido evento são apresentadas na Fig. 13. Para regular a tensão na saída, o regulador estático acionou o *tap* -1.

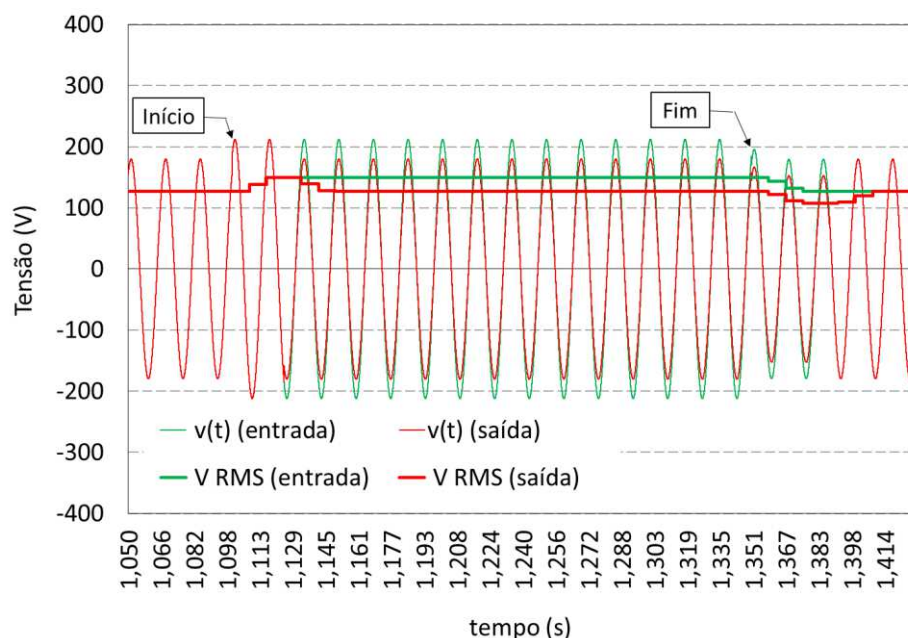


Figura 13 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante elevação momentânea de tensão simulada com 1,18 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela III.1) - Regulador a vazio.

Assim como no evento anterior, ambas as mudanças de *tap* levaram menos de 4 ciclos para serem efetivadas; especificamente neste caso, as duas trocas de *tap* foram concluídas em 2,25 ciclos.

O acionamento do *tap* -1 reduziu a magnitude da tensão de saída de 1,18 pu para 1,0 pu. Ao final do evento, quando a tensão na entrada do regulador retornou ao seu valor nominal, devido ao fato do equipamento ainda estar com o *tap* -1 acionado, a tensão de saída sofreu um afundamento de magnitude igual a 0,85 pu por 2,25 ciclos.

Durante o evento IV simulado, não houve curto-circuito das bobinas secundárias em nenhuma das duas mudanças de *tap*.

A Tabela III.3 apresenta os instantes de chaveamento das duas mudanças de *tap* do evento IV simulado.

Tabela III.3 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento IV da Tabela III.1 - Regulador a vazio.

Ação		Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	1,1000	-	212,0	1,18
	Deteção do evento	1,1167	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário -1	1,1250	1,50	180,5	1,00
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário -1	1,1250	1,50		
	Sinal <i>tap</i> -1	1,1375	2,25	180,3	1,00
	Fechamento <i>tap</i> -1	1,1375	2,25		
Fim do evento	Início da variação de tensão	1,3500	-	152,7	0,85
	Deteção do evento	1,3667	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário -1	1,3750	1,50	152,7	0,85
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário -1	1,3750	1,50		
	Sinal <i>tap</i> 0	1,3875	2,25	179,6	1,00
	Fechamento <i>tap</i> 0	1,3875	2,25		

Assim como mencionado no Capítulo 2, de forma geral, quanto mais a tensão durante o evento se distanciar do seu valor de referência (adotado como 1 pu), mais rápida tende a ser a detecção da variação de tensão. Isso fica claro ao se comparar o tempo para a detecção do evento III (magnitude igual a 0,69 pu), que levou $\frac{1}{2}$ ciclo para ocorrer, com o tempo que o controle do RTE levou para detectar o evento IV (magnitude igual a 1,18 pu), igual a 1 ciclo. No entanto, teoricamente, devido ao deslizamento de $\frac{1}{2}$ ciclo da janela de cálculo do valor eficaz da tensão de saída, o tempo para a detecção do evento será de, no máximo, 1,5 ciclo.

3.2 SIMULAÇÕES COM O RTE SUPRINDO CARGA RESISTIVA

O segundo conjunto de simulações computacionais realizadas teve como objetivo avaliar o comportamento e o desempenho do RTE quando o mesmo está alimentando uma carga. A primeira simulação do RTE sob carga foi realizada estando conectada à saída do equipamento uma resistência de $67,204 \Omega$ (240 W nominais para a tensão de 127 V). Esse valor de resistência é equivalente à carga resistiva que será alimentada pelo regulador durante um dos testes laboratoriais. Neste conjunto de simulações, as variações de tensão foram aplicadas no instante de tempo da forma de onda de tensão correspondente a 90° .

Na sequência, serão apresentados os mesmos dois eventos da subseção anterior de forma a facilitar a visualização do efeito da conexão de uma carga na saída do equipamento.

A Figura 14 apresenta as tensões na entrada e na saída do regulador durante o evento III da Tabela III.1, que fez demandou o acionamento do *tap* +3.

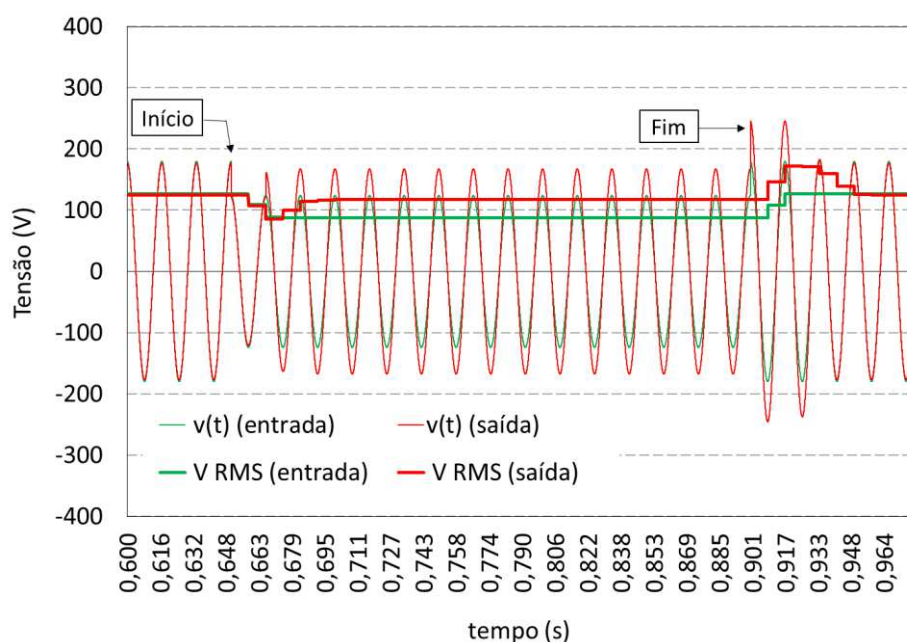


Figura 14 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,69 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento III da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga resistiva.

O acionamento do *tap* +3 fez a magnitude da tensão da carga durante o evento se elevar de 0,67 pu (85,71 V) para 0,93 pu (117,51 V). Conforme por ser observado pela Fig. 14, a correção do afundamento levou muito menos do que os 4 ciclos máximos esperados para ser concluída.

Ao final do evento, como o regulador estava com o *tap* +3 acionado, a carga sentiu uma elevação de tensão de magnitude igual a 1,37 pu enquanto o equipamento não retornou ao seu *tap* 0, o que levou menos de 2 ciclos para ocorrer. Conforme dito anteriormente, no pior caso, o controle do equipamento deve concluir as mudanças de *tap* em menos de 4 ciclos, não sendo esperados danos ou maus funcionamentos de equipamentos conectados à saída do regulador quando submetidos a variações de tensão dessa magnitude por esse curto período de tempo.

As correntes na entrada, na saída e nos dois enrolamentos de *taps* para esse mesmo evento são apresentadas na Fig. 15.

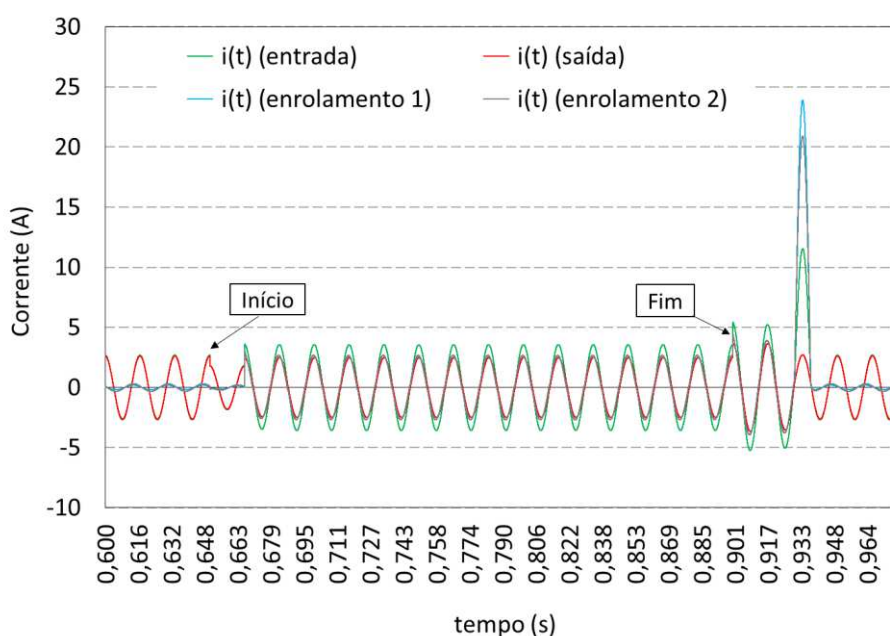


Figura 15 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,69 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento III da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga resistiva.

Observa-se pela Figura 15 que os dois enrolamentos de *taps* entraram em curto-circuito somente no instante em que o regulador voltou ao *tap* 0. É importante ressaltar que a ocorrência de curtos-circuitos das bobinas secundárias está relacionada ao instante nas formas de onda de tensão e corrente das chaves em que os sinais de *gate* são aplicados e retirados.

Como os *TRIACs* se abrem efetivamente apenas quando a sua corrente passa por zero após terem seu sinal de *gate* retirado, o curto-circuito das bobinas somente será evitado caso as chaves sejam acionadas na passagem por zero do seu sinal de corrente. Nessa situação, o

intercâmbio da corrente entre as chaves estáticas sendo acionadas e deixando de conduzir ocorrerá de forma natural, sem a ocorrência de curto-circuito.

Os maiores valores de pico das correntes durante o curto-circuito das bobinas de *tap* 1 e 2 foram iguais a 23,90 e 20,93 A, respectivamente. Lançando mão das equações (1) e (2), no caso em que a tensão na entrada do RTE vale 1,0 pu, as correntes nos enrolamentos de *taps* 1 e 2 calculadas valem 26,94 A e 22,45 A, na mesma ordem. A diferença entre os valores teóricos e simulados se dá pela conjuntura de três aspectos: o fato das duas equações supracitadas não levar em consideração as impedâncias dos enrolamentos de *taps*, a desconsideração da queda de tensão em condução das chaves e o fato da corrente simulada ser composta pela corrente de curto-circuito somada vetorialmente à corrente de carga.

Conforme relatado anteriormente, como a corrente dos *TRIACs* será interrompida apenas na próxima passagem por zero após o seu sinal de *gate* ser retirado, é esperado que o curto-circuito se mantenha por, no máximo, $\frac{1}{2}$ ciclo. Essa situação pode ser observada na Fig. 15.

A Tabela III.4 apresenta os instantes de acionamento das chaves nas duas mudanças de *tap*, realizadas no início e no final do evento em questão.

Tabela III.4 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento III da Tabela III.1 – Regulador alimentando carga resistiva.

Ação		Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	0,6500	-	121,9	0,68
	Detecção do evento	0,6583	0,50		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +3	0,6667	1,00	162,8	0,91
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +3	0,6667	1,00		
	Sinal <i>tap</i> +3	0,6792	1,75	167,5	0,93
	Fechamento <i>tap</i> +3	0,6805	1,83		
Fim do evento	Início da variação de tensão	0,9000	-	245,4	1,37
	Detecção do evento	0,9083	0,50		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +3	0,9167	1,00	237,2	1,32
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +3	0,9196	1,18		
	Sinal <i>tap</i> 0	0,9292	1,75	176,6	0,98
	Fechamento <i>tap</i> 0	0,9374	2,24		

Conforme pode ser observado na tabela anterior, tanto a mudança do *tap* 0 para o *tap* +3 quanto o retorno do equipamento ao seu *tap* 0 levaram bem menos de 4 ciclos para serem concluídas. Além disso, percebe-se que o acionamento dos *taps* intermediários já foi capaz de

compensar parcialmente a tensão na carga, amenizando ainda mais o efeito que a variação de tensão teria sobre a carga.

Assim como observado nas simulações em que o RTE estava a vazio, no final do evento, quando a tensão na entrada do equipamento retornou ao seu valor nominal, a carga sentiu uma elevação próxima a 1,40 pu. No entanto, de acordo com a Tabela III.4, essa sobretensão foi corrigida em 2,25 ciclos. Adicionalmente, nota-se que ativação do *tap* intermediário resultou em uma compensação parcial da tensão de saída carga, suavizando o efeito da sobretensão à qual a carga foi submetida.

O próximo caso simulado a ser analisado é o evento IV da Tabela III.1. Nessa situação, a tensão de entrada do RTE sofre uma elevação de 1,18 pu de magnitude por 15 ciclos. As tensões na entrada e saída do regulador estático são apresentadas na Fig. 16.

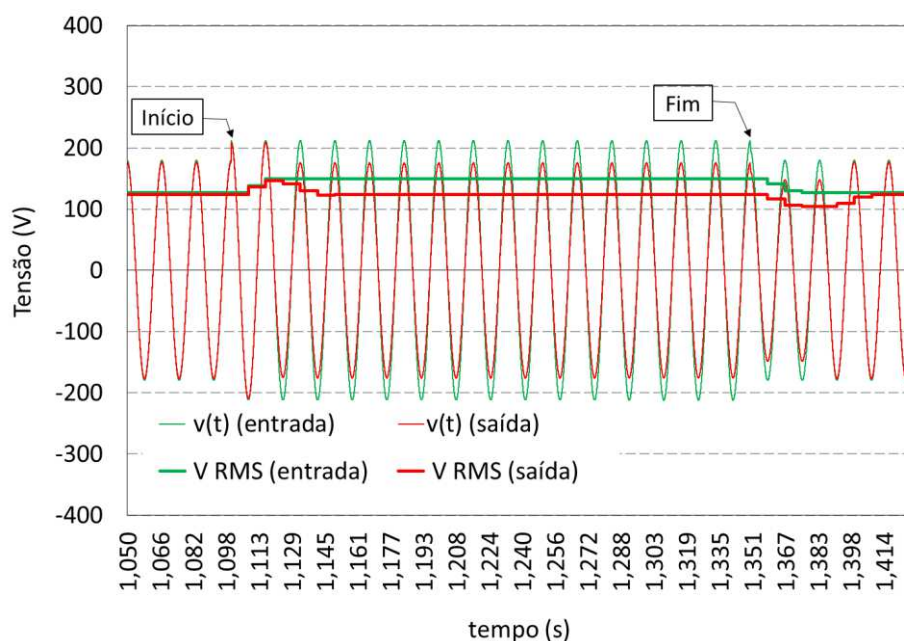


Figura 16 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante elevação momentânea de tensão simulada com 1,18 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga resistiva.

Pela figura acima, percebe-se que o RTE simulado operou de forma adequada: a elevação de tensão foi corrigida em 2,39 ciclos, reduzindo a magnitude da tensão na carga de 1,16 pu para 0,98 pu através da ativação do *tap* -1. No final do evento, quando a tensão na entrada do RTE retorna a 1 pu, em detrimento do acionamento do *tap* -1, a carga sofre um afundamento de tensão de magnitude igual a 0,82 pu por 2,73 ciclos.

As correntes na entrada, saída e nos dois enrolamentos de *taps* são apresentadas na Fig. 17.

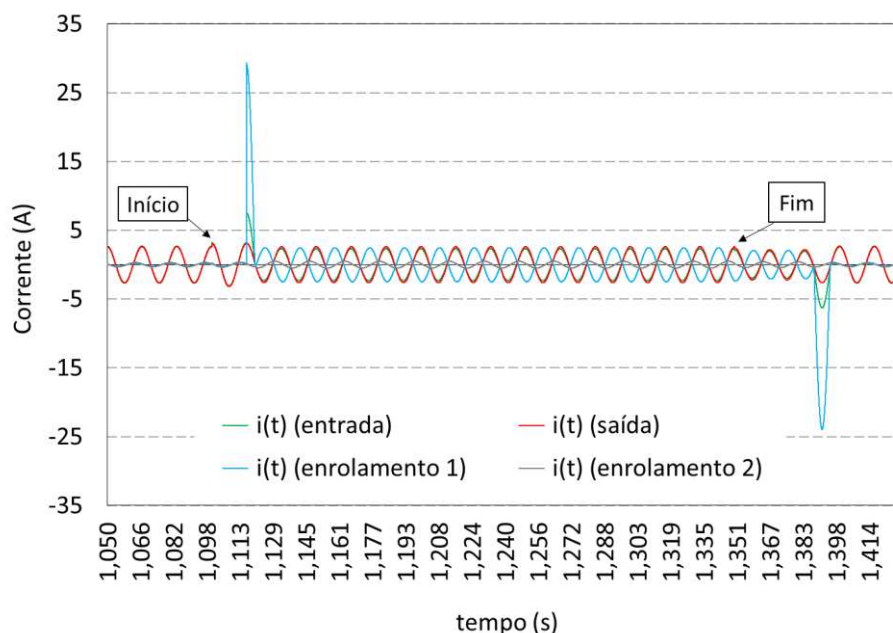


Figura 17 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante elevação momentânea de tensão simulada com 1,18 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga resistiva.

Diferentemente do caso anterior, a bobina de *taps* 1 entrou em curto-circuito tanto no início quanto no final da variação de tensão.

No início do evento, quando a magnitude da tensão de entrada do RTE se elevou para 1,18 pu, o enrolamento de *taps* 1 entrou em curto-circuito por $\frac{1}{4}$ de ciclo e a corrente nessa bobina atingiu 29,39 A de pico. Para essa condição de tensão de entrada, de acordo com a equação (1), a máxima corrente de pico esperada vale 31,79 A, próxima do valor simulado. Ao final do evento, quando a tensão na entrada do regulador retornou ao seu valor nominal, o enrolamento de *taps* 1 entrou em curto-circuito novamente, agora por $\frac{1}{2}$ ciclo, e a sua corrente atingiu o valor de pico de 23,91 A, um pouco abaixo dos 26,94 A calculados.

Novamente, os resultados observados nas simulações do RTE sob carga foram extremamente satisfatórios: as variações de tensão foram corrigidas em períodos de tempo menores do que 4 ciclos, os resistores de chaveamento cumpriram seu papel limitante da corrente de curto-circuito dos enrolamentos de *taps* e essas sobrecorrentes nos enrolamentos secundários duraram, no máximo, $\frac{1}{2}$ ciclo.

A Tabela III.5 apresenta os instantes de acionamento das chaves nas duas mudanças de *tap* do evento em questão.

Tabela III.5 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento IV da Tabela III.1 – Regulador alimentando carga resistiva.

	Ação	Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	1,1000	-	208,9	1,16
	Deteção do evento	1,1083	0,50		
	Sinal <i>tap</i> intermediário -1	1,1167	1,00		
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário -1	1,1208	1,25	175,3	0,98
	Sinal <i>tap</i> -1	1,1292	1,75		
	Fechamento <i>tap</i> -1	1,1398	2,39		
Fim do evento	Início da variação de tensão	1,3500	-	148,2	0,83
	Deteção do evento	1,3667	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário -1	1,3750	1,50		
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário -1	1,3760	1,56	147,6	0,82
	Sinal <i>tap</i> 0	1,3875	2,25		
	Fechamento <i>tap</i> 0	1,3955	2,73		

Assim como observado na simulação do afundamento de tensão, a ativação do *tap* intermediário no início do evento já realiza a compensação parcial da tensão da carga. No final da variação de tensão, quando o regulador retorna do *tap* -1 ao *tap* 0, a ativação da posição intermediária fez com que o afundamento de 0,83 pu causado pelo acionamento do *tap* -1 sofresse uma pequena redução adicional de 0,01 pu. De qualquer forma, a magnitude relativamente branda desse afundamento aliada à sua duração não é capaz de causar mau funcionamento às cargas conectadas à saída do RTE.

É importante lembrar que um dos motivos dos *taps* -2 e -3 terem sido desativados são os afundamentos que a ativação desses *taps* causaria no instante em que a variação de tensão se extingue.

3.3 SIMULAÇÕES COM O RTE SUPRINDO CARGA NÃO LINEAR

O terceiro conjunto de simulações do RTE teve como objetivo avaliar o comportamento do equipamento suprindo uma carga não linear, representada por uma resistência de 103,391 Ω (156 W nominais para a tensão de 127 V) em paralelo com quatro fontes de corrente harmônica. O valor da potência nominal da resistência é o mesmo da carga utilizada nos testes laboratoriais com carga não linear. As simulações dessa bateria de testes

consideraram que as variações de tensão ocorreram no instante de tempo da forma de onda de tensão correspondente a 60° .

Os valores eficazes das correntes das quatro fontes de corrente harmônica implementadas na simulação são mostrados na Tabela III.6. Todas as fontes têm ângulo absoluto igual a 0° .

Tabela III.6 – Ordens harmônicas e valor eficaz das fontes harmônicas representativas da carga não-linear.

Ordem Harmônica	Corrente eficaz (A)
2	0,9
3	0,6
4	0,4
5	0,3

Conforme será apresentado na sequência, a corrente instantânea apresenta uma passagem por zero no meio do semiciclo positivo. É importante salientar que como a metodologia de chaveamento proposta não depende do conhecimento da passagem por zero da corrente, essa característica é irrelevante para o controle. No entanto, em metodologias de chaveamento dependentes do conhecimento do instante de passagem por zero das correntes das chaves, essa característica pode ser problemática.

Nesta subseção, será avaliado o desempenho do RTE durante os eventos I (afundamento de 0,88 pu) e II (afundamento de 0,79 pu) da Tabela III.1, que demandaram a ativação dos *taps* +1 e +2, respectivamente.

As tensões nos terminais de entrada e de saída do RTE ao longo do evento I, que representa um afundamento de 0,88 pu de magnitude e duração igual a 15 ciclos na tensão de entrada do regulador, são apresentadas na Fig. 18.

Ambas as mudanças de *tap*, realizadas no início e no final do evento, levaram menos de 3 ciclos para serem realizadas. A operação do *tap* +1 elevou a magnitude da tensão de saída do regulador de 0,86 pu para 0,99 pu em menos de 2,5 ciclos. No final do evento, a ativação do *tap* +1 somada ao retorno da tensão de entrada a seu valor nominal ocasionou uma elevação de 1,13 pu de magnitude na tensão de saída do RTE durante 2,33 ciclos.

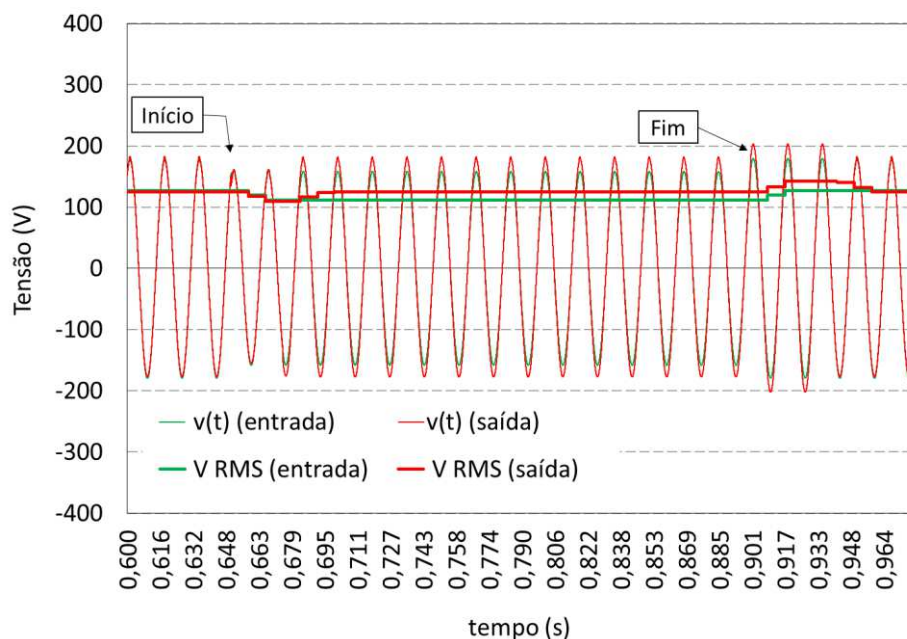


Figura 18 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,88 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento I da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga não linear.

O comportamento das correntes instantâneas na entrada, saída e nos dois enrolamentos de *taps* é apresentado na Fig. 19.

Nota-se que a bobina de *taps* 1 entrou em curto-circuito apenas no retorno do regulador ao *tap* 0. A corrente de pico máxima observada durante o curto foi igual a 9,96 A. De acordo com (1), o valor máximo de pico dessa sobrecorrente para uma tensão de entrada igual a 0,88 pu seria igual a 23,71 A. Entretanto, como a corrente de curto-circuito simulada não atingiu a sua crista, o valor registrado foi muito menor do que o calculado. A sua duração também foi bem reduzida, o que contribuiu para um chaveamento extremamente suave do ponto de vista de corrente nas chaves e nas bobinas do autotransformador.

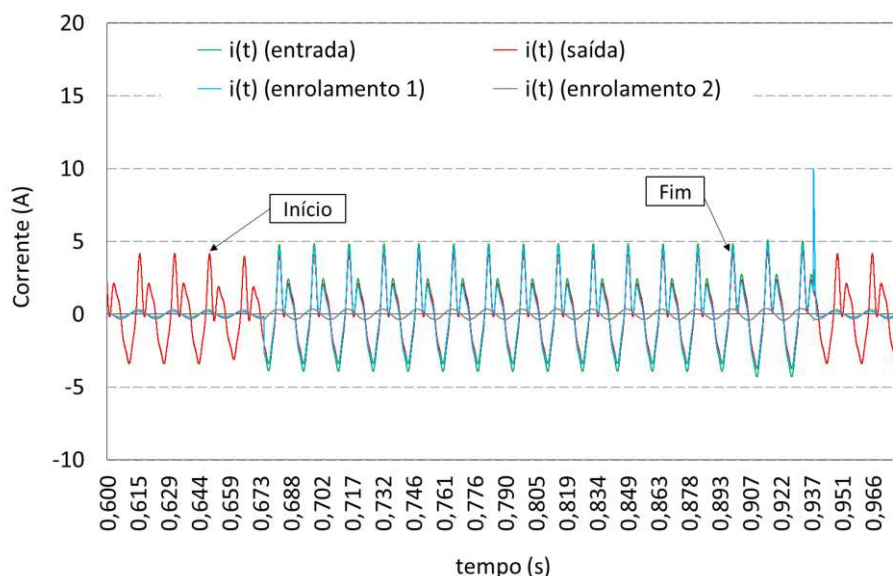


Figura 19 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo simulado de tensão com 0,88 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento I da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga não linear.

A Tabela III.7 lista os instantes de acionamento das chaves nas duas trocas de *tap* do I da Tabela III.1.

Tabela III.7 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento I da Tabela III.1 – Regulador alimentando carga não linear.

Ação		Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	0,6500	-	155,0	0,86
	Deteção do evento	0,6667	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +1	0,6750	1,50	176,5	0,98
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +1	0,6750	1,50		
	Sinal <i>tap</i> +1	0,6875	2,25	177,2	0,99
	Fechamento <i>tap</i> +1	0,6906	2,44		
Fim do evento	Início da variação de tensão	0,9000	-	203,2	1,13
	Deteção do evento	0,9167	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +1	0,9250	1,50	203,2	1,13
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +1	0,9292	1,75		
	Sinal <i>tap</i> 0	0,9375	2,25	176,6	0,98
	Fechamento <i>tap</i> 0	0,9389	2,33		

As duas mudanças de *tap* ocorreram em menos de 3 ciclos, período de tempo relativamente distante do limite projetado (4 ciclos). Novamente, a ativação do *tap* intermediário no início do evento já foi capaz de compensar quase que totalmente a tensão na carga.

A segunda variação de tensão apresentada nesta subseção é o evento II da Tabela III.1, que se trata de um afundamento de 0,79 pu de magnitude na tensão de entrada do RTE, que demandou a ativação do *tap* +2 do regulador.

As tensões na entrada e na saída do RTE durante o referido evento são apresentadas na Fig. 20.

As duas mudanças de *tap* ocorreram em menos de 2,5 ciclos. A ativação do *tap* +2 elevou a magnitude tensão na carga de 0,77 pu para 0,97 pu. No final da variação de tensão, enquanto o regulador não retornou ao *tap* 0, a carga ficou submetida a uma elevação de 1,23 pu. Esse processo de retorno à posição neutra levou 2,33 ciclos para ser concluído.

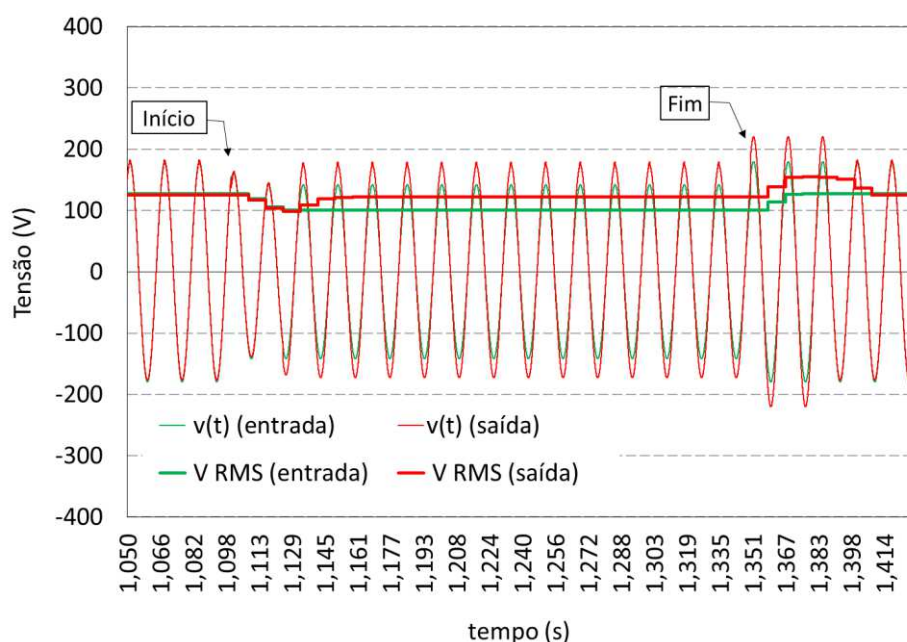


Figura 20 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,79 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento II da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga não linear.

As correntes instantâneas na entrada, saída nos dois enrolamentos de *taps* durante o evento em questão são apresentadas na Fig. 21.

Assim como observado no evento anterior, o enrolamento de *taps*, nesse caso a bobina de *taps* 2, entrou em curto-circuito somente no retorno do regulador à posição 0. O maior valor de pico de corrente durante o curto-circuito observado foi de 9,32 A. O máximo valor de pico da corrente de curto-circuito calculado através da equação (2) é igual a 17,74 A. Mais uma vez, essa diferença se deu em razão da corrente de curto-circuito do enrolamento de *taps* 2 não ter atingido a sua crista, resultando em um chaveamento menos severo.

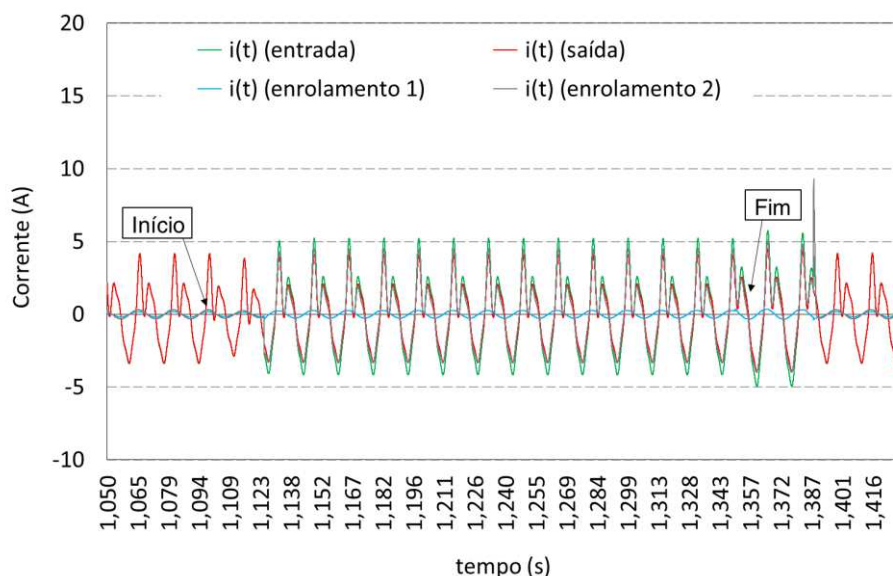


Figura 21 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,79 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento II da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga não linear.

A Tabela III.8 apresenta os instantes de acionamento das chaves estáticas nas duas mudanças de *tap* do evento II da Tabela III.1.

Tabela III.8 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento II da Tabela III.1 – Regulador alimentando carga não linear.

Ação		Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	1,1000	-	138,8	0,77
	Deteção do evento	1,1167	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +2	1,1250	1,50	173,2	0,96
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +2	1,1250	1,50		
	Sinal <i>tap</i> +2	1,1375	2,25		
	Fechamento <i>tap</i> +2	1,1376	2,26	173,8	0,97
Fim do evento	Início da variação de tensão	1,3500	-	220,3	1,23
	Deteção do evento	1,3667	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +2	1,3750	1,50	220,3	1,23
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +2	1,3794	1,79		
	Sinal <i>tap</i> 0	1,3875	2,25	176,6	0,98
	Fechamento <i>tap</i> 0	1,3889	2,33		

O acionamento do *tap* intermediário +2 no início do evento resultou em uma compensação expressiva da tensão na carga. Dessa forma, mesmo a mudança completa de *tap* tendo levado mais de 2 ciclos para ser efetivada, do ponto de vista da carga, a tensão se tornou adequada após 1,5 ciclo.

3.4 SIMULAÇÕES COM O RTE SUPRINDO CARGA INDUTIVA

O último conjunto de simulações computacionais do RTE tem como objetivo avaliar o comportamento do equipamento quando o mesmo está suprindo uma carga com defasamento entre os sinais de tensão e corrente. Para tanto, durante as variações de tensão desta seção, um indutor com reatância indutiva igual a $67,204 \Omega$ (240 var nominais para a tensão de 127 V) foi conectado à saída do equipamento. Todas as variações de tensão ocorreram no instante de tempo da forma de onda de tensão correspondente a 60° .

Nesta subseção, serão apresentados os comportamentos das tensões e correntes do RTE durante os eventos I e II da Tabela III.1.

Para corrigir a tensão da carga durante o evento I, que se trata de um afundamento de magnitude igual a 0,88 pu na entrada do RTE, o regulador acionou o *tap* +1.

As tensões na entrada e na saída do regulador estático durante esse evento são apresentadas na Fig. 22.

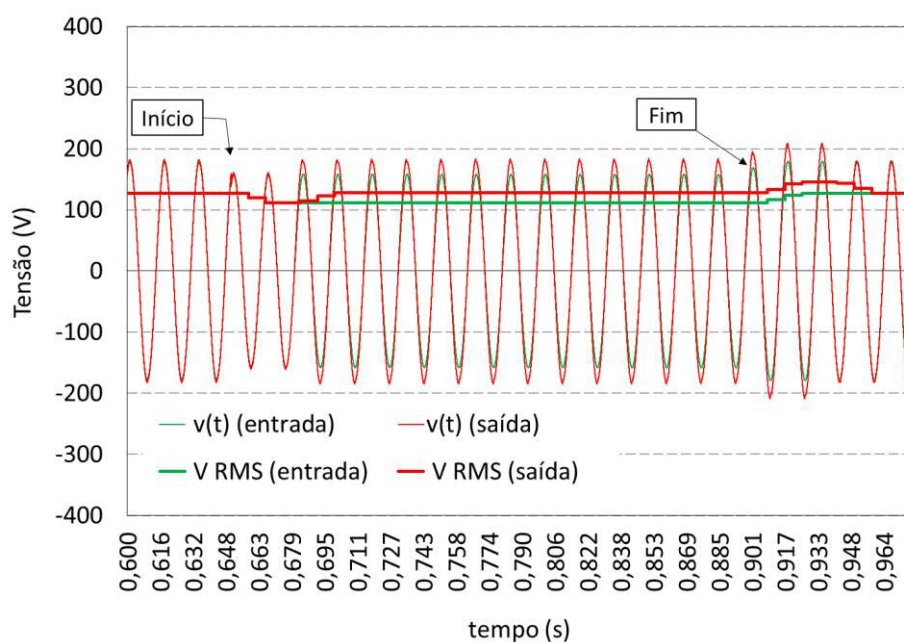


Figura 22 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,88 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento I da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga indutiva.

Ambas mudanças de *tap* foram concluídas em pouco mais de 2 ciclos. No início da variação de tensão, o RTE elevou a magnitude da tensão na carga de 0,86 pu para 1,02 pu. No

final do evento, como o regulador estava com o *tap* +1 acionado, a carga sentiu uma elevação de 1,13 pu por 2,25 ciclos, até o equipamento retornar à posição de *tap* 0.

As correntes na entrada, saída e nos enrolamentos de *taps* 1 e 2 são apresentadas na Fig. 23.

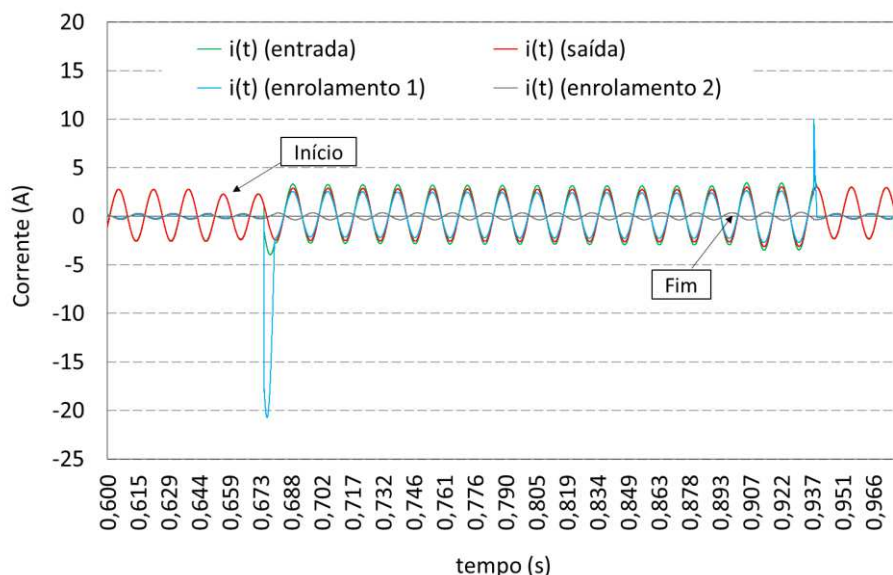


Figura 23 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,88 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento I da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga indutiva.

Nas duas mudanças de *tap*, o enrolamento de *taps* 1 entrou em curto-circuito, conforme mostra a figura anterior. As máximas correntes de pico registradas nesse enrolamento foram iguais a 20,73 A e 9,95 A no início e no final do evento, respectivamente. Para as duas situações de tensão (durante e após o fim do evento), de acordo com a equação (1), as máximas correntes de pico de curto-circuito esperadas seriam 23,71 A e 26,94 A, na mesma ordem.

A corrente de curto-circuito no final do evento não atingiu a sua crista, justificando a diferença expressiva entre a corrente simulada e a calculada.

A Tabela III.9 apresenta os instantes de tempo em que algumas etapas das mudanças de *tap* ocorreram.

Novamente, nota-se que devido à magnitude mais branda do evento, o controle demorou em torno de 1 ciclo detectar o evento. Em contrapartida, os eventos que demandaram a ativação do *tap* +3 foram detectados em $\frac{1}{2}$ ciclo, ratificando a afirmação de que quanto maior o desvio da magnitude da tensão do evento em relação à referência, mais rápida tende a ser a detecção da VTCD.

Tabela III.9 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento I da Tabela III.1 – Regulador alimentando carga indutiva.

Ação		Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	0,6500	-	155,0	0,86
	Deteção do evento	0,6670	1,02		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +1	0,6750	1,50		
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +1	0,6800	1,80	182,0	1,01
	Sinal <i>tap</i> +1	0,6875	2,25		
	Fechamento <i>tap</i> +1	0,6875	2,25		
Fim do evento	Início da variação de tensão	0,9000	-	203,5	1,13
	Deteção do evento	0,9167	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +1	0,9250	1,50		
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +1	0,9250	1,50	203,5	1,13
	Sinal <i>tap</i> 0	0,9375	2,25		
	Fechamento <i>tap</i> 0	0,9389	2,33		

Na sequência, serão apresentados os resultados da simulação do evento II da Tabela III.3. O afundamento de magnitude igual a 0,79 pu e 15 ciclos na tensão de entrada demandou que o RTE acionasse o *tap* +2 para trazer a tensão da carga para a faixa adequada (entre 0,90 e 1,10 pu).

As tensões na entrada e na saída do regulador ao longo deste evento são apresentadas na Fig. 24.

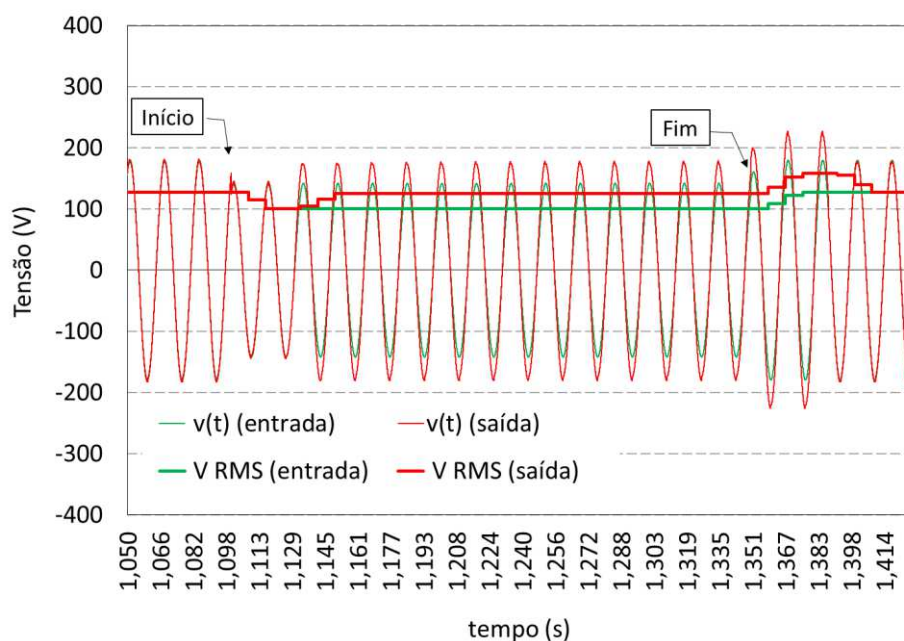


Figura 24 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão simulado com 0,79 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento II da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga indutiva.

Assim como constatado em todas as simulações anteriores, as mudanças de *tap* neste evento levaram menos de 4 ciclos para serem finalizadas. O acionamento do *tap* +2 elevou a magnitude da tensão na carga de 0,77 pu para 0,97 pu enquanto o evento perdurou. Ao final do evento, quando a tensão na entrada do RTE retornou a 1,0 pu e o regulador estava com o *tap* +2 acionado, a carga sentiu uma elevação de 1,23 pu enquanto o equipamento não retornou à posição de *tap* 0.

Para este mesmo evento, as correntes na entrada, saída e nos dois enrolamentos de *taps* do RTE são apresentadas na Fig. 25.

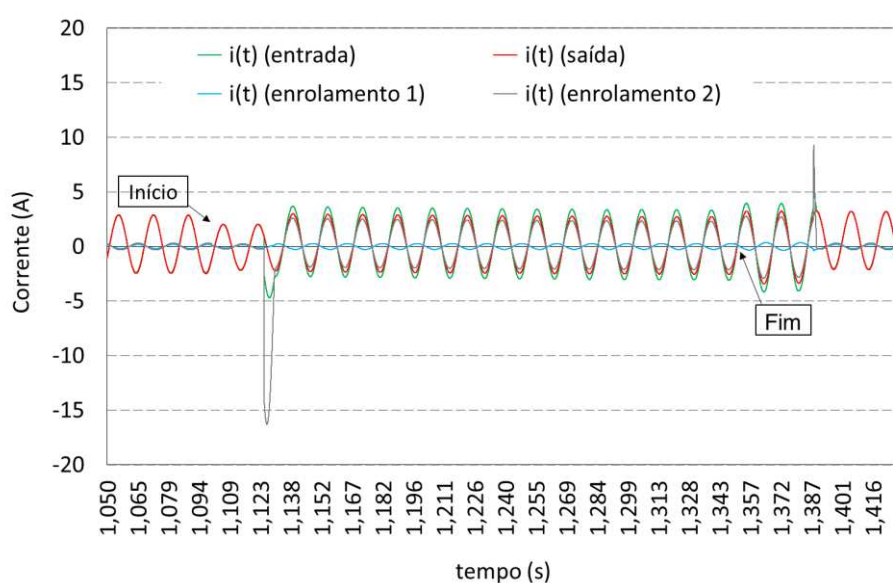


Figura 25 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante elevação momentânea de tensão simulado com 0,79 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento II da Tabela III.1) - Regulador alimentando carga indutiva.

O enrolamento de *taps* 2 entrou em curto-circuito tanto na ativação do *tap* +2 como no retorno à posição de *tap* 0. Os máximos valores de pico das correntes registrados foram iguais a 16,27 A e 9,32 A nos instantes inicial e final do evento, nesta ordem. As correntes de curto-circuito calculadas a partir de (2) para as tensões de entrada iguais a 0,79 pu e 1,0 pu são iguais a 17,74 A e 22,45 A, respectivamente. Novamente, no final do evento, a corrente de curto-circuito do enrolamento de *taps* 2 não atingiu o seu valor de crista, o que justifica a diferença entre as correntes simulada e calculada.

Por fim, a Tabela III.10 apresenta os instantes de tempo em cada uma das etapas dos chaveamentos ocorreu.

Tabela III.10 - Instantes de chaveamento e amplitudes da tensão na carga durante o evento II da Tabela III.1 – Regulador alimentando carga indutiva.

	Ação	Instante (s)	Tempo decorrido desde o início do evento (ciclos)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico (pu)
Início do evento	Início da variação de tensão	1,1000	-	138,8	0,77
	Deteção do evento	1,1167	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +2	1,1250	1,50	173,2	0,96
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +2	1,1300	1,80		
	Sinal <i>tap</i> +2	1,1375	2,25	173,8	0,97
	Fechamento <i>tap</i> +2	1,1375	2,25		
Fim do evento	Início da variação de tensão	1,3500	-	221,0	1,23
	Deteção do evento	1,3667	1,00		
	Sinal <i>tap</i> intermediário +2	1,3750	1,50	221,0	1,23
	Fechamento do <i>tap</i> intermediário +2	1,3751	1,51		
	Sinal <i>tap</i> 0	1,3875	2,25	176,6	0,98
	Fechamento <i>tap</i> 0	1,3889	2,33		

Notadamente, o acionamento do *tap* intermediário +2 realizou a compensação expressiva da tensão na carga em menos de 2 ciclos do início do evento.

Diante de todo o exposto neste subitem, conclui-se que o desempenho do RTE alimentando uma carga puramente indutiva, que se trata do caso extremo de defasamento angular entre tensões e correntes, foi extremamente satisfatório, se assemelhando com o comportamento observado em todas as outras condições de carregamento.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO RTE

Diante de todo o exposto, algumas considerações gerais podem ser levantadas.

Primeiramente, as mudanças de *tap* em todas as simulações apresentadas foram concluídas em menos de 4 ciclos. A velocidade para regular a tensão verificada neste capítulo mostrou que o RTE é um equipamento apto para realizar a correção ou amenização de variações de tensão de curta e de longa duração.

As correntes de curto-circuito verificadas nas simulações computacionais foram condizentes com as calculadas através das equações (1) e (2), ratificando a efetividade dos resistores de chaveamento no controle das correntes de curtos-circuitos dos enrolamentos de *taps* do autotransformador.

Outra constatação diz respeito ao período em que as sobrecorrentes dos curtos-circuitos das bobinas de *taps* duraram. Observou-se que diversas mudanças de *tap* não resultaram em curto-circuito das bobinas. Adicionalmente, muitos dos curtos-circuitos

observados tiveram duração menor que $\frac{1}{2}$ ciclo, o que também reduz o estresse térmico das bobinas do autotransformador e das chaves estáticas.

Finalmente, devido à queda de tensão em condução das chaves estáticas e/ou à eventual circulação da corrente distorcida de uma carga nos enrolamentos do RTE, a tensão de saída do regulador estático apresentará distorção harmônica diferente de zero. De forma a exemplificar a relação entre distorção harmônica na saída do regulador com a queda de tensão em condução dos *TRIACs* e com circulação de correntes distorcidas nos enrolamentos do RTE, foram realizados dois conjuntos de simulações.

Primeiramente, foram simuladas duas condições de carregamento diferentes: (i) RTE alimentando uma carga puramente resistiva de 225 W e (ii) o regulador suprindo uma carga com potência nominal de 11,25 W (20 vezes menor). A Tabela III.11 apresenta os resultados para as duas situações de carregamento referenciadas.

Tabela III.11 – Resultados de simulações do RTE alimentando cargas lineares de 225 W e 11,25 W.

Situação de carregamento	Carga resistiva 225 W			Carga resistiva 11,25 W		
	0	+3	-1	0	+3	-1
Tap acionado						
Corrente eficaz de saída (A)	1,73	1,64	1,72	0,09	0,08	0,09
DHT de corrente de saída (%)	1,00	1,48	0,97	0,39	0,93	0,75
Tensão eficaz de saída (V)	124,3	117,4	123,5	124,7	120	126,4
DHT de tensão de saída (%)	1,00	1,48	0,97	0,39	0,93	0,75
Tensão eficaz de saída fundamental (V)	124,29	117,39	123,49	124,70	119,99	126,40
Tensão eficaz de saída harmônica (V)	1,24	1,74	1,20	0,49	1,12	0,95
Tensão eficaz de entrada (V)	127,0	87,6	149,9	127,0	87,6	149,9
DHT de tensão de entrada (%)	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Tensão eficaz de entrada fundamental (V)	127,00	87,60	149,90	127,00	87,60	149,90
Tensão eficaz de entrada harmônica (V)	0,23	0,16	0,27	0,23	0,16	0,27

Observa-se que a redução da potência da carga, e por consequência da corrente que circula pelos *TRIACs*, fez a queda de tensão eficaz fundamental e a tensão eficaz harmônica se reduzirem. Dessa forma, é plausível afirmar que a distorção harmônica na tensão de saída é dependente da magnitude da corrente de carga em detrimento da queda de tensão em condução das chaves estáticas.

Adicionalmente, faz-se necessário avaliar impacto que a corrente harmônica injetada por uma carga não linear tem na distorção harmônica da tensão de saída. Para tanto, foram simuladas duas condições de carregamento: (i) RTE alimentando uma carga puramente resistiva de 225 W, denominada carga linear, e (ii) RTE alimentando a mesma carga linear em paralelo com as fontes de corrente harmônica listadas na Tabela III.6, denominada carga não linear.

Tabela III.11 - Resultados de simulações do RTE alimentando carga linear e carga não linear.

Situação de carregamento	Carga linear			Carga não-linear		
<i>Tap</i> acionado	0	+3	-1	0	+3	-1
Corrente eficaz de saída (A)	1,73	1,64	1,72	2,10	2,01	2,09
DHT de corrente de saída (%)	1,00	1,48	0,97	67,5	70,6	67,3
Tensão eficaz de saída (V)	124,3	117,4	123,5	124,7	118,1	124,2
DHT de tensão de saída (%)	1,00	1,48	0,97	1,46	2,44	1,93
Tensão eficaz de saída fundamental (V)	124,29	117,39	123,49	124,69	118,06	124,18
Tensão eficaz de saída harmônica (V)	1,24	1,74	1,20	1,82	2,88	2,40
Tensão eficaz de entrada (V)	127,0	87,6	149,9	127,0	87,6	149,9
DHT de tensão de entrada (%)	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Tensão eficaz de entrada fundamental (V)	127,00	87,60	149,90	127,00	87,60	149,90
Tensão eficaz de entrada harmônica (V)	0,23	0,16	0,27	0,23	0,16	0,27

Pela tabela anterior, para o regulador no *tap* 0, observa-se que o aumento em torno de 20% da corrente eficaz da carga resultou em uma elevação de mais de 60% na tensão eficaz harmônica na saída do RTE. Dessa forma, conclui-se que a circulação de corrente harmônica pelos enrolamentos de *taps* do RTE, oriunda da carga não linear, também é um fator ocasionador de distorção harmônica na tensão de saída.

Diante do exposto, conclui-se que tanto a queda de tensão em condução dos *TRIACs* quanto a circulação de corrente harmônica pelos enrolamentos do RTE são responsáveis por uma pequena distorção harmônica na tensão de saída.

4. TESTES DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

As simulações realizadas no Capítulo 3 apresentaram as principais diretrizes da metodologia de chaveamento proposta, quais sejam, (i) a capacidade do RTE de amenizar variações de tensão em menos de 4 ciclos e (ii) a eficácia dos resistores de chaveamento aliada à lógica de controle, responsáveis por limitar as correntes de curto-circuito das bobinas de *taps* a um valor aceitável, e por um período de tempo não maior que $\frac{1}{2}$ ciclo. Sendo assim, a última etapa para a validação da metodologia de chaveamento proposta é a construção de um protótipo de regulador de tensão estático em escala reduzida, de forma a ser possível a realização de testes laboratoriais visando a validação definitiva da metodologia desenvolvida.

Os testes laboratoriais foram divididos em quatro seções diferentes, as quais apresentam o desempenho do RTE suprimindo quatro tipos distintos de cargas, a saber: operação à vazio, carga puramente resistiva, carga não-linear e carga indutiva.

Para cada uma das condições de carga supracitadas, foram realizados dois conjuntos de testes distintos. O primeiro conjunto de testes teve como objetivo avaliar o desempenho do RTE durante variações de tensão em regime permanente, representadas neste caso por variações de tensão temporárias, com duração igual a 5 (cinco) segundos. Vale salientar que o desempenho do RTE seria exatamente o mesmo quando da consideração de variações de tensão de longa duração, com durações superiores a 3 minutos. A classificação de VTCDs de acordo com a sua magnitude (afundamento, elevação e interrupção) e duração (momentânea e temporária) são apresentadas na Fig. 1.

A Tabela IV.1 apresenta as quatro variações de tensão aplicadas à entrada do regulador, assim como o *tap* acionado para cada uma delas. É importante observar que o evento IV, conforme indicado na Tabela IV.1, tem magnitude diferente para as situações a vazio e com carga. O motivo para essa diferença é a compensação da queda de tensão nos *TRIACs*, presente somente nos ensaios com carga diferente de zero.

O segundo conjunto de testes laboratoriais, por sua vez, teve como objetivo avaliar o comportamento do regulador estático durante a ocorrência de variações momentâneas de tensão, com durações da ordem de ciclos. Assim, foram aplicadas seis variações de tensão com duração de 15 ciclos à entrada do RTE. A esse conjunto de testes, foi dado o nome de testes de variações momentâneas de tensão. Os eventos aplicados nessa segunda etapa, assim como os *taps* a serem acionados em cada um dos mesmos, são apresentados na Tabela IV.2.

Tabela IV.1 – *Taps* a serem acionados de acordo com a tensão de entrada do RTE – Testes considerando-se a aplicação de variações temporárias de tensão.

Evento	Tensão de entrada a vazio/ com carga	Duração (s)	Tap acionado
-	127 V (1,00 pu) / 127 V (1,00 pu)	-	0
I	110 V (0,86 pu) / 110V (0,86pu)	5	+1
II	100 V (0,79 pu) / 100 V (0,79 pu)	5	+2
III	88 V (0,69 pu) / 88V (0,69 pu)	5	+3
IV	144 V (1,13 pu) / 150 V (1,18 pu)	5	-1

Tabela IV.2 – *Taps* a serem acionados de acordo com a tensão de entrada do RTE – Testes considerando-se a aplicação de variações momentâneas de tensão.

Evento	Tensão de entrada a vazio/ com carga	Duração (ciclos)	Tap acionado
-	127 V (1,00 pu) / 127V (1,00 pu)	-	0
I	110 V (0,86 pu) / 110 V (0,86 pu)	15	+1
II	100 V (0,79 pu) / 100 V (0,79 pu)	15	+2
III	88 V (0,69 pu) / 88 V (0,69 pu)	15	+3
IV	144 V (1,13 pu) / 150 V (1,18 pu)	15	-1
V	60 V (0,47 pu) / 60 V (0,47 pu)	15	+3
VI	50 V (0,39 pu) / 50 V (0,39 pu)	15	+3

As variações de tensão mostradas nas Tabelas IV.1 e IV.2, aplicadas à entrada do RTE, foram sintetizadas por uma fonte programável da California Instruments, modelo CSW5500. Os sinais de tensão e corrente foram registrados por um registrador de forma de onda fabricado pela ELSPEC Ltd, modelo G4500 BLACKBOX, o qual possui taxa amostral de 1024 amostras por ciclo de 60 Hz. A Figura 26 apresenta o esquemático da estrutura laboratorial montada para a realização dos testes.

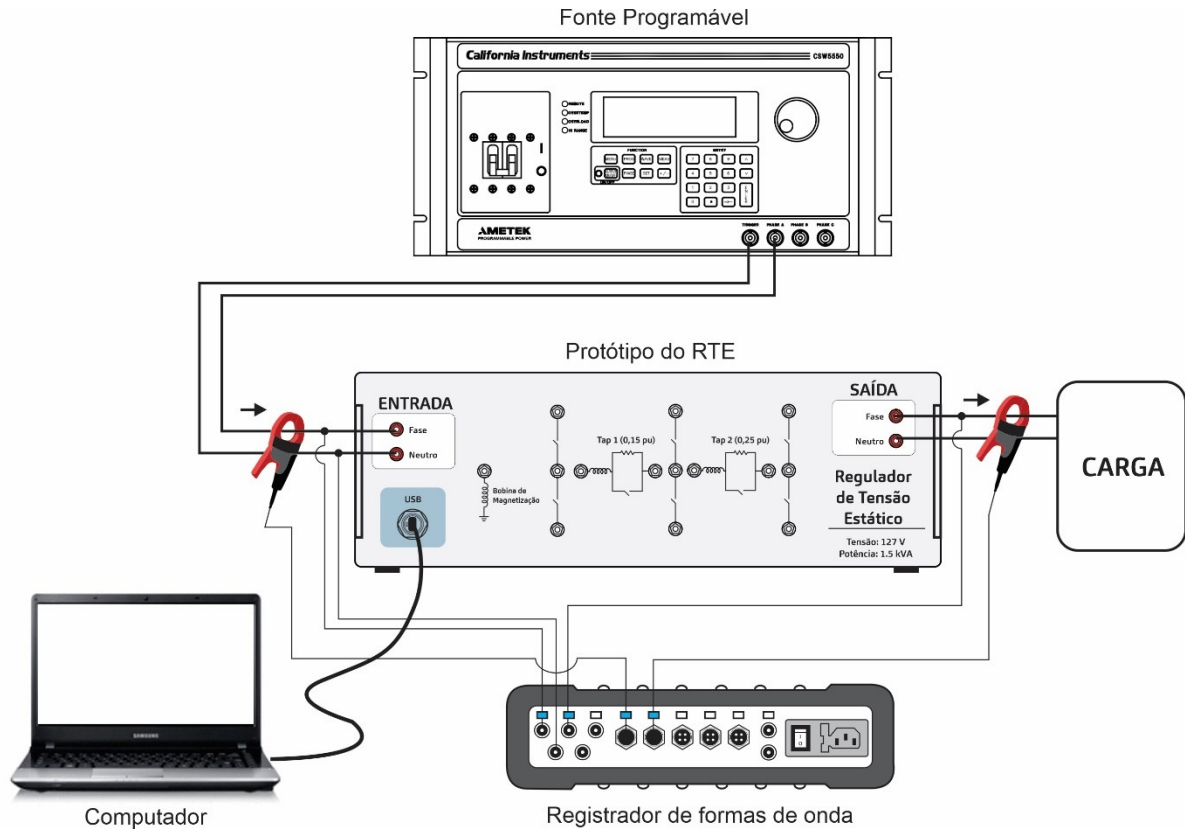


Figura 26 - Desenho esquemático da estrutura laboratorial montada para realização dos testes do protótipo do regulador estático desenvolvido.

4.1 ENSAIOS NO RTE OPERANDO A VAZIO

O primeiro conjunto de testes realizados teve como objetivo avaliar o funcionamento do RTE operando a vazio. Para tanto, foram aplicados os dois conjuntos de testes apresentados no tópico anterior: (i) variações temporárias de tensão, conforme Tabela IV.1, e (ii) variações momentâneas de tensão, conforme Tabela IV.2.

4.1.1 Variações Temporárias de Tensão

A Figura 27 apresenta os valores das tensões eficazes registradas na entrada e saída do RTE durante os quatro eventos indicados na Tabela IV.1. Os limites inferiores e superiores demarcados na Figura 27 equivalem a 0,90 e 1,10 pu, conforme a faixa adequada de tensões durante VTCDs, estabelecida no módulo 8 do PRODIST [6], considerando-se uma tensão base igual a 127 V.

O projeto das tensões nominais e quantidade de *taps* foi embasado nos limites de tensão iguais a $\pm 10\%$ da tensão nominal. Caso seja estabelecida uma faixa de regulação menor, pode-se optar por reduzir as tensões nominais dos dois enrolamentos de *taps* e/ou adicionar outros enrolamentos na bobina secundária, sem prejuízo à metodologia de chaveamento.

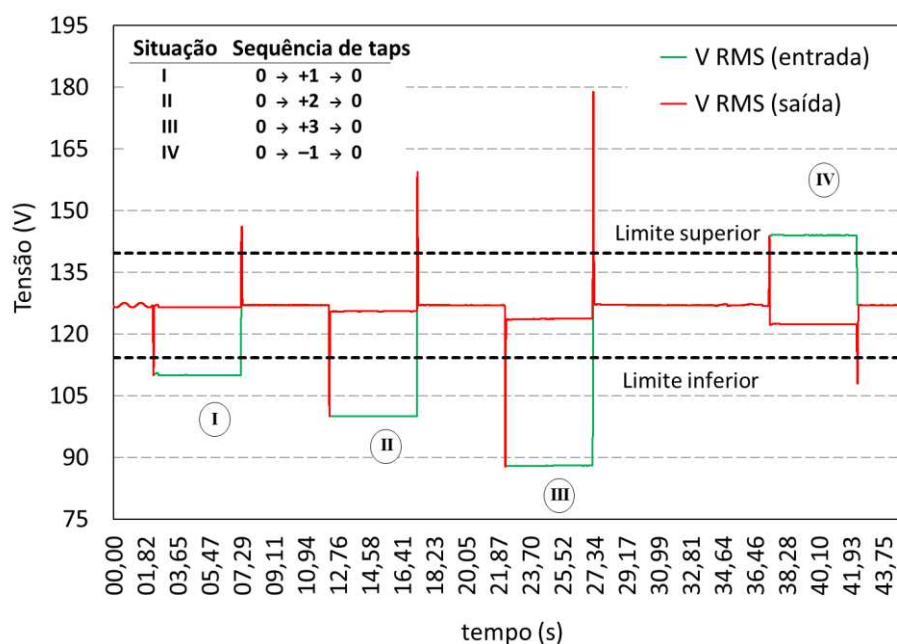


Figura 27 - Tensões eficazes na entrada e saída do RTE para teste de variações temporárias de tensão – Regulador a vazio.

A figura anterior mostra que a tensão de saída do regulador estático é mantida dentro da faixa considerada adequada em todas as variações de tensão aplicadas à entrada do equipamento. As mudanças bruscas na tensão de saída no final dos quatro eventos ocorreram como consequência do retorno da tensão de entrada ao seu valor nominal. Ao final dos quatro eventos, como o RTE estava em posições de *taps* diferentes de 0, a tensão de saída ficou diferente da tensão de entrada enquanto o regulador não retornou ao *tap* 0. É importante salientar que todas as mudanças de *taps*, sejam elas no início ou no final dos eventos, levaram menos de 4 ciclos para serem concluídas.

De forma a apresentar em mais detalhes o chaveamento do RTE, serão apresentadas a seguir algumas das mudanças de *tap* relacionadas com os eventos mostrados na Fig. 27. Assim, a Figura 28 apresenta o acionamento do *tap* +3 estando o regulador na posição de *tap* 0, representando o início do evento III indicado na Fig. 27.

Pela figura abaixo, percebe-se que a mudança do *tap* 0 para o *tap* +3 levou menos de 3 ciclos para ser concluída, elevando a tensão de saída de 87,84 V (0,69 pu) para 123,52 V (0,97

pu). Dessa forma, um afundamento de tensão na carga, o qual duraria vários segundos, ou até mesmo minutos, para ser atenuado por reguladores de tensão eletromecânicos convencionais, foi corrigido em menos de 3 ciclos pelo regulador estático.

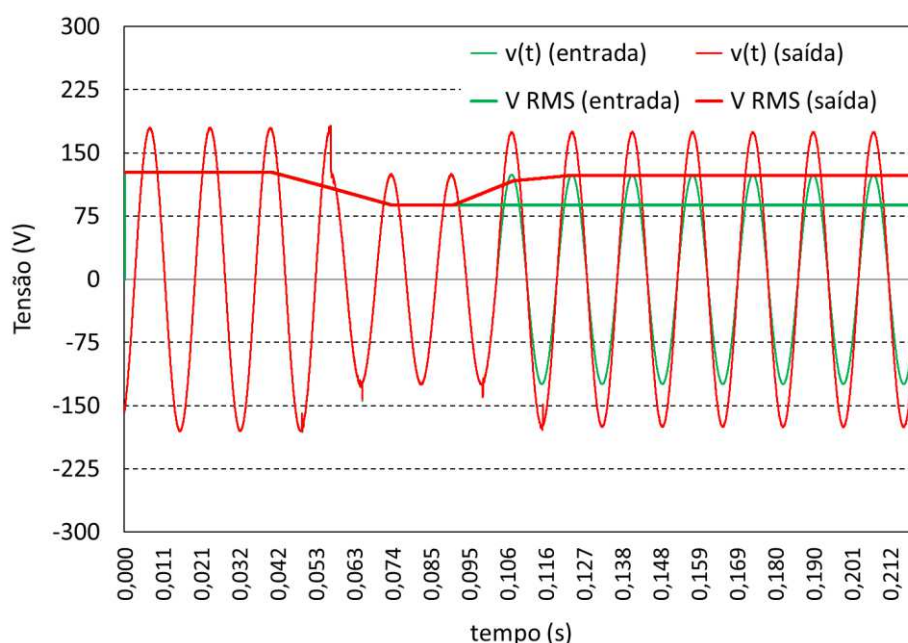


Figura 28 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* +3, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador a vazio.

No instante em que a tensão de entrada retorna a seu valor nominal, estando o RTE com o *tap* +3 ativado, a tensão de saída sofre uma elevação, a qual permanece enquanto o equipamento não retorna à posição de *tap* 0, o que leva menos de 4 ciclos para ocorrer, conforme apresenta a Fig. 29. Conforme citado anteriormente, essa situação pode ser observada no final de todos os 4 eventos apresentados na Fig. 27. Nos casos extremos, quando os *taps* +3 ou -1 estão acionados e a tensão de entrada volta ao seu valor nominal, a tensão eficaz na saída do RTE alcança valores iguais a 178 V (1,40 pu) e 108 V (0,85 pu), respectivamente.

Na sequência, a Figura 29 apresenta o final do evento III da Fig. 27, com o retorno do RTE para a posição de *tap* 0.

Pela análise da figura a seguir, percebe-se que a mudança do *tap* +3 para a posição de *tap* 0 também ocorreu em menos de 4 ciclos (mais especificamente em 3 ciclos). No instante em que a tensão de entrada retorna a seu valor nominal, a tensão de saída sofre uma elevação de 1,4 pu por menos de 4 ciclos. No entanto, assim como explanado no Capítulo 2, de acordo com [46-49], não são esperados danos a equipamentos quando esses são submetidos a elevações de tensão da ordem de 1,4 pu com durações menores que 4 ciclos, configurando, assim, uma

operação segura às cargas conectadas ao secundário do RTE. De qualquer forma, importante destacar que, caso a elevação de 1,4 pu com duração de 4 ciclos seja uma limitação dos equipamentos alimentados pelo RTE, pode-se facilmente reduzir a tensão dos enrolamentos de *taps* de acordo com a aplicação, ao custo da diminuição da faixa de compensação.

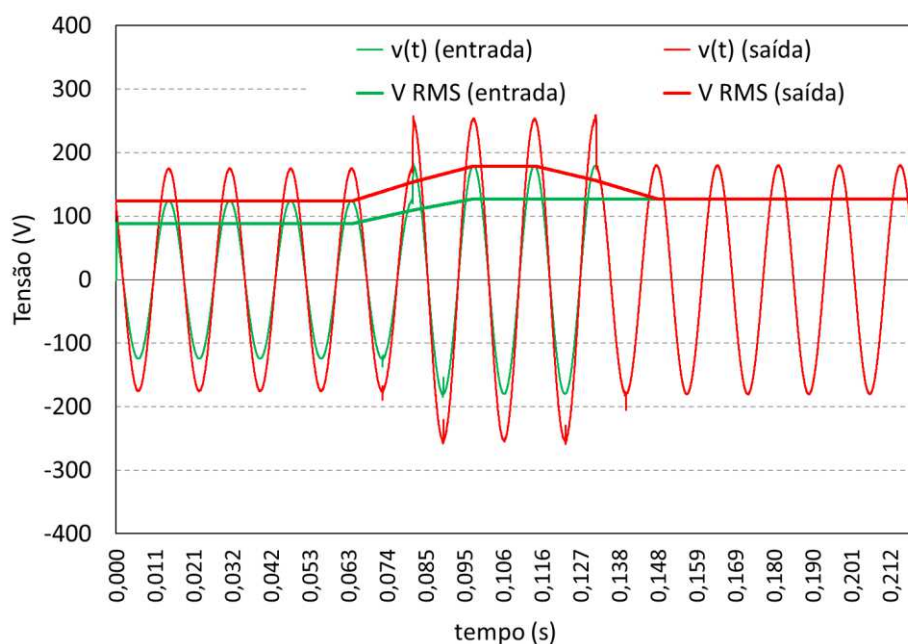


Figura 29 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição +3 para a posição de *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador a vazio.

O evento de número IV apresentado na Figura 27 representa uma elevação de tensão de 1,13 pu. Para corrigir essa elevação, o regulador estático acionou o *tap* -1, reduzindo a tensão de saída para um valor abaixo de 1,1 pu (139,7 V), conforme pode ser observado na Fig. 30.

Assim como apresentado nas duas mudanças de *tap* mostradas anteriormente, a correção da variação de tensão ocorreu em menos de 4 ciclos, reduzindo a tensão de saída de 143,74V (1,13 pu) para 122,22 V (0,96 pu), dentro da faixa adequada, cujos limites são iguais a 0,90 e 1,10 pu.

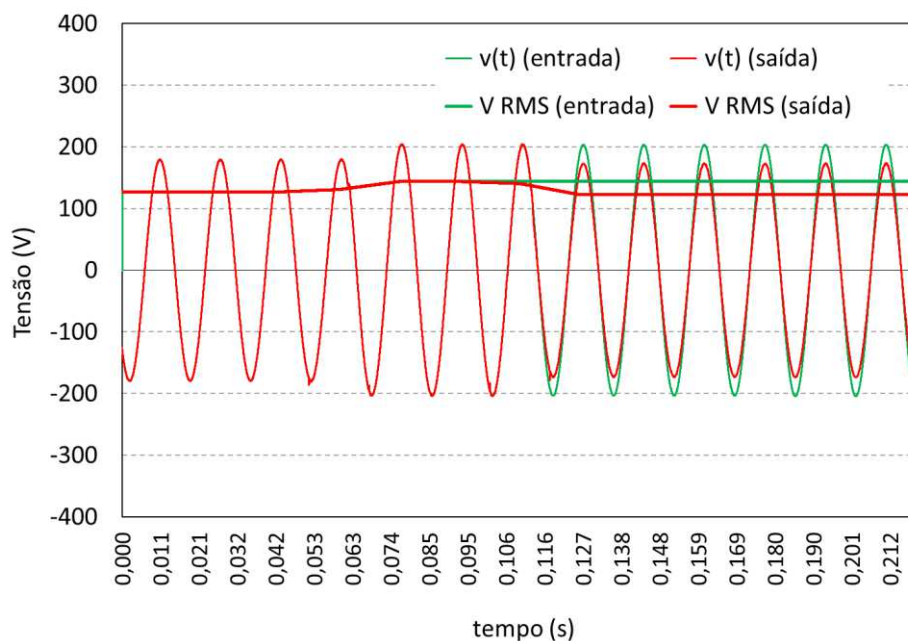


Figura 30 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* -1, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador a vazio.

Ao final do evento IV, no instante em que a tensão de entrada retorna a seu valor nominal, estando o RTE na posição de *tap* -1, a tensão de saída sofre um afundamento enquanto o equipamento não retorna para o *tap* 0, conforme mostra a Fig. 31.

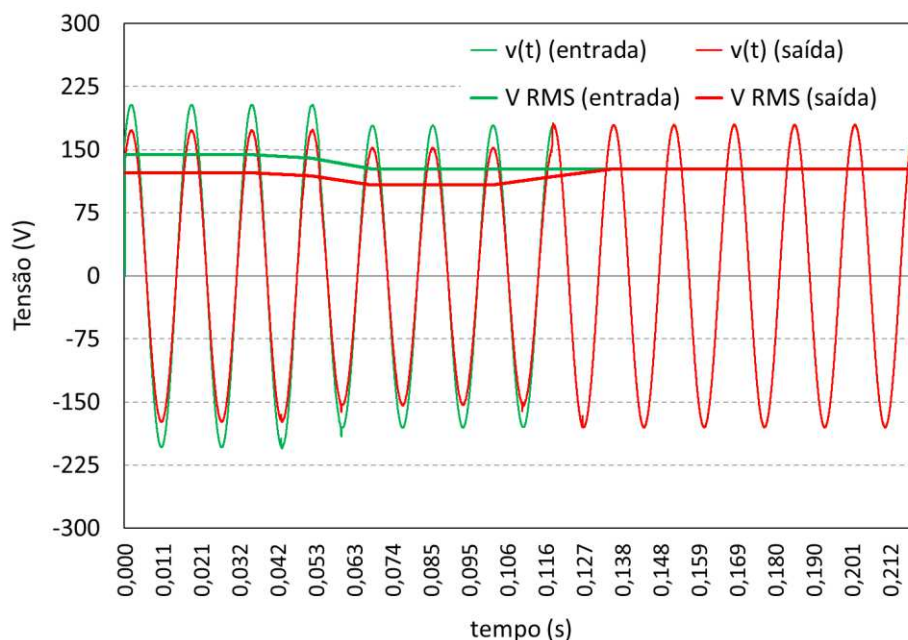


Figura 31 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição -1 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador a vazio.

O afundamento observado na tensão de saída teve magnitude igual a 0,85 pu e duração menor que 4 ciclos. Novamente, não são esperados problemas no funcionamento de cargas quando submetidas a afundamentos dessa magnitude e duração.

4.1.2 Variações Momentâneas de Tensão

A segunda sequência de testes do regulador de tensão estático, ainda operando a vazio, teve como objetivo avaliar o desempenho do RTE frente a variações de tensão com menores tempos de duração. Assim, foram aplicados à entrada do RTE um total de 6 eventos com 15 ciclos de duração cada, conforme apresentado na Tabela IV.2.

Primeiramente, é importante ressaltar que todas as variações de tensão foram novamente corrigidas em menos de 4 ciclos. De forma a exemplificar a atuação do equipamento durante esses eventos mais rápidos, serão apresentados com um maior nível de detalhe os comportamentos das tensões durante os eventos IV (elevação de 1,13 pu) e VI (afundamento de 0,39 pu) da Tabela IV.2.

Dessa forma, a Figura 32 apresenta as tensões na entrada e na saída do RTE na ocorrência do evento IV da Tabela IV.2. Observa-se que tanto no início do evento, em que o *tap* -1 é acionado, quanto no final do evento, quando o regulador retorna à posição de *tap* 0, as respectivas mudanças de *tap* levaram menos de 4 ciclos para serem efetivadas.

Assim como observado nos testes relativos às variações temporárias de tensão, no instante em que o evento termina, ou seja, no momento em que a tensão primária retorna ao seu valor nominal, a tensão de saída sofre um afundamento de 0,85 pu com duração em torno de 3,5 ciclos.

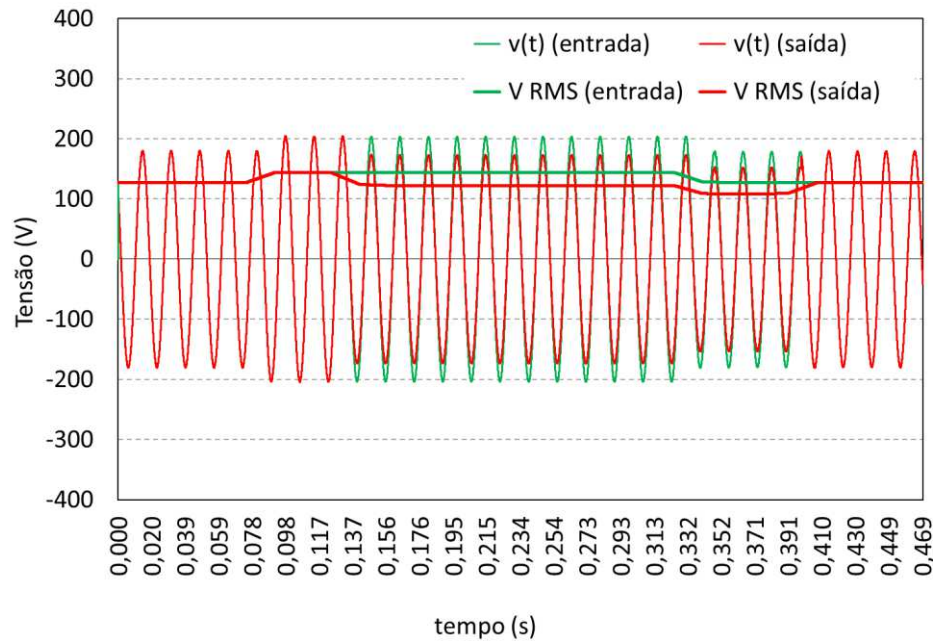


Figura 32 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante elevação momentânea de tensão com 1,13 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela IV.2) – Regulador a vazio.

Mesmo o regulador estando a vazio, como a abertura e o fechamento dos *TRIACs* não são instantâneas, ainda existe a possibilidade de curto-circuito das bobinas de *tap*. Nesse sentido, durante os ensaios mostrados no subitem 4.1.1, não foi observado nenhum curto-circuito das bobinas do autotransformador. No entanto, durante o evento IV indicado na Tabela IV.2, no retorno do RTE do *tap* -1 para o *tap* 0, o enrolamento de *taps* 1 entrou em curto-circuito durante $\frac{1}{4}$ ciclo, conforme mostra a Fig. 33, a qual apresenta as correntes instantâneas na entrada, saída e nos dois enrolamentos de *taps* do RTE.

Conforme mostrado na Fig. 33, o valor de pico da corrente do enrolamento de *taps* 1 chegou a 25,66 A. De acordo com a equação (1), para a tensão de entrada igual a 1,13 pu, R_1 igual a $1,0 \, \Omega$ e desconsiderando-se as impedâncias dos enrolamentos, assim como a queda de tensão nas chaves estáticas, era esperada uma corrente eficaz de 21,53 A, ou 30,44 A de pico, considerando-se sinais puramente senoidais. Dessa forma, pode-se afirmar que o resistor de chaveamento R_1 cumpriu seu papel de maneira adequada, limitando a corrente de curto-circuito do enrolamento de *taps* 1 a um valor seguro para o autotransformador e chaves estáticas.

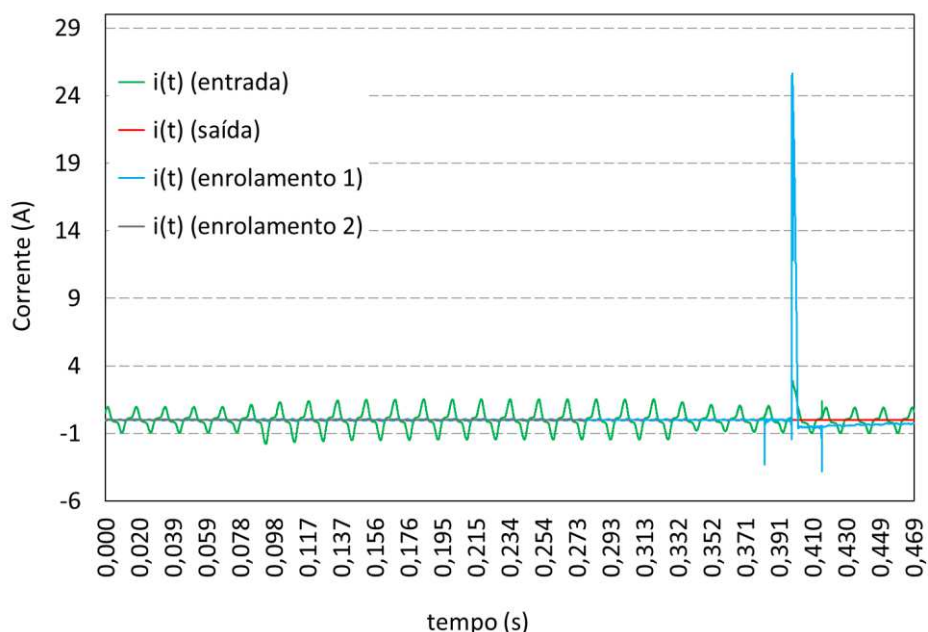


Figura 33 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante elevação momentânea de tensão com 1,13 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela IV.2) – Regulador a vazio.

Na sequência, será apresentado o comportamento do RTE durante a ocorrência do evento VI da Tabela IV.2, representado por um afundamento momentâneo de tensão com 0,39 pu de amplitude e 15 ciclos de duração. Conforme mostra a Fig. 34, visando amenizar esse evento, o RTE acionou o *tap* +3, o que levou em torno de 2,5 ciclos para ser realizado.

O acionamento do *tap* +3 elevou a tensão eficaz de saída de 50 V (0,39 pu) para 70 V (0,55 pu). Como o princípio de funcionamento do RTE é baseado no acionamento de bobinas secundárias de um autotransformador, as tensões de compensação dos enrolamentos de *taps* são proporcionais à tensão na bobina de magnetização. Dessa forma, como o evento VI, indicado na Tabela IV.2, foi muito severo, a correção da tensão de saída foi apenas parcial. Todavia, mesmo a atuação do RTE não sendo capaz de elevar a tensão para um valor acima de 0,90 pu, a probabilidade de uma carga conectada ao secundário do regulador apresentar mau funcionamento é, sem sombra de dúvidas, reduzida por essa compensação parcial.

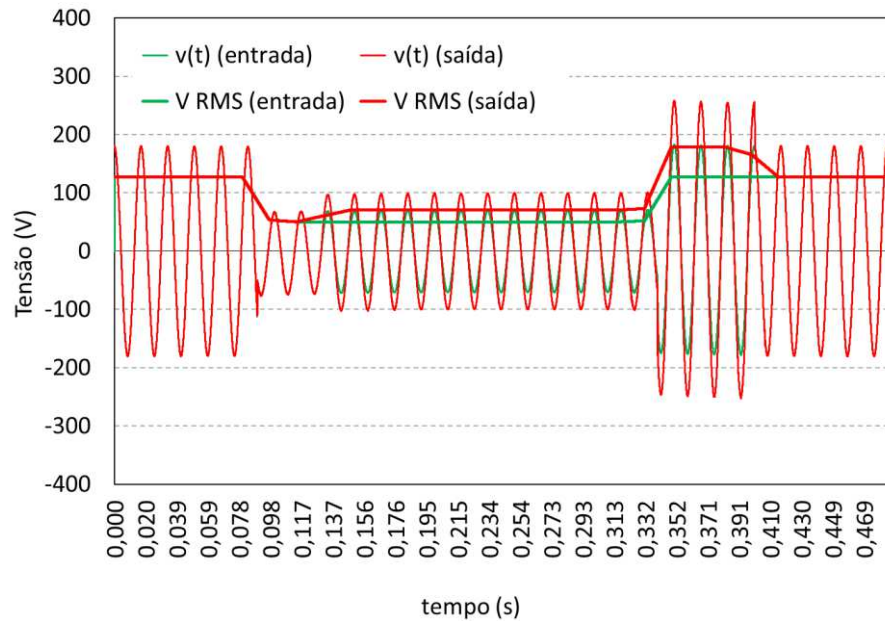


Figura 34 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão com 0,39 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela IV.2) – Regulador a vazio.

As correntes na entrada, na saída e nos dois enrolamentos de *taps* do RTE são apresentadas na Fig. 35. Conforme pode ser observado, não houve curto-circuito nos enrolamentos de *taps* em nenhuma das duas mudanças de posição. O pequeno transitório da corrente de entrada do equipamento se deve à variação da tensão na bobina de magnetização do autotransformador.

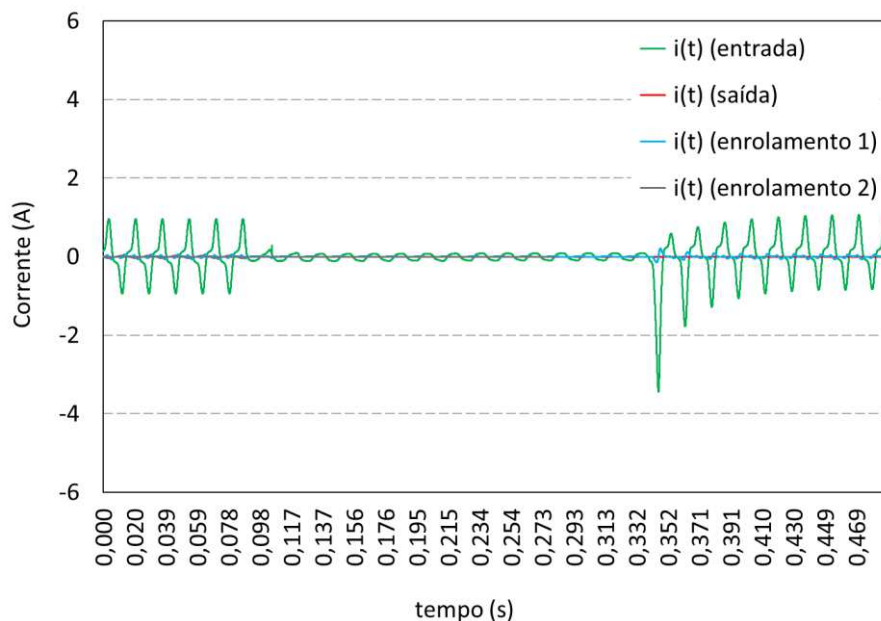


Figura 35 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo de tensão com 0,39 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela IV.2) – Regulador a vazio.

4.2 ENSAIOS DO RTE ALIMENTANDO CARGA RESISTIVA

A segunda etapa de testes do RTE teve como objetivo avaliar o comportamento do regulador desenvolvido quando o mesmo está suprindo uma carga. Neste primeiro conjunto de testes do regulador sob carga, o equipamento alimentou um agrupamento de lâmpadas incandescentes, compondo 240 W de carga puramente resistiva. Assim como na subseção anterior, foram aplicadas à entrada do RTE variações momentâneas de tensão, com durações de 5 segundos (Tabela IV.1), e variações instantâneas de tensão, que duraram 15 ciclos (Tabela IV.2).

4.2.1 Variações Temporárias de Tensão

A Figura 36 apresenta os valores das tensões eficazes na entrada e saída do RTE durante as variações temporárias de tensão apresentadas na Tabela IV.1.

Pela figura a seguir, observa-se que o regulador manteve a tensão dentro da faixa adequada em todas as 4 variações de tensão aplicadas. Assim como notado na condição a vazio, ao final de todos os eventos, no instante em que a tensão de entrada retorna a seu valor nominal, o regulador leva um pequeno espaço de tempo, menor que 4 ciclos, para retornar ao *tap* 0. Os limites superior e inferior são iguais a 114,3 V e 139,7 V, que são equivalentes a 0,9 e 1,1 pu para uma tensão de 127 V, respectivamente.

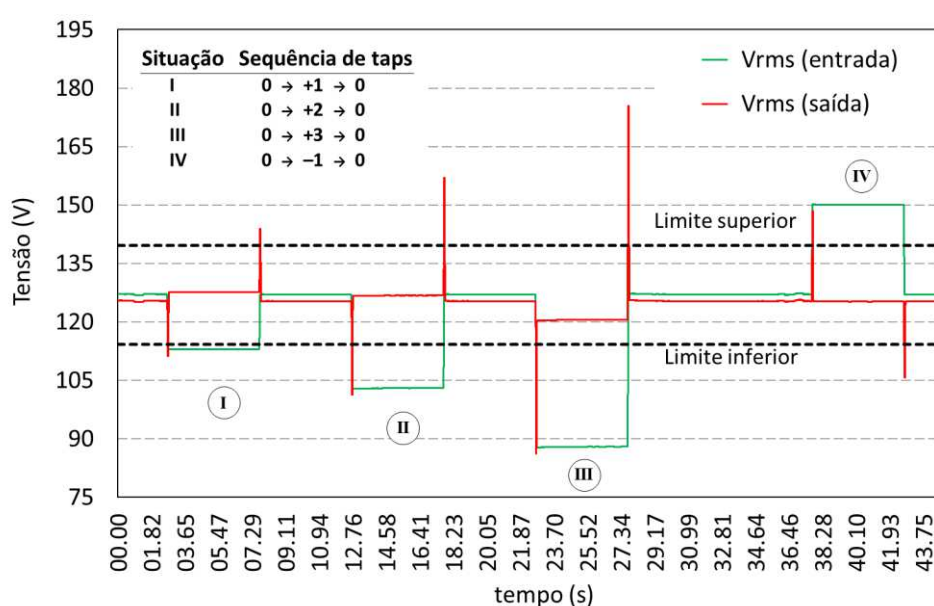


Figura 36 - Tensões eficazes na entrada e saída do RTE para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

Outra observação importante em relação à Figura 36 diz respeito à diferença entre as tensões de entrada e saída quando o RTE está na posição de *tap* 0. Essa pequena diferença, nesse caso igual a 1,70 V, ocorreu devido à queda de tensão em condução dos *TRIACs* S_3 e S_4 , indicados na Fig 2. Ao se analisar a Figura 27, em que o regulador estático estava a vazio, não se observa tal condição.

De forma a exemplificar de forma mais detalhada a atuação do RTE alimentando uma carga resistiva, serão apresentadas com maior detalhamento algumas mudanças de *tap*. O primeiro evento a ser explorado com maior minúcia é o evento III da Figura 36, que tem suas tensões de entrada e saída apresentadas na Fig 37.

Semelhantemente ao que foi observado no ensaio a vazio, a mudança do *tap* 0 para o *tap* +3 levou em torno de 3 ciclos para ser concluída, elevando a tensão na carga de 86,5 V (0,68 pu) para 120,2 V (0,95 pu).

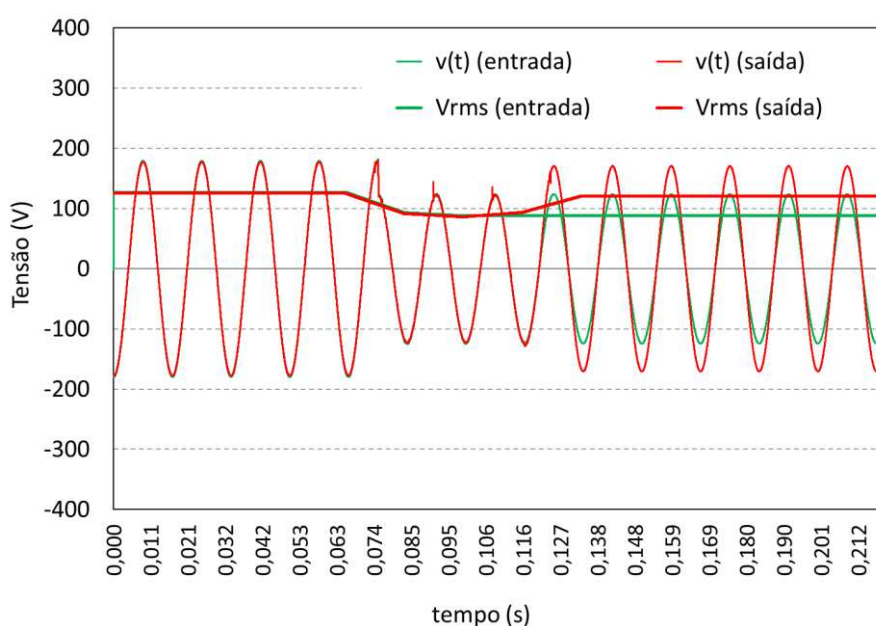


Figura 37 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* +3, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

As correntes na entrada, saída e nos dois enrolamentos de *taps* nesta mesma situação são apresentadas na Fig. 38.

Pela figura seguinte, percebe-se que o acionamento do *tap* +3 implicou nos curto-circuitos de ambas bobinas de *taps*, representados pelas correntes de pico iguais a 15,51 A e 13,97 A no enrolamentos de *taps* 1 e 2, respectivamente. Observa-se que o curto-circuito perdurou por apenas $\frac{1}{4}$ de ciclo, metade do período máximo esperado.

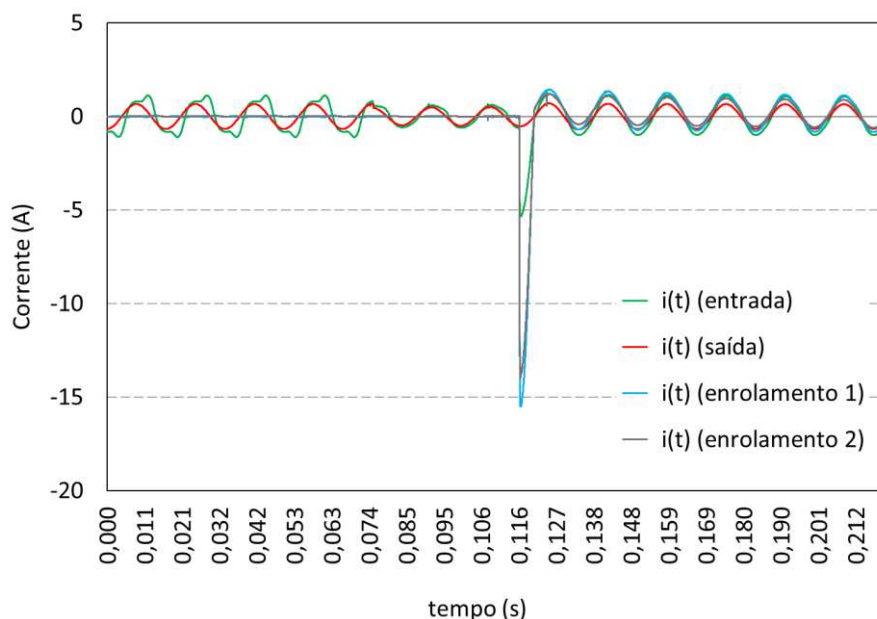


Figura 38 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* +3, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

Para um afundamento de 0,69 pu na bobina de magnetização (entrada), de acordo com as equações (1) e (2), eram esperadas correntes de pico máximas iguais a 18,59A e 15,49A nos enrolamentos 1 e 2, respectivamente.

Em relação à pequena diferença entre os valores medidos e calculados, é importante ressaltar que as equações (1) e (2), além de não levarem em consideração a queda de tensão nos enrolamentos do autotransformador e nas chaves estáticas em condução, também não consideram a corrente de carga, justificando a diferença entre valores calculados e registrados durante os testes. Desta forma, constata-se que os resistores de chaveamento cumpriram a sua função de limitação de curto-circuito conforme projetado.

No final do evento III da Figura 36, a tensão de entrada do RTE volta ao seu valor nominal. Como o equipamento está com o *tap* +3 acionado, a carga sofre uma elevação de tensão de magnitude igual a 1,38 pu (175,4 V) por, aproximadamente, 3,5 ciclos, conforme mostra a Fig. 39.

A diferença entre a sobretensão observada quando o RTE estava funcionando a vazio (1,40 pu) para a condição sob carga (1,38 pu) se deve à queda de tensão em condução nas chaves S_2 , S_5 , S_7 e S_8 , que estão acionadas quando o equipamento está com o *tap* +3 ativado.

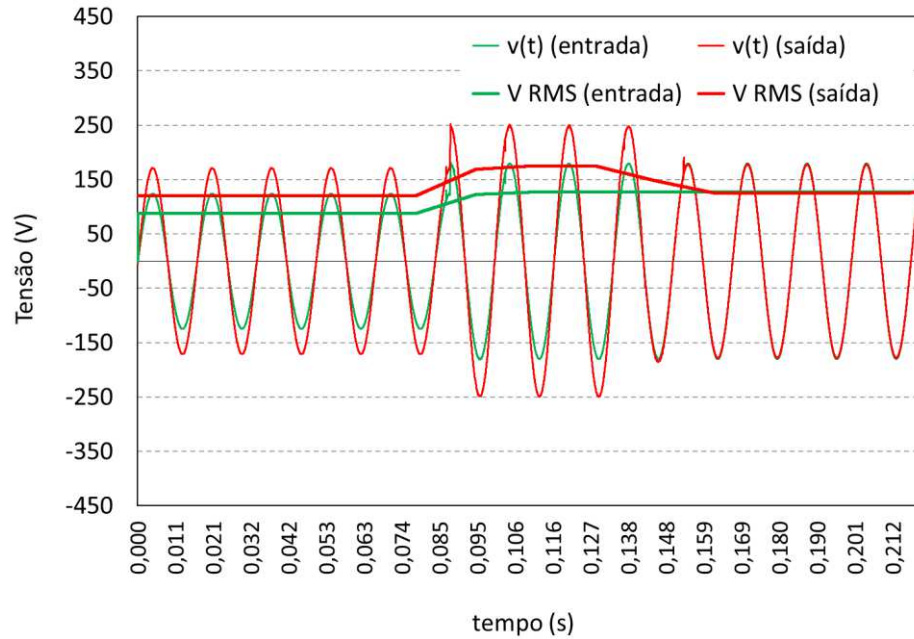


Figura 39 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* +3 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

As correntes na entrada, saída e nas duas bobinas de *taps* do RTE durante o evento apresentado na Figura 36 são mostradas na Fig. 40.

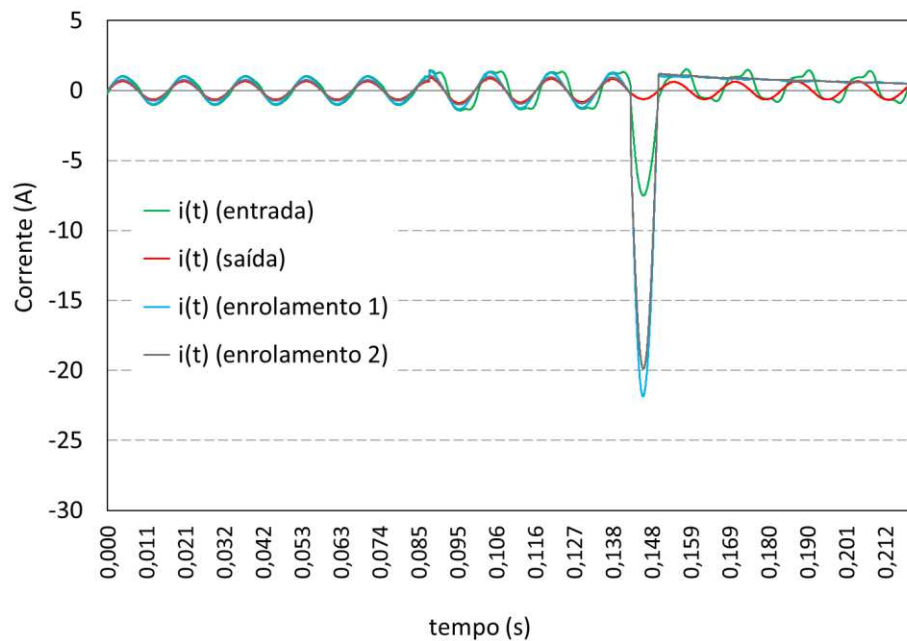


Figura 40 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* +3 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

O retorno do RTE ao *tap* 0 também ocasionou curtos-circuitos nas duas bobinas de *taps*, conforme mostra a imagem anterior. Os valores de pico medidos das correntes nos

enrolamentos de *taps* 1 e 2 foram iguais a 23,84 A e 19,89 A, nesta ordem. Considerando a tensão de entrada igual a 1,0 pu, de acordo com as equações (1) e (2), eram esperadas correntes de pico iguais a 26,94 A e 22,45 A nos dois enrolamentos, na ordem apresentada. Novamente, os valores de corrente de curto-circuito das bobinas medidos foram condizentes com os valores calculados.

A sobrecorrente medida nesse evento se manteve durante o máximo período de tempo esperado, igual $\frac{1}{2}$ ciclo; todavia, ainda sim, a mesma não é capaz de danificar as bobinas do autotransformador e nem os *TRIACs*.

Na sequência, é apresentada a correção da elevação de tensão do evento IV da Fig. 36, que demandou o acionamento do *tap* -1 do regulador. As tensões de entrada e saída do equipamento são apresentadas na Figura 41, enquanto que as correntes no equipamento são mostradas na Fig. 42. É importante observar que a magnitude da tensão na entrada do RTE para o evento IV da Tabela IV.1 nos ensaios com carga vale 1,18 pu, e não 1,14 pu como nos ensaios a vazio. Esse aumento na tensão de teste teve como objetivo a compensação da queda de tensão em condução nos *TRIACs*.

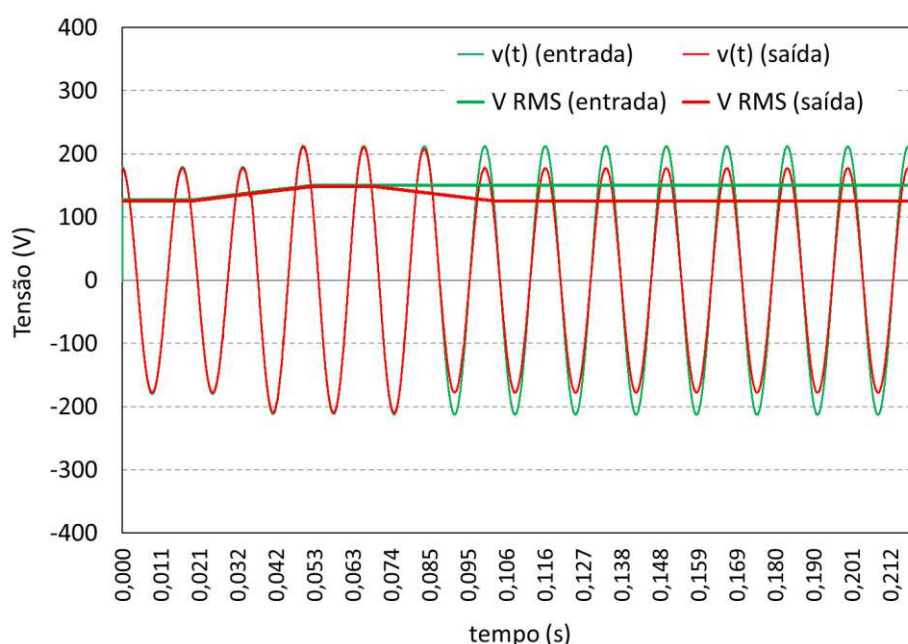


Figura 41 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* -1, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

Assim como em todas as situações apresentadas anteriormente, a mudança do *tap* 0 para o *tap* -1 levou menos de 4 ciclos para ser completada, reduzindo a tensão na saída do RTE de 148,5 V (1,17 pu) para 125,3 V (0,99 pu).

Em relação às correntes do equipamento, percebe-se que o enrolamento de *taps* 1 entrou em curto-circuito por menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo durante a comutação do *tap* -1, quando a sua corrente de pico chegou a 30,01 A. Considerando a tensão de entrada igual a 1,18 pu na equação (1), a corrente de curto-circuito calculada nessa situação tem 31,86 A de pico, próxima do valor medido.

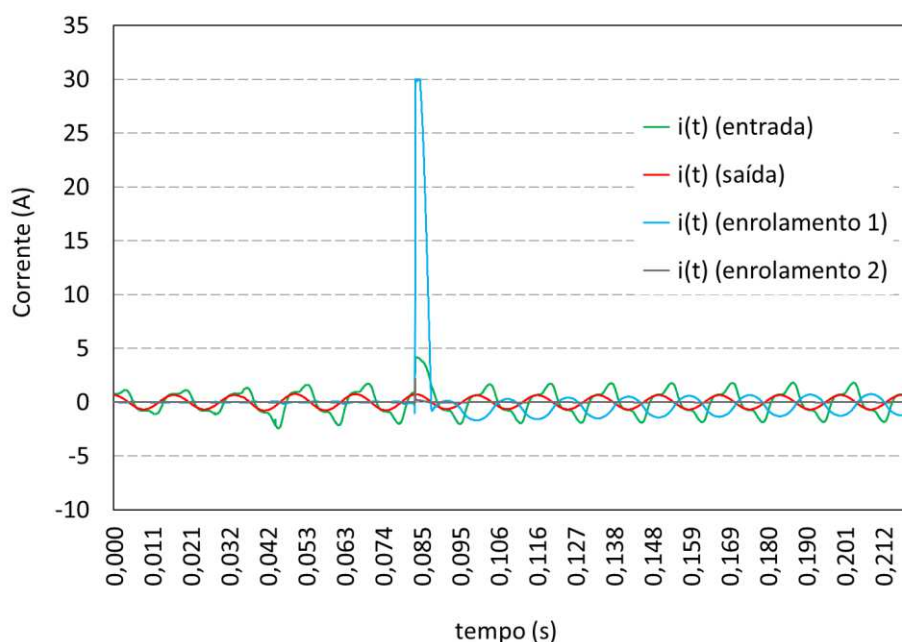


Figura 42 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* -1, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

No final do evento IV da Fig. 36, quando a tensão de entrada do RTE volta ao seu valor nominal, o regulador deve retornar ao *tap* 0. A Figura 43 apresenta as tensões de entrada e saída do regulador ao longo desta mudança de *tap*.

O retorno da tensão de entrada do RTE a 1,0 pu acarretou um afundamento de magnitude igual 0,83 pu (105,7 V) e duração de 3,5 ciclos na saída do equipamento, uma vez que o regulador estava com o *tap* -1 acionado. A pequena diferença entre a tensão observada no teste com carga (0,83 pu) e no ensaio a vazio (0,85 pu) é resultado da queda de tensão nas chaves S_1 , S_3 e S_7 , que agora estão conduzindo corrente.

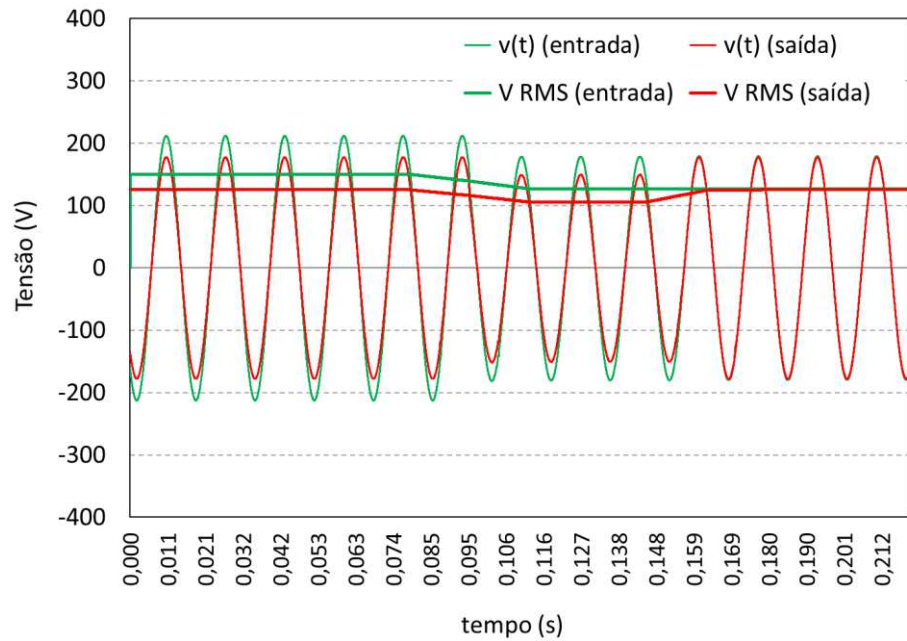


Figura 43 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* -1 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

A Figura 44 apresenta as correntes na entrada, saída e nos enrolamentos de *taps* do regulador nesta mesma mudança de *tap*.

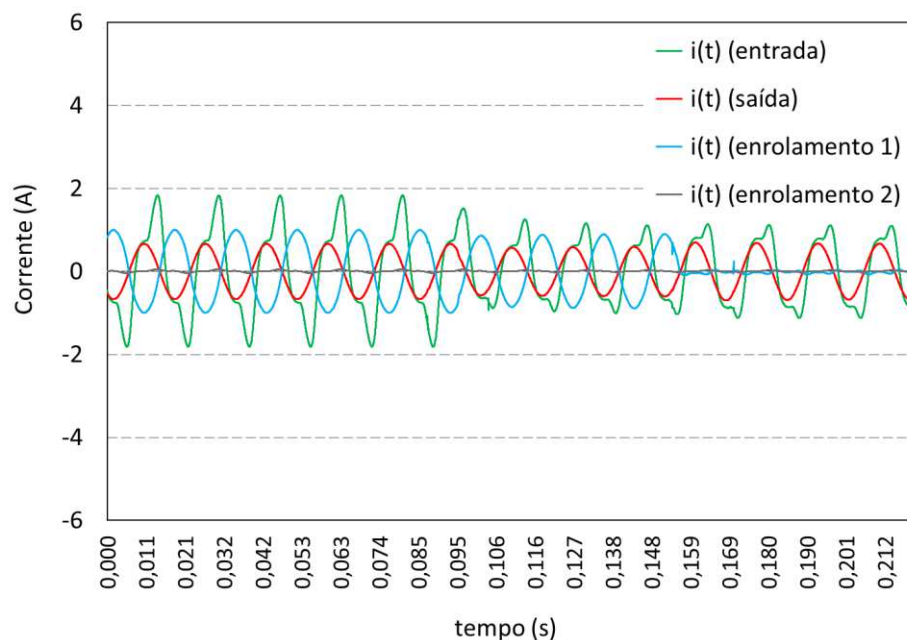


Figura 44 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* -1 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga resistiva.

Observa-se pela Figura 44 que não houve curto-circuito da bobina de *taps* 1 nesse chaveamento, mesmo os *TRIACs* estando conduzindo corrente. Para que não haja curto-circuito

das bobinas durante uma mudança de *tap*, duas condições devem ocorrer: (i) o comando para a chave S_1 abrir deve ser dado muito próximo à passagem por zero da sua corrente e (ii) a tensão sobre a chave S_3 deve estar próxima da sua passagem por zero. Atendidas essas duas condições, a abertura de S_1 ocorre de maneira natural e coordenada com o fechamento de S_3 , evitando o curto-circuito das bobinas de *taps* envolvidas no chaveamento. No entanto, é importante ressaltar que a metodologia de chaveamento proposta não é embasada na medição da corrente nem tensão das chaves, logo essa situação pode ou não ocorrer de maneira aleatória.

4.2.2 Variações Momentâneas de Tensão

O segundo conjunto de testes estando o regulador alimentando uma carga resistiva se tratou da aplicação das 6 variações momentâneas de tensão apresentadas na Tabela IV.2.

Na sequência, serão apresentadas algumas mudanças de *tap* de forma mais detalhada, iniciando pela discussão do evento IV da Tabela IV.2. As tensões de entrada e saída do regulador ao longo desta variação de tensão (elevação de magnitude igual a 1,18 e duração de 15 ciclos) são apresentadas na Fig. 45.

O comportamento da tensão ao longo do evento IV da Tabela IV estando o regulador alimentando uma carga resistiva é bem semelhante ao visto na subseção 4.1, em que o regulador estava a vazio: o RTE foi capaz de corrigir a variação de tensão em menos de 4 ciclos e, no final do evento, quando a tensão de entrada retorna ao seu valor nominal, a carga sofre um pequeno afundamento de 0,83 pu (105,8 V) que perdura por 3,5 ciclos, aproximadamente.

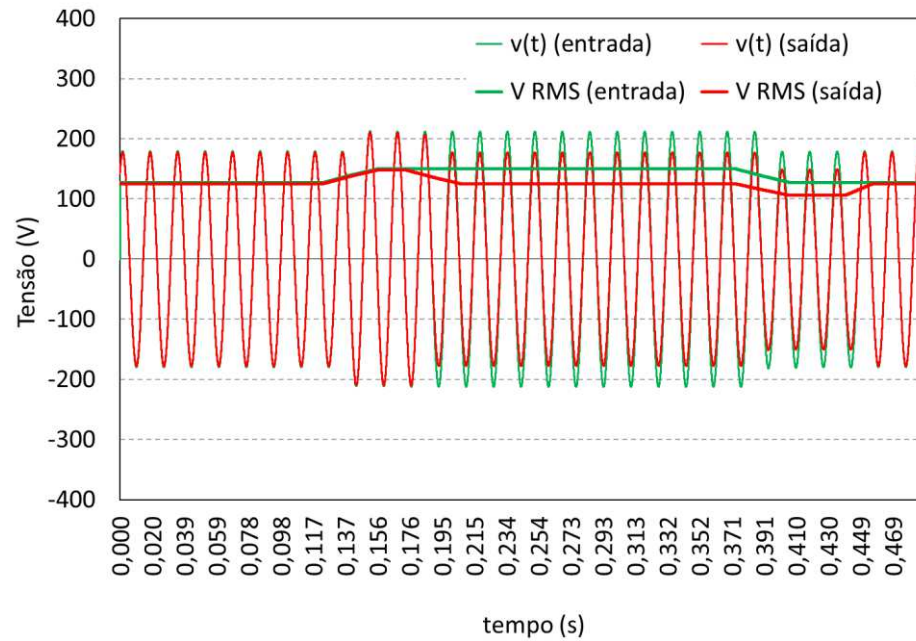


Figura 45 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante elevação momentânea de tensão de 1,18 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela IV.2) – Regulador alimentando carga resistiva.

As correntes de entrada, saída e nos 2 enrolamentos de *taps* do regulador durante esse mesmo evento são apresentadas na Fig. 46.

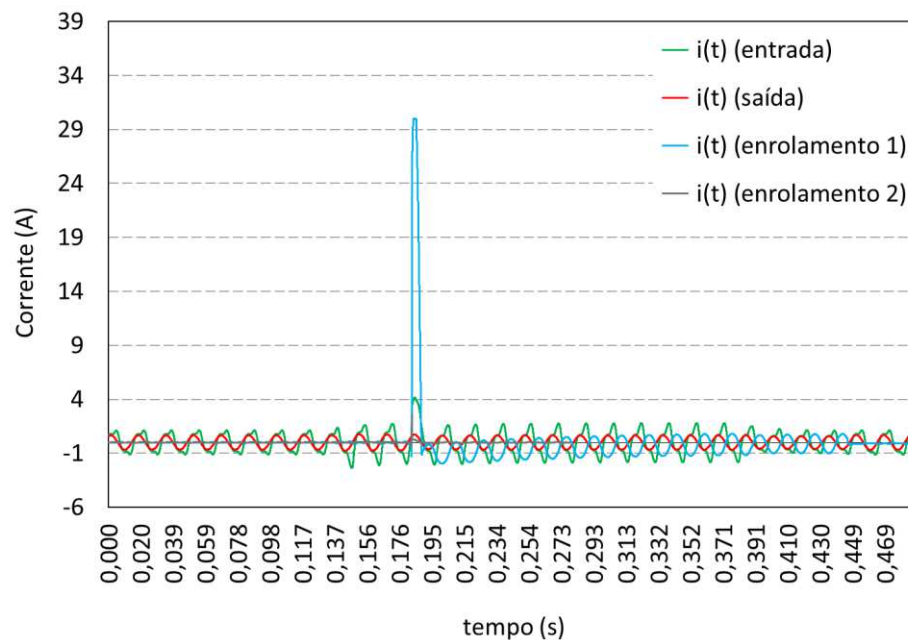


Figura 46 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante elevação momentânea de tensão de 1,18 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento IV da Tabela IV.2) – Regulador alimentando carga resistiva.

Assim como observado na subseção 4.2.1, o enrolamento de *taps* 1 entrou em curto-circuito na mudança do *tap* 0 para o *tap* -1, mas não apresentou sobrecorrente no retorno para o *tap* 0. O valor de pico da corrente do enrolamento de *taps* 1 durante o seu curto-circuito foi igual a 30,00 A, próximo dos 31,82 A calculados através da equação (1) para a tensão de entrada igual a 1,18 pu.

O afundamento de magnitude igual 0,39 pu da tensão de entrada (evento VI da Tabela IV.2) quando o regulador estava alimentando uma carga resistiva também teve resultados semelhantes aos observados no teste a vazio. As Figuras 47 e 48 apresentam as tensões e correntes no RTE, respectivamente.

Pela figura seguinte, observa-se que tanto a mudança do *tap* 0 para o *tap* +3, quanto o retorno ao *tap* 0, levaram menos de 4 ciclos para serem concluídas. O acionamento do *tap* +3 fez a tensão de saída se elevar de 0,38 pu (48,6 V) para 0,53 pu (67,4 V), o que pode representar a manutenção do funcionamento de uma carga, a depender de sua sensibilidade, obviamente.

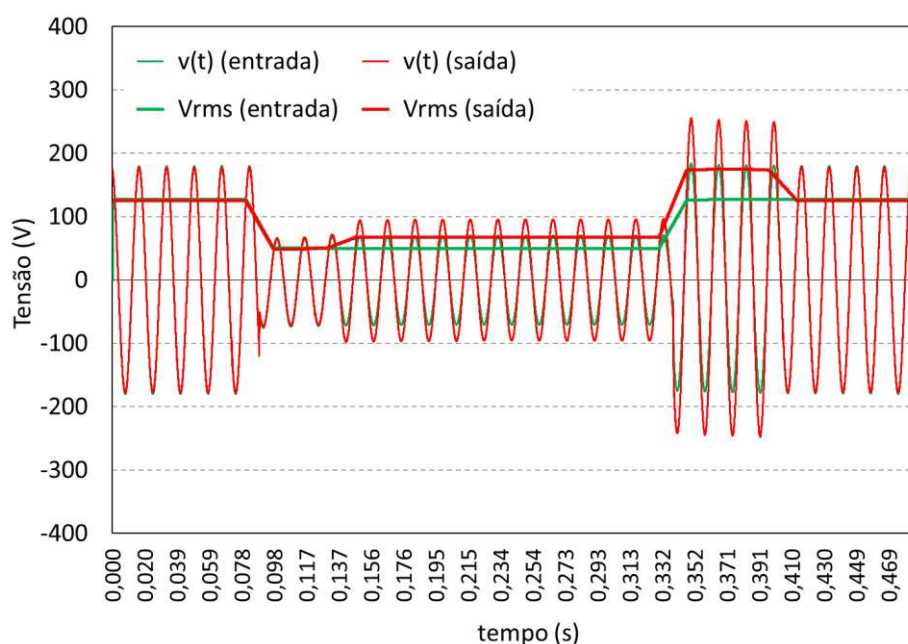


Figura 47 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão de 0,39 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento VI da Tabela 4.2) – Regulador alimentando carga resistiva.

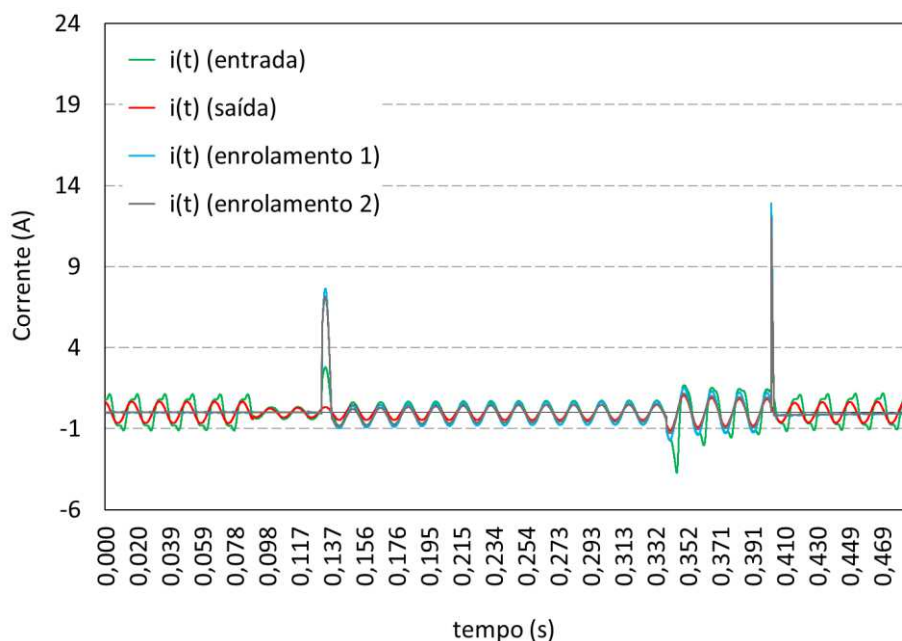


Figura 48 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo de tensão de 0,39 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento VI da Tabela 4.2) – Regulador alimentando carga resistiva.

As correntes de curto-circuito das bobinas também apresentaram valores próximos aos esperados, ratificando a eficácia dos resistores de curto-circuito. Na primeira troca de *tap*, os maiores valores de pico das correntes dos enrolamentos de *tap* 1 e 2 foram iguais a 7,63 A e 7,15 A, respectivamente. Os valores de pico das correntes de curto-circuito calculados através das equações (1) e (2) para um afundamento de 0,39 pu na tensão de entrada são 10,51 A e 8,76 A, na mesma ordem. Nota-se, também, que o curto-circuito dos dois enrolamentos de *taps* perdurou um pouco menos de $\frac{1}{2}$ ciclo.

No final do evento, ao retornar ao *tap* 0, as bobinas secundárias entraram em curto-circuito novamente. Entretanto, os maiores valores de pico das correntes registrados nos enrolamentos 1 e 2 foram 12,90 A e 12,05 A, respectivamente, enquanto que, de acordo com as equações (1) e (2), tais correntes valeriam 26,94 A e 22,45 A. Observa-se que o curto-circuito das bobinas durou menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo e que a sua corrente instantânea não atingiu a sua crista, o que justifica a diferença entre correntes medidas e calculadas, e reduz o estresse térmico no autotransformador e chaves do regulador.

Diante do exposto neste subitem 4.2, que apresentou os resultados dos primeiros testes sob carga do RTE, algumas constatações podem ser levantadas.

Primeiramente, em quase todas as mudanças de *tap* houve curto-circuito das bobinas de *taps*. Isso ocorreu porque a abertura efetiva dos *TRIACs* ocorre somente na próxima

passagem por zero da sua corrente após o seu sinal de *gate* ter sido retirado. Todavia, constatou-se pelas medições que as correntes de curto-circuito das bobinas de *taps* ficaram próximas aos valores calculados pelas equações (1) e (2). Adicionalmente, na pior situação apresentada, os enrolamentos permaneceram em curto durante $\frac{1}{2}$ ciclo. Dessa forma, é possível afirmar que a lógica de chaveamento e os resistores R_1 e R_2 atuaram de forma adequada no controle do curto-circuito das bobinas de *taps*, garantindo a segurança operativa do equipamento.

Outro ponto relevante a ser destacado diz respeito à queda de tensão nas chaves estáticas, agora que estão conduzindo corrente. De acordo com a folha de dados do fabricante, a queda de tensão em condução pode chegar a 1,55 V, por chave. Essa queda de tensão tem impacto tanto na corrente de curto-circuito das bobinas de *taps*, uma vez que diminui a tensão efetivamente aplicada aos resistores de chaveamento, como também na tensão de saída, reduzindo ligeiramente o seu valor, a depender da quantidade de chaves acionadas.

4.3 ENSAIOS DO RTE ALIMENTANDO CARGA NÃO LINEAR

O terceiro conjunto de testes do RTE teve como objetivo avaliar o comportamento do regulador estático desenvolvido suprindo uma carga não linear. A carga não linear conectada à saída do regulador se tratou de uma composição de lâmpadas incandescentes dimerizadas (2 lâmpadas de 60 W dimerizadas para potência de 50 W, cada), fluorescentes (89 W distribuídos em 4 elementos) e LEDs (4 lâmpadas somando 39 W), totalizando 228 W de potência ativa nominal. Assim como nos ensaios anteriores, a tensão de entrada do RTE foi submetida às variações de tensão temporárias da Tabela IV.1 e momentâneas descritas na Tabela IV.2.

4.3.1 Variações Temporárias de Tensão

A Figura 49 apresenta o comportamento das tensões eficazes na entrada e saída do RTE ao longo de todas as variações temporárias de tensão da Tabela IV.1.

As mudanças de *tap* realizadas pelo RTE conseguiram manter a tensão de saída dentro da faixa adequada em todas as variações aplicadas. Como a metodologia de chaveamento não está fundamentada na passagem por zero da corrente, o fato da corrente apresentar distorção harmônica e/ou defasamento em relação do sinal de tensão não tem qualquer impacto na atuação do controle do equipamento. Conforme será apresentado a seguir, as trocas de *tap* continuaram

a ser concluídas em menos de 4 ciclos. Vale salientar que os limites superior e inferior são iguais a 0,9 e 1,1 pu, respectivamente, para a tensão de referência de 127 V.

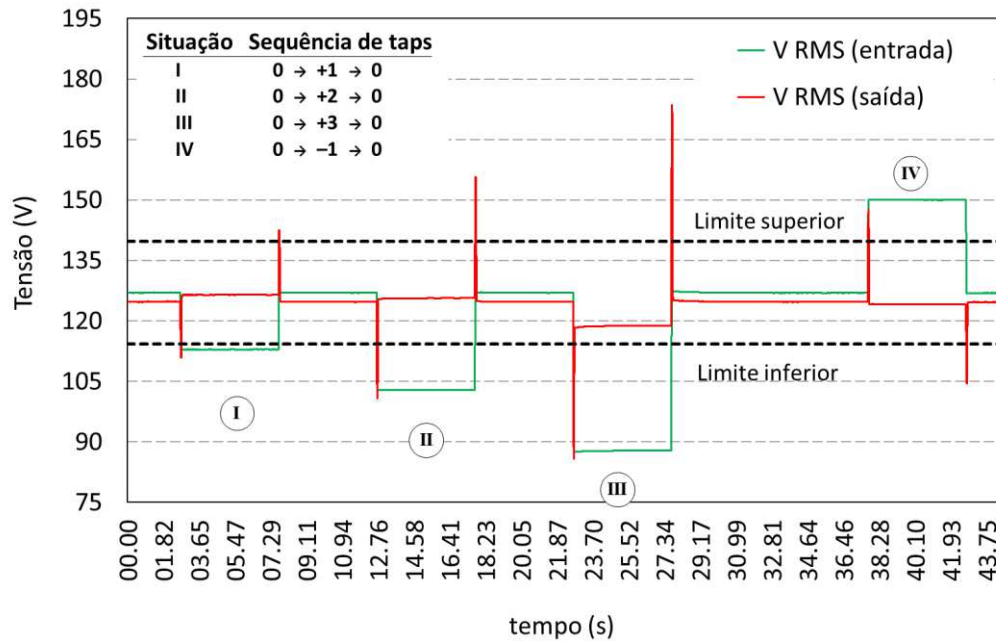


Figura 49 - Tensões eficazes na entrada e saída do RTE para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga não linear.

Assim como no conjunto de testes anterior, como as chaves do regulador estavam conduzindo corrente, a magnitude da tensão de saída apresentou pequenas diferenças em relação àquelas constatadas nos testes a vazio do RTE.

A Figura 50 apresenta as tensões de entrada e saída do regulador no início do evento I da Fig. 49, que demandou o acionamento do *tap* +1 do equipamento.

Mesmo para um evento mais brando (afundamento de 0,87 pu na carga), a mudança de *tap* levou menos de 4 ciclos para ser concluída. O acionamento do *tap* +1 fez a tensão na carga se elevar de 0,87 pu (110,9 V) para 1,0 pu (126,4 V)

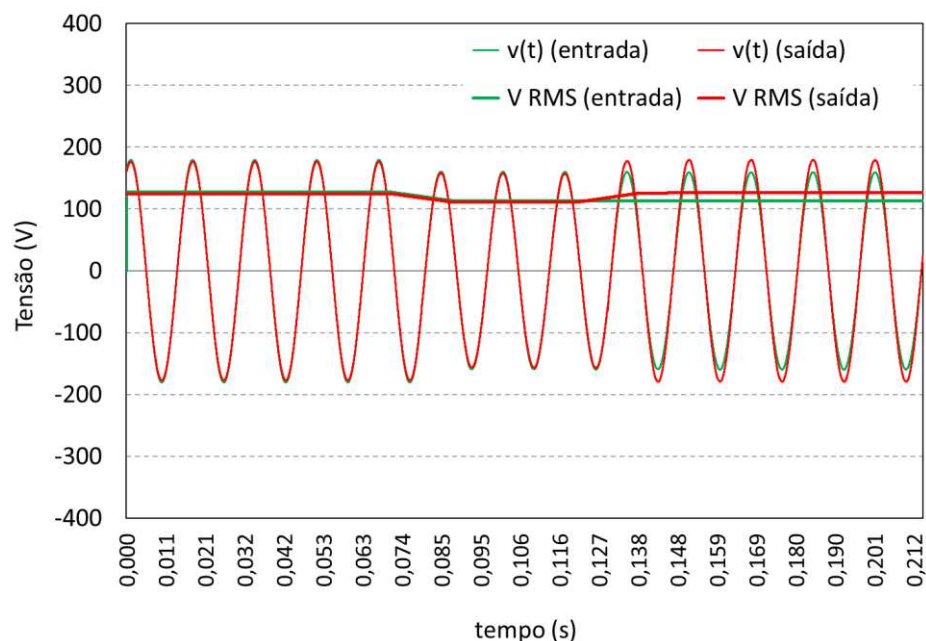


Figura 50 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* +1, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga não linear.

As correntes na entrada, saída e nos dois enrolamentos de *taps* para esse evento são apresentadas na Fig. 51.

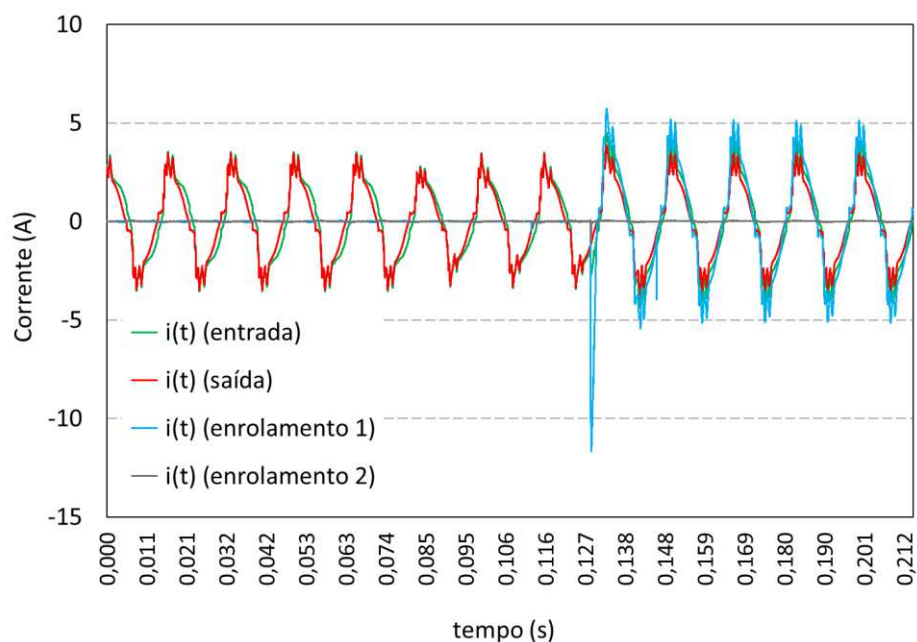


Figura 51 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* +1, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga não linear.

Observa-se que o acionamento do *tap* +1 acarretou o curto-circuito do enrolamento de *taps* 1. No entanto, essa sobrecorrente se manteve por menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo e teve amplitude

máxima razoavelmente baixa (11,66 A de pico). Nota-se que a corrente não atingiu sua crista no curto-circuito, o que implicou em um chaveamento ainda mais suave. Considerando um cenário sem distorção, para um afundamento de 0,89 pu na entrada do RTE, a corrente máxima esperada no enrolamento de *taps* 1 seria de 23,95 A de pico.

As tensões de entrada e saída no final do evento I da Figura 49, quando a tensão de entrada do regulador retorna ao seu valor nominal estando o equipamento no *tap* +1, são apresentadas na Fig. 52.

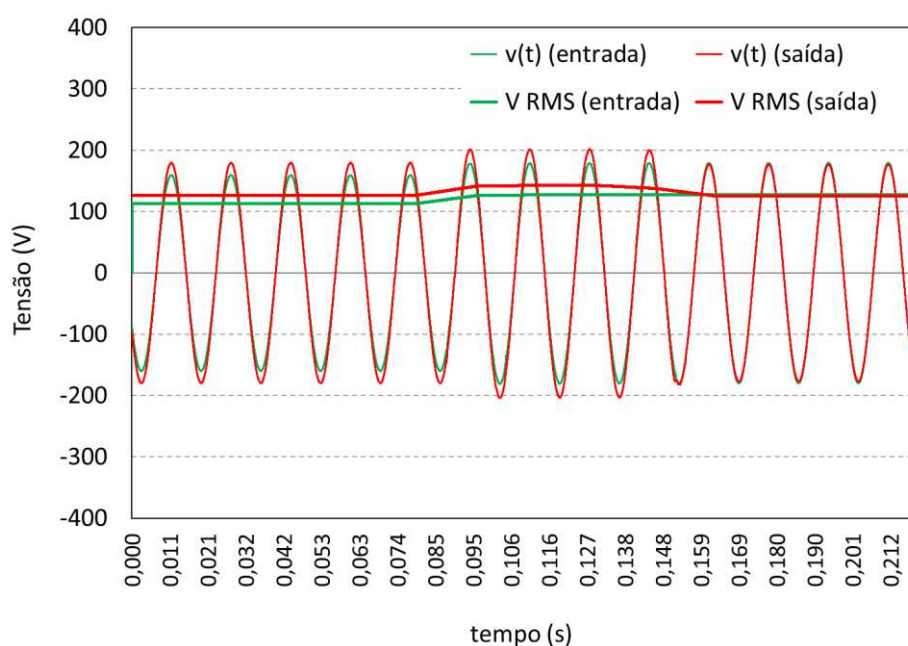


Figura 52 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* +1 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga não linear.

Como o regulador estava com o *tap* +1 acionado, a carga sentiu uma pequena elevação de tensão (1,12 pu) enquanto o RTE não retornou ao *tap* 0, o que levou menos de 4 ciclos para ocorrer.

As correntes na entrada, saída e nos enrolamentos de *taps* do RTE para esse mesmo evento são apresentadas na Fig. 53.

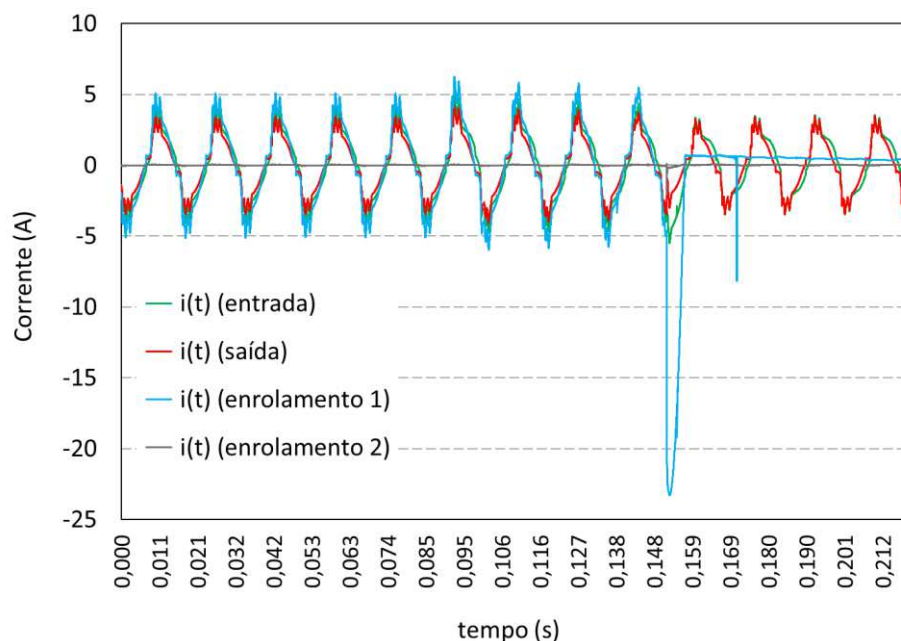


Figura 53 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* +1 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga não linear.

O retorno do RTE para o *tap* 0 ocasionou o curto-circuito do enrolamento de *taps* 1. O maior valor de pico observado foi de 23,27 A, próximo dos 26,94 A calculados através da equação (1). Pela imagem anterior, observa-se, também, que a bobina em questão permaneceu em curto-circuito por menos de $\frac{1}{2}$ ciclo.

4.3.2 Variações Momentâneas de Tensão

Na segunda bateria de testes estando o RTE alimentando uma carga não linear, foram aplicadas as variações momentâneas de tensão apresentadas na Tabela IV.2 à entrada do equipamento.

Os resultados dos testes em que o RTE estava alimentando uma carga não linear foram bastante semelhantes aos da subseção anterior, em que o regulador estava alimentando uma carga resistiva. Dessa forma, somente será apresentado o evento II da Tabela IV.2, que se trata de um afundamento de 0,79 pu de magnitude e 15 ciclos de duração na tensão de entrada do regulador. Esse evento demandou que o regulador acionasse o *tap* +2 para corrigir a tensão na carga. As tensões de entrada e saída do equipamento neste evento são apresentadas na Fig. 54.

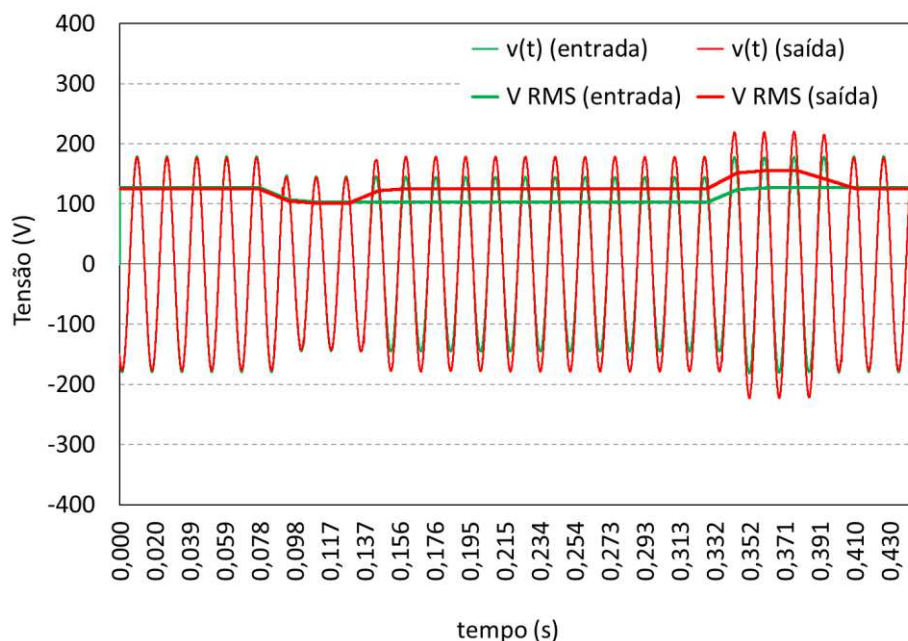


Figura 54 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão de 0,79 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento II da Tabela IV.2) – Regulador alimentando carga não linear.

Tanto o acionamento do *tap* +2 quanto o retorno ao *tap* 0 foram concluídos em menos de 4 ciclos.

As correntes na entrada, saída e nos 2 enrolamentos de *taps* do regulador ao longo desse evento são mostradas na Fig. 55.

Pela análise da Fig. 55, percebe-se que o enrolamento de *taps* 2 entrou em curto-circuito em ambas mudanças de *tap*. A maior corrente de curto-circuito ocorreu no início do evento II, quando o pico da corrente alcançou 16,00 A. Aplicando-se a equação (2), o valor de pico da corrente de curto-circuito calculado para um afundamento de 0,79 pu na entrada do RTE seria de 17,68 A.

No final do afundamento, quando a tensão de entrada retorna ao seu valor nominal e o regulador está com o *tap* +2 acionado, a tensão na carga, que é composta por lâmpadas eletrônicas, aumenta abruptamente de 0,99 pu para 1,22 pu, resultando em um pequeno transitório na corrente de carga, caracterizado na Fig. 55 pela sobrecorrente com valor de pico de 14, 17 A no instante de tempo igual a 0,341s.

No retorno do RTE ao *tap* 0, a corrente do enrolamento de *taps* 2 alcançou 13,18 A de pico durante um período de tempo menor que $\frac{1}{4}$ de ciclo, valor muito inferior aos 22,45 A calculados através da equação (2). Novamente, essa diferença ocorreu porque a corrente de curto-circuito não atingiu a sua crista na mudança de *tap* registrada.

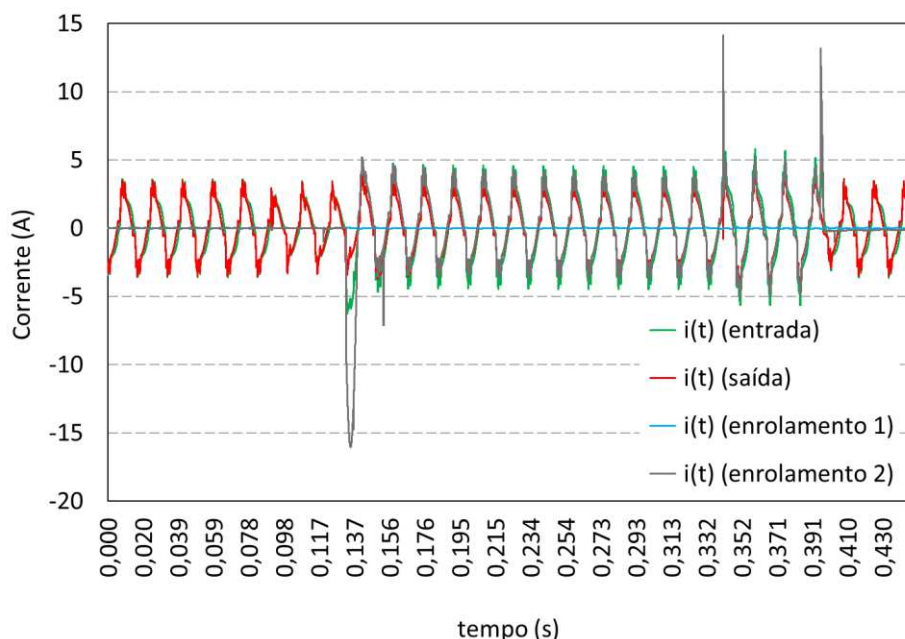


Figura 55 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante afundamento momentâneo de tensão de 0,79 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento II da Tabela IV.2) – Regulador alimentando carga não linear.

Diante de todo o exposto, conclui-se que a não linearidade da carga não é fator limitante para a aplicação da metodologia de chaveamento de *taps* proposta. O tempo para realizar o acionamento de um *tap*, assim como as correntes de curto-circuito das bobinas foram semelhantes aos observados para as outras duas situações de carregamento anteriores.

4.4 ENSAIOS DO RTE ALIMENTANDO CARGA COM FATOR DE POTÊNCIA INDUTIVO

O último conjunto de testes do RTE teve como objetivo avaliar o comportamento do regulador suprindo uma carga em que os sinais de tensão e corrente apresentam deslocamento angular entre si. Para tanto, uma carga de 200 W e 100 var nominais (fator de potência fundamental 0,89 indutivo - deslocamento angular entre tensão e corrente de $27,13^\circ$), composta de lâmpadas incandescentes e indutores, foi conectada à saída do regulador. Assim como nas três situações de carregamento anteriores, o regulador foi submetido às variações de tensão das Tabelas IV.1 (temporárias) e IV.2 (momentâneas).

4.4.1 Variações Temporárias de Tensão

As tensões eficazes de entrada e saída do RTE ao longo dos testes da Tabela IV.1 são apresentadas na Fig. 56. Novamente, os limites superior e inferior são iguais a 0,9 e 1,1 pu para a tensão de referência de 127 V, respectivamente.

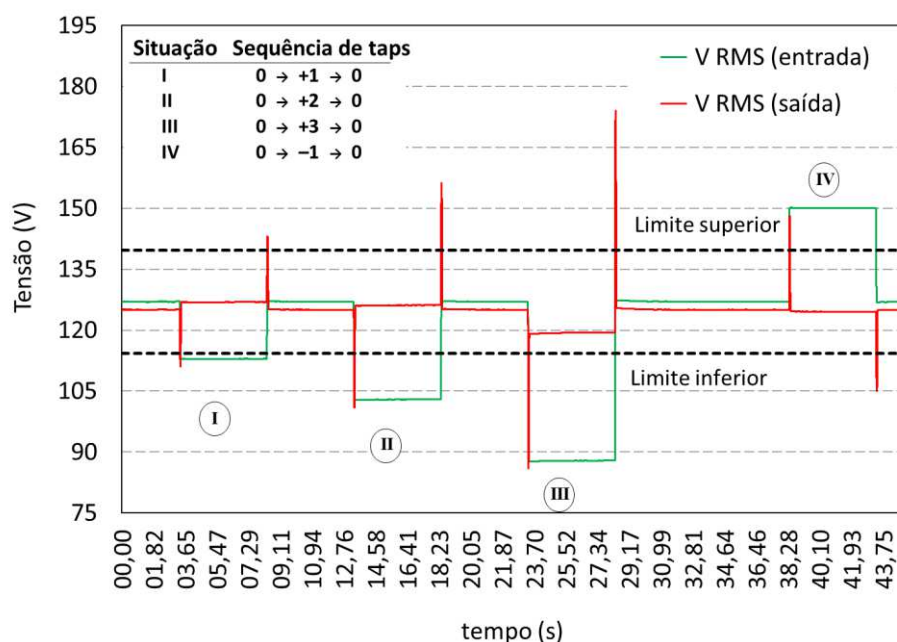


Figura 56 - Tensões eficazes na entrada e saída do RTE para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga com fator de potência indutivo.

Pela figura anterior, observa-se que o RTE atuou adequadamente de forma a corrigir a tensão durante as quatro variações temporárias de tensão aplicadas. Igualmente ao que foi observado nas outras 3 condições de carregamento, no final de cada evento, como consequência do retorno da tensão de entrada ao seu valor nominal, a tensão na saída do regulador sofre uma variação de tensão, que é corrigida em menos de 4 ciclos.

Visando uma análise mais aprofundada do desempenho do RTE suprindo uma carga indutiva, será apresentado na sequência o evento IV da Fig. 56, que se trata de uma elevação de tensão de 1,18 pu de magnitude na entrada do regulador.

A Fig. 57 apresenta as tensões de entrada e saída do RTE no início do evento, que demandou o acionamento do tap -1.

A elevação de tensão foi corrigida em menos de 4 ciclos, rebaixando a magnitude da tensão de saída de 1,17 pu (148,0 V) para 0,98 pu (124,7 V).

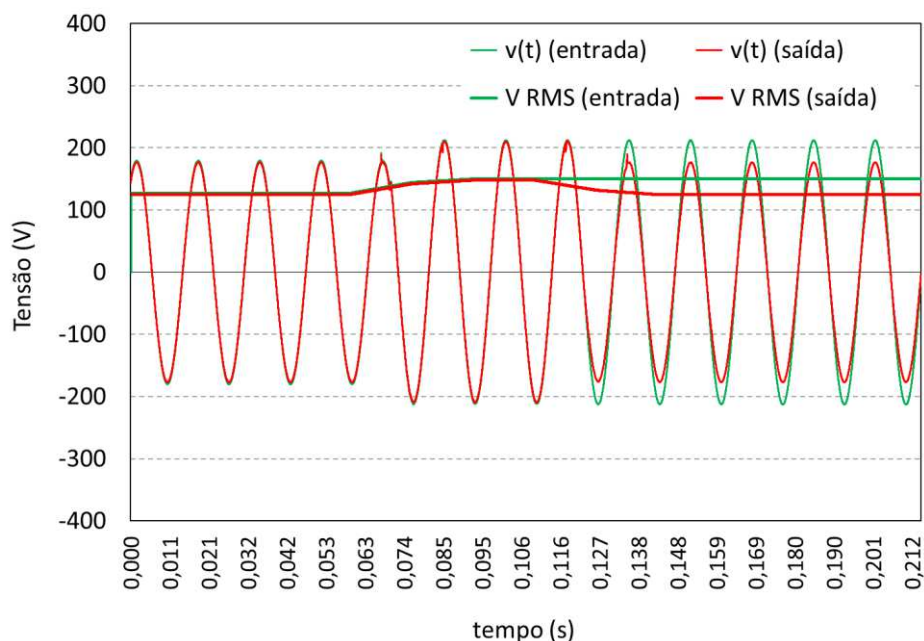


Figura 57 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de tap 0 para *tap* - 1, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga com fator de potência indutivo.

O comportamento das correntes na entrada, saída e nos dois enrolamentos de *taps* para essa mesma mudança de *tap* é apresentado na Fig. 58.

Pela análise da imagem a seguir, percebe-se que o enrolamento de *taps* 1 entrou em curto-circuito durante o acionamento do *tap* -1 por menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo, apenas. O máximo valor de pico registrado para a corrente desse enrolamento foi de 22,68 A, muito abaixo dos 31,79 A calculados a partir da equação (1). O valor medido da corrente de curto-circuito do enrolamento de *taps* 1 ficou muito distante do valor calculado, pois a corrente instantânea não atingiu a sua crista, amenizando ainda mais o impacto do curto-circuito nas bobinas do autotransformador e nas chaves estáticas.

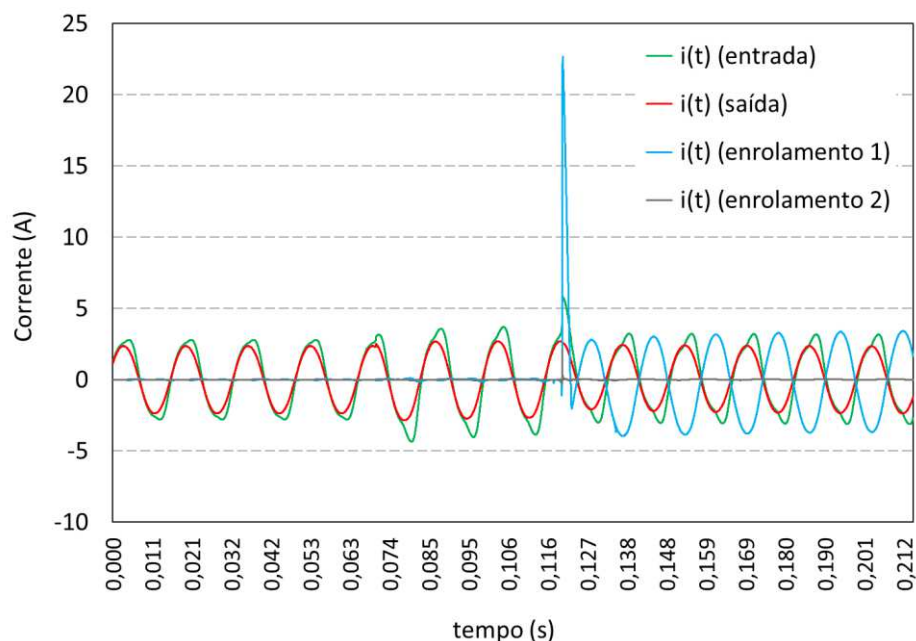


Figura 58 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* 0 para *tap* -1, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga com fator de potência indutivo.

As tensões de entrada e saída do RTE no final do evento IV da Fig. 56, quando a tensão de entrada retorna ao seu valor nominal estando o regulador no *tap* -1, são apresentadas na Fig. 59.

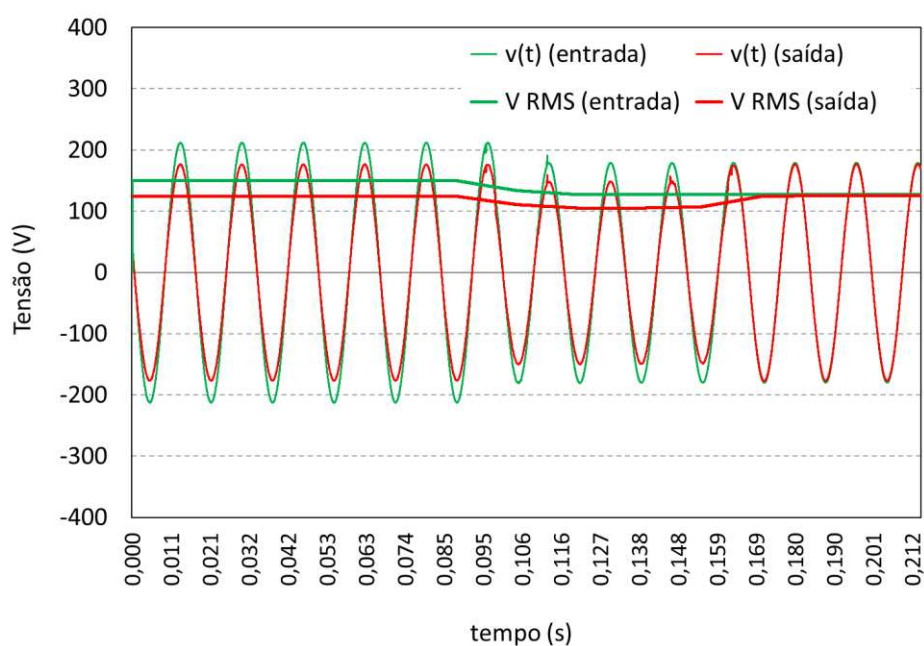


Figura 59 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE na mudança da posição de *tap* -1 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga com fator de potência indutivo.

No instante em que a tensão eficaz de entrada retorna a 127 V, a tensão na saída do RTE é reduzida para 105,01 V (0,83 pu) em pouco menos de 4 ciclos, enquanto o regulador não retorna ao *tap* 0. De qualquer forma, não são esperados problemas no funcionamento de cargas quando submetidas a eventos com essa magnitude de tensão e duração.

Percebe-se que essa foi a mudança de *tap* que mais demorou para ser concluída dentre todas as apresentadas. Três fatores contribuíram para que essa mudança de *tap* demorasse quase 4 ciclos para ser concluída: (i) a severidade relativamente pequena do evento, retardando a detecção do evento pelo controle, (ii) a mudança de *tap* se tratar de um retorno à posição 0, o que faz com que o curto-circuito das bobinas de *taps* ocorra na ativação do *tap* final, e (iii) o fato da carga ter defasamento angular entre tensão e corrente, o que magnifica a chance do curto-circuito dos enrolamentos de *taps* ocorrer.

As correntes na entrada, saída e nas bobinas de *taps* do RTE durante a mudança de *tap* em questão são apresentadas na Fig. 60.

A corrente de curto-circuito da bobina de *taps* 1 apresentou valor de pico máximo igual a 26,50 A, muito próximo dos 26,94 A calculados através da equação (1), ratificando, novamente, a efetividade dos resistores de chaveamento no controle da magnitude da corrente de curto-circuito das bobinas de *taps*.

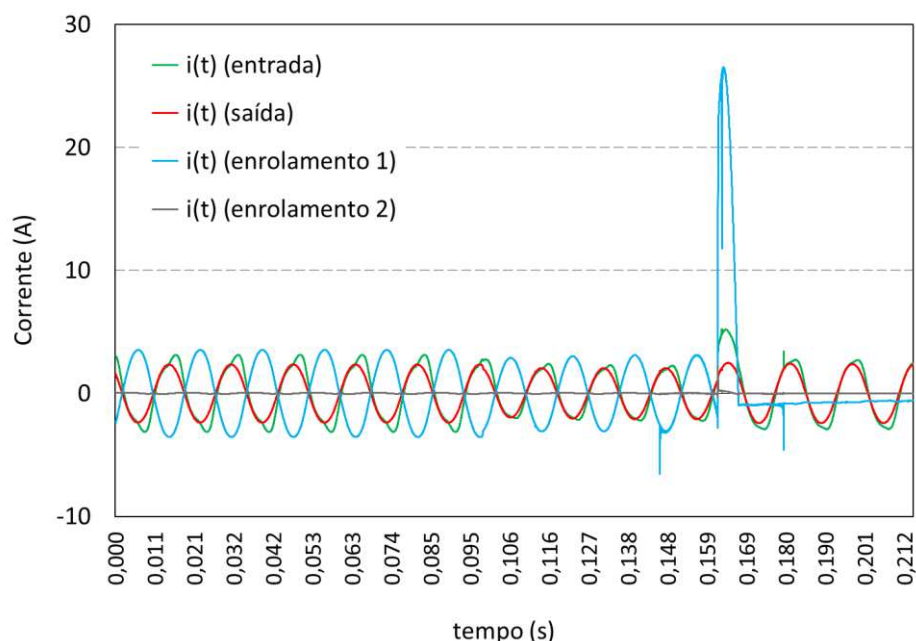


Figura 60 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE na mudança da posição de *tap* -1 para *tap* 0, para teste de variações temporárias de tensão – Regulador alimentando carga com fator de potência indutivo.

4.4.2 Variações Momentâneas de Tensão

No último conjunto de testes laboratoriais, foram aplicadas à entrada do RTE as 6 variações momentâneas de tensão listadas na Tabela IV.2.

O evento VI da Tabela IV.2, que se trata de afundamento de 0,39 pu de magnitude e 15 ciclos, é apresentado na sequência. As tensões na entrada e saída do regulador durante esse evento são mostradas na Fig. 61.

Cada uma das duas trocas de *tap*, mudança do *tap* 0 para o *tap* +3 e o retorno para a posição 0, levou menos de 4 ciclos para ser concluída. A tensão na carga durante o evento foi elevada de 0,39 pu (49,7 V) para 0,52 pu (66,1 V). Ao final do evento, devido ao acionamento do *tap* +3, a carga sofreu uma elevação de tensão de 1,37 pu (174,0 V) durante 3,5 ciclos, aproximadamente.

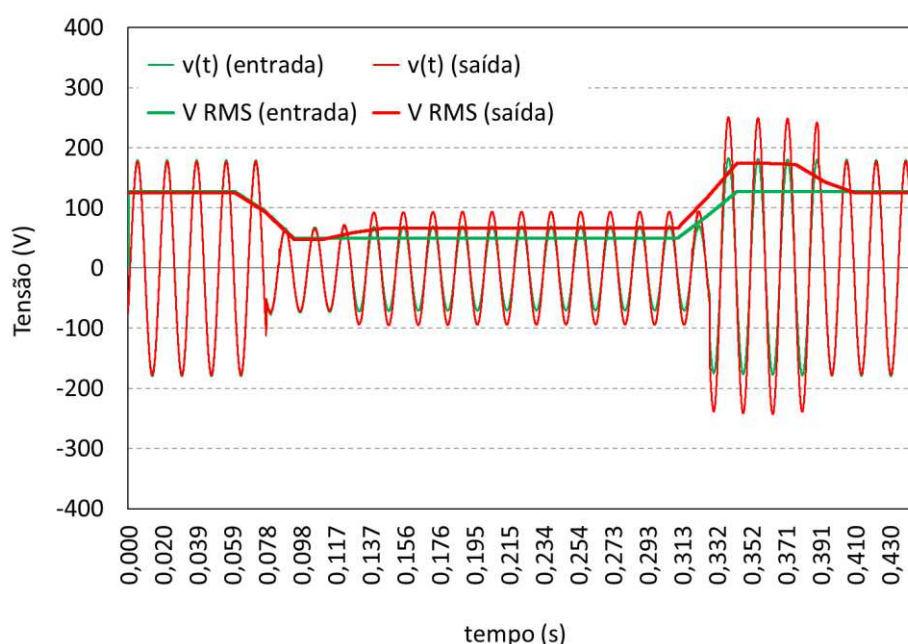


Figura 61 - Tensões eficazes e instantâneas na entrada e saída do RTE durante afundamento momentâneo de tensão de 0,39 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento VI da Tabela IV.2) – Regulador alimentando carga com fator de potência indutivo.

As correntes na entrada, saída e nos 2 enrolamentos de *taps* para esse afundamento de tensão são apresentadas na Fig. 62.

Conforme pode ser observado na figura seguinte, na mudança do *tap* 0 para o *tap* +3, os valores de pico das correntes dos enrolamentos de *taps* 1 e 2 foram iguais a 7,70 A e 8,55 A,

respectivamente, próximos dos 10,50 A e 8,76 A calculados através das equações (1) e (2), nesta ordem.

Ao final do evento em questão, quando o RTE retorna à posição 0, os valores máximos das correntes de pico observados foram iguais a 22,18 A e 19,38 A para as bobinas de *taps* 1 e 2, respectivamente. De acordo com as equações (1) e (2), os máximos valores de pico dessas duas correntes são iguais a 26,94 A e 22,45 A, respectivamente.

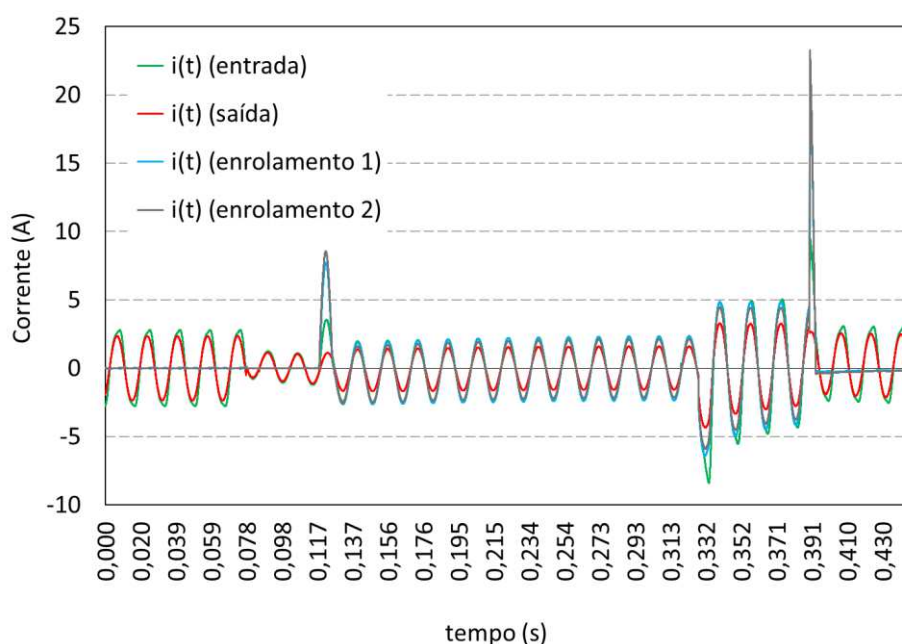


Figura 62 - Correntes instantâneas na entrada, saída e enrolamentos de *taps* do RTE durante elevação momentânea de tensão de 0,39 pu de amplitude e 15 ciclos de duração (evento VI da Tabela IV.2) – Regulador alimentando carga com fator de potência indutivo.

O desempenho do RTE alimentando uma carga indutiva foi muito semelhante com o observado nas outras condições de carregamento: os eventos foram corrigidos em menos de 4 ciclos e as correntes de curto-circuito registradas tiveram magnitude de acordo com o projetado, garantindo a segurança operativa das cargas conectadas à saída do regulador e também dos componentes do próprio equipamento.

Conforme supracitado, o defasamento entre os sinais de tensão e corrente é um fator que aumenta a probabilidade das bobinas de *taps* entrarem em curto-circuito nas mudanças de *tap*. Em um caso extremo, em que a corrente de carga apresenta defasamento de 90° em relação à tensão, a única condição em que não ocorrerá o curto-circuito das bobinas secundárias é no caso em que acionamento das chaves é dado exatamente na passagem por zero do sinal de corrente. A situação inversa, em que não há nenhum defasamento entre os sinais de tensão e

corrente, os instantes imediatamente anteriores e posteriores à passagem por zero da tensão e corrente não irão resultar em curto-circuito. A largura dessa faixa de tensão pré e pós a passagem por zero da corrente depende da magnitude da tensão das bobinas secundárias e da queda de tensão em condução dos *TRIACs*.

De qualquer forma, todas as mudanças de *tap* ocorreram em menos de 4 ciclos e as correntes de curto-circuito das bobinas de *taps* foram próximas, e até menores, do que os valores projetados.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS TESTES LABORATORIAIS

Os testes laboratoriais apresentaram resultados bastante promissores para a aplicação da metodologia de chaveamento estático de *taps* proposta em redes reais. Em todas as 4 condições de carregamento ensaiadas e na totalidade das mudanças de *tap* observadas, o RTE realizou a correção da tensão na sua saída em menos de 4 ciclos. Sendo assim, pode-se afirmar que o regulador estático desenvolvido é capaz de corrigir VTCDs com duração maior que 4 ciclos e não apresenta restrições em relação à característica (magnitude, forma e defasamento angular) da corrente da carga.

Outras constatações importantes dizem respeito à corrente de curto-circuito das bobinas de *taps*. Primeiramente, conforme pôde ser observado em todas as medições apresentadas neste capítulo, as correntes de curto-circuito dos enrolamentos de *taps* foram controladas pelas resistências de chaveamento de forma adequada, conforme projetado e descrito no Capítulo 2. Além disso, observou-se que os curtos-circuitos das bobinas do autotransformador perduraram, no pior caso, por apenas $\frac{1}{2}$ ciclo, que é o tempo necessário para que a corrente das chaves passe por zero pelo menos uma vez.

Assim como observado nas simulações computacionais, os ensaios laboratoriais demonstraram que o funcionamento do RTE é capaz de ocasionar pequenas distorções harmônicas na tensão de saída.

A análise das distorções harmônicas para os ensaios do protótipo, apresentada na Tabela IV.3, foi feita lançando-se mão de alguns testes realizados nas seções 4.2 e 4.3, que são referentes à alimentação de cargas resistiva e não linear, respectivamente.

Tabela IV.3 - Resultados dos ensaios do RTE alimentando carga linear e carga não linear.

Situação de carregamento	Carga linear			Carga não-linear		
<i>Tap</i> acionado	0	+3	-1	0	+3	-1
Corrente eficaz de saída (A)	1,86	1,83	1,85	1,85	1,80	1,84
DHT de corrente de saída (%)	22,93	23,95	23,63	0,74	1,05	0,86
Tensão eficaz de saída (V)	124,7	118,8	124,2	124,7	118,7	124
DHT de tensão de saída (%)	0,57	0,9	0,63	0,47	1,05	0,83
Tensão eficaz de saída fundamental (V)	124,70	118,80	124,20	124,70	118,69	124,00
Tensão eficaz de saída harmônica (V)	0,71	1,07	0,78	0,59	1,25	1,03
Tensão eficaz de entrada (V)	127	87,8	150	127	87,8	150
DHT de tensão de entrada (%)	0,03	0,12	0,08	0,03	0,01	0,27
Tensão eficaz de entrada fundamental (V)	127,00	87,80	150,00	127,00	87,80	150,00
Tensão eficaz de entrada harmônica (V)	0,04	0,11	0,12	0,04	0,01	0,40

A distorção harmônica de tensão na saída do RTE foi semelhante em ambas situações de carregamento. Percebe-se que, nas duas condições de carga, a maior tensão eficaz harmônica na saída do regulador ocorreu durante o acionamento do *tap* +3. Essa constatação mostra que a distorção harmônica na tensão de saída está muito mais relacionada à queda de tensão nas chaves estáticas do que à circulação de corrente harmônica oriunda da carga, isso porque essa posição de *tap* requer o acionamento de 4 *TRIACs*.

De qualquer forma, ao se analisar os resultados de distorção harmônica na tensão de saída, mesmo no pior caso, a distorção harmônica percentual foi baixa.

5. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido ao longo desta Tese de Doutorado apresentou os aspectos teóricos e práticos de uma nova metodologia de chaveamento e controle para um regulador de tensão estático de baixa tensão, objetivando fornecer os insumos básicos, de forma simples e clara, para a construção de um equipamento desse tipo, além de apresentar as principais características e limitações relativas ao funcionamento do equipamento, tal como tempo de chaveamento, tensão durante a troca de *tap*, entre outras.

Inicialmente, o primeiro capítulo apresentou a relevância das VTCDs nos mais variados processos produtivos, sendo motivo de preocupação de distribuidoras de energia elétrica e, principalmente, de consumidores industriais e comerciais, os quais, em geral, representam a classe de consumidores mais sensível a esse tipo de distúrbio. Adicionalmente, essa primeira seção do texto tratou de percorrer historicamente a evolução dos reguladores de tensão estáticos, assim como as metodologias desenvolvidas e apresentadas na literatura, apontando, de forma sucinta, os principais pontos positivos e fragilidades de cada uma delas.

Pelas referências listadas, ficou claro que a maioria dos métodos investigados apresenta como vulnerabilidade a dependência da medição da corrente e/ou a identificação de sua passagem por zero. Nesse sentido, a aquisição do sinal de corrente pode ser um desafio para situações de baixo carregamento, assim como de altos níveis de distorção harmônica, podendo representar uma limitação à aplicação dessas metodologias de controle. Adicionalmente à dificuldade em relação à aquisição do sinal de corrente, foi observado que as metodologias de chaveamento mais modernas utilizam chaves estáticas *IGBTs*, que são transistores capazes de interromper a corrente passante a qualquer momento ao custo de uma sobretensão sobre os mesmos. Além de serem chaves relativamente caras, quando comparadas aos tiristores e *TRIACs*, por exemplo, a lógica de chaveamento para a utilização das mesmas é mais complexa, pois utiliza a corrente das chaves e/ou dos enrolamentos de *taps* para determinar os seus instantes de acionamento. Em contrapartida, a proposta de regulador de tensão estático desenvolvida neste trabalho avança com o tema ao desenvolver um controle independente da medição da corrente, além de utilizar *TRIACs* como chaves estáticas, que são chaves bidirecionais, deixando o equipamento mais robusto, mais barato e mais simples que os reguladores estáticos até então desenvolvidos.

A segunda seção do trabalho discorreu sobre a especificação de componentes e equipamentos utilizados na simulação computacional e na construção do protótipo laboratorial

do RTE, abordando desde os parâmetros de seu aparato eletromagnético até o método de controle para a mudança de *taps*. O controle do equipamento, no momento que detecta a necessidade de correção da tensão na carga, aciona um *tap* intermediário, composto por um resistor de chaveamento, o qual tem como objetivo limitar um eventual curto-circuito das bobinas de *taps*, e, após alguns instantes, aciona o *tap* definitivo. Uma das questões levantadas nessa parte do texto foi o retorno da tensão de entrada ao seu valor nominal enquanto o RTE está com um de seus *taps* acionado. Nessa situação, a tensão aplicada à carga poderia ser prejudicial ao seu funcionamento. Todavia, trabalhos mais recentes sobre suportabilidade e sensibilidade de equipamentos mostraram que, para os níveis de tensão observados, assim como os tempos de chaveamento do regulador proposto (menor que 4 ciclos), não são esperadas paradas de processo e/ou falhas de equipamentos alimentados pelo RTE. De qualquer forma, caso necessário, o aumento da margem de segurança operacional das cargas supridas pelo RTE, pode ser facilmente obtido com a redução da tensão nominal dos *taps*, ao custo de uma redução da sua faixa de regulação.

O Capítulo 3 apresentou os resultados de simulações computacionais do RTE descrito ao longo do segundo capítulo. O comportamento das tensões de saída do regulador em todas as mudanças de *tap* simuladas ratificou a eficiência da metodologia de chaveamento desenvolvida em corrigir variações de tensão na carga em menos de 4 ciclos. Adicionalmente, observou-se que as correntes de curto-circuito simuladas tiveram valores próximos ou menores que os calculados teoricamente. Além disso, observou-se que a duração máxima dos curtos-circuitos das bobinas de *taps* foi igual a $\frac{1}{2}$ ciclo da frequência fundamental.

Adicionalmente, o Capítulo 4 desta Tese de Doutorado apresentou os resultados registrados ao longo dos testes laboratoriais realizados com o protótipo desenvolvido. Os resultados obtidos através das medições realizadas no equipamento protótipo se mostraram totalmente aderentes às constatações levantadas no terceiro capítulo deste documento, quais sejam:

- todas as variações de tensão foram corrigidas em menos de 4 ciclos;
- os resistores de chaveamento foram capazes de limitar os curtos-circuitos das bobinas de *taps* aos valores projetados e seguros para a operação do autotransformador e das chaves estáticas;
- as correntes de curto-circuito dos enrolamentos de *taps* tiveram duração igual ou menor que $\frac{1}{2}$ ciclo, reduzindo ainda mais o estresse térmico dos componentes do RTE;

- no instante em que a tensão de entrada retorna à faixa de tensão adequada, estando o regulador com um de seus *taps* acionados, a carga sentirá uma segunda variação de tensão, que será corrigida em menos de 4 ciclos, enquanto o regulador não retorna ao seu *tap* 0. Essa variação de tensão, considerando a tensão de entrada igual a 1,0 pu e o RTE com o *tap* +3 acionado, pode chegar a, aproximadamente, 1,4 pu. No entanto, o período que a tensão permanece nesse patamar é muito curto e não se esperam falhas ou danos aos equipamentos conectados à saída do RTE.

Por fim, devido à sua capacidade de realizar a regulação da tensão durante eventos com duração maior do que 4 ciclos, as aplicações do RTE abrangem tanto variações de tensão de longa duração, causadas pela dinâmica em regime permanente de uma rede elétrica; como variações de tensão de curta duração, que podem ser causadas por curtos-circuitos, partidas de motores e variações de carga/geração intermitentes, causadas por geradores fotovoltaicos, por exemplo.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das constatações apresentadas e reconhecendo a relevância da metodologia de chaveamento para o campo de estudo de reguladores de tensão estáticos e qualidade da energia elétrica, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Especificação da proteção contra sobretensões e sobrecorrentes cotidianas em redes de distribuição reais;
- Desenvolvimento de sistema para detecção de falhas das chaves estáticas;
- Desenvolvimento de interface homem-máquina amigável e registrador de mudanças de *tap*;
- Desenvolvimento de equipamento e controle trifásico para aplicação em redes trifásicas a 3 ou 4 fios;
- Construção de protótipo em escala comercial do regulador estático de tensão embarcando a metodologia de chaveamento desenvolvida neste trabalho;
- Validação e/ou desenvolvimento da metodologia para aplicação em ambientes de média e alta tensão, em que as correntes de curto-circuito passantes podem ter componente contínua expressiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KAJIHARA, H. H. Quality power for electronics. **Electro-Technology**, v. 82, n. 5, p. 46- &, 1968.
- [2] BOLLEN, M. H. J. Understanding power quality problems. In: **Voltage sags and Interruptions**. IEEE press, 2000. <https://doi.org/10.1109/9780470546840>
- [3] FERREIRA, A. A. **Caracterização e análise de variações de tensão de curta duração**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2002.
- [4] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. McGraw-Hill, v. 2, 2004.
- [5] IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). **IEEE 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. Nova Iorque, 2019.
- [6] ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica – Revisão 10**. Brasília. 2017.
- [7] ONS (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA). **Procedimentos de rede – Submódulo 2.8**. Brasília, 2016.
- [8] VEGUNTA, S. C.; MILANOVIC, J. V. Estimation of cost of downtime of industrial process due to voltage sags. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 2, p. 576-587, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2035366>
- [9] MERTENS, E. A.; BONATO, B. D.; DIAS, L. F. S. Avaliação do Sistema elétrico Quanto às Variações de Tensão de Curta Duração. In: XVI SENDI, **Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**, Brasília, 2004.
- [10] MELHORN, C. J.; MAITRA, A.; SUNDERMAN, W.; WACLAWIAK, M.; SUNDARAM, A. Distribution system power quality assessment phase II: voltage sag and interruption analysis. In: **Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference**. Denver, 2005.
- [11] BHATTACHARYYA, S.; MYRZIK, J. M. A.; KLING, W. L. Consequences of poor power quality-an overview. In: **42nd International Universities Power Engineering Conference**. Brighton, 2007. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469025>
- [12] LOPES, B. M.; SILVA, S. M.; CARDOSO FILHO, B. J.; BRITO, J., TRAVASSOS, G. Análise crítica de dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformadores shunt: Custos versus funcionalidade. **Eletrônica de Potência**, v. 11, p. 53-60, 2006. <https://doi.org/10.18618/REP.2006.1.053060>

- [13] LIMA, R. N. C. **Compensação dinâmica de potência não ativa em média tensão.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- [14] GYUGYI, L., SCHAUDER, C. D., WILLIAMS, S. L., RIETMAN, T. R., TORGERSON, D. R., EDRIS, A. The unified power flow controller: A new approach to power transmission control. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 2, p. 1085-1097, 1995. <https://doi.org/10.1109/61.400878>
- [15] GUERRERO, J. M.; HANG, L.; UCEDA ANTOLÍN, J. Control of distributed uninterruptible power supply systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 8, p. 2845-2859, 2008. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924173>
- [16] GARCÍA, O. M. R.; EXPÓSITO, A. G. Solid-state voltage regulator for dispersed rural distribution systems. In: **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**, Bologna, 2003.
- [17] SCHATZ, R. A. **Electronic load tap changer systems.** U.S. Patent n. 3,275,929. Depósito: 12 jun de 1963. Concessão: 27 set de 1966.
- [18] THOMPSON, R. **Regulator apparatus including static switching circuit having mid-tapped inductor.** U.S. Patent n. 3,530,369. Depósito: 23 mar de 1970. Concessão: 22 set de 1970.
- [19] COOKE, G. H.; WILLIAMS, K. T. Thyristor assisted on-load tap changers for transformers. In: **1990 Fourth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives**. Londres, 1990.
- [20] COOKE, G. H.; WILLIAMS, K. T. New thyristor assisted diverter switch for on load transformer tap changers. **IEE Proceedings B (Electric Power Applications)**, v. 139, n. 6, p. 507-511, 1992. <https://doi.org/10.1049/ip-b.1992.0062>
- [21] CHEN, N; JONSSON, L. E. A new Hybrid power electronics on-load tap changer for power transformer, in **IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition**, Charlotte, 2015. <https://doi.org/10.1109/APEC.2015.7104475>
- [22] JIANG, H.; SHUTTLEWORTH, R.; AL ZAHAWI, B. A. T.; TIAN, X.; POWER, A. Fast response GTO assisted novel tap changer, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 16, n. 1, p. 111-115, 2001. <https://doi.org/10.1109/61.905608>
- [23] SHUTTLEWORTH, R.; TIAN, X.; FAN, C.; POWER, A. New tap changing scheme. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, v. 143, n. 1, p. 108-112, 1996. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19960124>
- [24] WANG, Y.; ZHAO, T.; RASHIDI, M.; SCHAAR, J.; TRUJILLO, A. An Arcless Step Voltage Regulator Based on Series-Connected Converter for Branch Current Suppression. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 9, n. 5, p. 5272-5281, 2020. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2989164>

- [25] CHUNG, Y. H.; KWON, G. H.; PARK, T.B.; LIM, K. Y. Dynamic voltage regulator with solid state switched *tap* changer. In: **CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems**, Montreal e Quebec, 2003. <https://doi.org/10.1109/QSEPDS.2003.159804>
- [26] SCHOENDUBE, C. **Electrical apparatus with thyristor circuit**. U.S. Patent n. 3,732,486. Depósito: 29 dez de 1971. Concessão: 8 mai de 1973.
- [27] RAJDA, J.; DEWAN, S.; RUSONG W.; LI, J. **Static voltage regulator**. U.S. Patent n. 6,137,277. Depósito: 29 out de 1999. Concessão: 24 out de 2000.
- [28] YOUSEF-ZAI, F. Q.; O'KELLY, D. Solid-state on-load transformer *tap* changer. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, v. 143, n. 6, p. 481-491, 1996. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19960578>
- [29] ABBASZADEH, K.; ARDEBILI, M.; ALAEI, A. R. Design and built of on-load fully electronic tap-changer with triac switch: simulation and practical results, in **1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference**, Teerã, 2010. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2010.5471794>
- [30] QUEVEDO, J. O.; CAZAKEVICIUS, F. E.; BELTRAME, R. C.; MARCHESAN, T. B.; MICHELS, L.; RECH, C.; SCHUCH, L. Analysis and design of an electronic on-load tap changer distribution transformer for automatic voltage regulation, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 1, p. 883-894, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2592463>
- [31] BAUER, P.; SCHOEVAARS, R. Bidirectional switch for a solid state *tap* changer. In: **IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist**, Acapulco, 2003.
- [32] BAUER, P. New robust switching commutation for a *tap* changer. In: **Proceedings of EPE**, Toulouse, 2003.
- [33] FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. Optimal configurations for *taps* of windings and power electronic switches in electronic *tap*-changers. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, v. 149, n. 5, p. 517-524, 2002. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20020656>
- [34] FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B.; SVENDA, G. S.; NAHMAN, J. M. New Solid-State on-Load *Tap*-Changer Topology for Distribution Transformers. **IEEE Power Engineering Review**, v. 22, n. 8, p. 71-71, 2002. <https://doi.org/10.1109/MPER.2002.4312524>
- [35] EXPOSITO, A G.; BERJILLOS, D. M. Solid-state *tap* changers: New configurations and applications. **IEEE transactions on power delivery**, v. 22, n. 4, p. 2228-2235, 2007. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905792>

- [36] FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. New controller for an electronic *tap* changer—Part I: Design procedure and simulation results. **IEEE transactions on power delivery**, v. 22, n. 1, p. 223-229, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881424>
- [37] FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. New controller for an electronic *tap* changer—Part II: Measurement algorithm and test results. **IEEE transactions on power delivery**, v. 22, n. 1, p. 230-237, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881423>
- [38] RODRIGUES, A. R. **Regulador de tensão com comutação eletrônica de *taps* análise de operação e proteção das chaves estáticas**. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [39] LIMA, R. R. **Contribuições ao controle eletrônico inteligente de reguladores de tensão para sistemas de distribuição de energia em 13,8 kV**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [40] AREDES, M.; ENCARNAÇÃO, L. F.; MOOR NETO, J. A.; REIS, M. S.; MONTEIRO, L. F. C.; SIQUEIRA, M. J. V.; SANCHES, C. C. Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de *Taps* para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração. In: **VIII CBQEE-Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Blumenau, 2009.
- [41] GARCÍA, S. M.; RODRÍGUEZ, J. C. C.; JARDINI, J. A.; LÓPEZ, J. V.; SEGURA, A. I.; CID, P. M. M. Feasibility of electronic *tap*-changing stabilizers for medium voltage lines—Precedents and new configurations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 3, p. 1490-1503, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2021032>
- [42] FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. **Electronic *tap*-changer for distribution transformers**. Springer Science & Business Media, v. 1, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19911-0_1
- [43] QUEVEDO, J. O.; GIACOMINI, J. C.; BELTRAME, R. C.; CAZAKEVICIUS, F. E.; RECH, C.; SCHUCH, L.; MARCHESAN, T. B.; CAMPOS, M.; SAUSEN, P. S.; KINAS, J. R. Transformador de distribuição inteligente. **Brazilian Journal of Power Electronics**, v. 19, n. 3, p. 277-284, 2014. <https://doi.org/10.18618/REP.2014.3.277284>
- [44] SHE, X.; HUANG, A. Q.; BURGOS, R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems. **IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics**, v. 1, n. 3, p. 186-198, 2013. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2277917>
- [45] BRUMSICKLE, W. E.; SCHNEIDER, R. S.; LUCKJIFF, G. A.; DIVAN, D. M.; MCGRANAGHAN, M. F. Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 37, n. 1, p. 212-217, 2001. <https://doi.org/10.1109/28.903150>

- [46] OLIVEIRA, H. R. P. M.; JESUS, N. C.; MARTINEZ, M. L. B. Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaio de Sobretensões. In: **XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Curitiba, 2005.
- [47] MARTINS, E. A. **Elaboração de curvas de suportabilidade para microcomputadores e estudo de desempenho de dispositivos mitigadores para subsidiar os PIDs**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [48] ÁVILA, C. J. **Curvas de Suportabilidade Dielétrica e Térmica para Televisores integradas ao APR e ao Banco de Dados da Cemig Distribuição S.A.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [49] REZENDE, P. H. O. **Contribuições para os estudos computacionais de ressarcimento por danos elétricos: limites de suportabilidade e induções eletromagnéticas**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [50] STMicroelectronics. **Application note 437/0899 – New Triacs: is the snubber circuit necessary?** Itália, 1999.
- [51] MAMEDE FILHO, J. Curto-circuito nas instalações elétricas. **Instalações elétricas industriais**. LTC, v. 9, 2017. p. 283- 329.