

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



**Modelagem trifásica de um Regulador Eletromagnético de  
Tensão com controle independente por fase**

**Gabriel Marçal de Carvalho**

**Uberlândia**

**2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Modelagem trifásica de um Regulador Eletromagnético de Tensão com  
controle independente por fase

Gabriel Marçal de Carvalho

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito de ava-  
liação do curso de Engenharia Elé-  
trica da Universidade Federal de  
Uberlândia para obtenção do título  
de bacharel.

Orientador: Prof. Ivan Nunes Santos

---

Assinatura do Orientador

Uberlândia

2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Modelagem trifásica de um Regulador Eletromagnético de Tensão com  
controle independente por fase

Gabriel Marçal de Carvalho

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito de ava-  
liação do curso de Engenharia Elé-  
trica da Universidade Federal de  
Uberlândia para obtenção do título  
de bacharel.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Ivan Nunes Santos

---

Prof. José Carlos de Oliveira

---

Vinícius Henrique Farias Brito

Uberlândia

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Maria Helena e Carlos, ao meu irmão Carlos Junior, à minha companheira Clara Regina, às minhas queridas avós Maria Helena e Marta, ao meu cunhado Thiago, aos meus amigos Breno e Jonathan, e a toda minha família e amigos que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência nos momentos em que eu me dedicava às atividades do curso.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Elétrica pela oportunidade de usufruto de sua estrutura de extrema qualidade, essencial no meu processo de formação acadêmica e profissional. A todo o corpo técnico-administrativo do qual posso destacar Rubens Assunção e Suzana Arantes, e a todo o corpo docente por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso, citando aqui os professores José Carlos de Oliveira, Luciano Coutinho, Luiz Carlos Gomes, Ernane Coelho, Helder de Paula. Ao professor Ivan Nunes por, além dos ensinamentos passados, ter orientado este trabalho com dedicação e amizade. Agradeço a todos pelo aprendizado que me permitiu apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação.

A todos os meus colegas de graduação e alunos da pós-graduação que conheci ao longo do curso, amigos que fiz dentro da FEELT com quem convivi ao longo desses anos, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica, podendo apontar aqui, dentre muitos outros, Vítor Melo, Gustavo de Oliveira, Guilherme Ribeiro, Vinícius Brito, Henrique Tannús. Obrigado pelo ambiente amistoso no qual convivemos e solidificamos os nossos conhecimentos.

No mais, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para minha formação pessoal e acadêmica, que me impulsionaram e seguramente foram importantes para que eu chegasse até aqui.

## RESUMO

A procura de soluções para diversos problemas relacionados com a qualidade da energia, como a variação e o desequilíbrio de tensões, tem resultado em propostas de dispositivos inovadores que cumpram as normas aplicadas. Portanto, apesar do reconhecimento de uma ampla gama de produtos no mercado destinados a essa finalidade, o projeto de equipamentos baseado em controle e princípios simples, custo competitivo e menor necessidade de manutenção, ainda apresenta um desafio para pesquisa e desenvolvimento de novos produtos. Nessa circunstância, o presente trabalho dá continuidade às explorações realizadas por pesquisadores do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), cujo foco é propor um novo conceito para modelagem e desenvolvimento de dispositivos reguladores de tensão. As pesquisas mencionadas têm evoluído e a investigação desenvolvida no presente Trabalho de Conclusão de Curso visa a modelagem trifásica deste dispositivo com controle de regulação de tensão independente por fase. Esta modelagem complementa a investigação anterior possibilitando analisar seu desempenho não somente relacionado ao indicador de variação de tensão, mas também ao indicador de desequilíbrio de tensões, conseqüentemente. Diferentemente da maioria dos desenvolvimentos anteriores, modelados no software ATP, a modelagem contemplada pelo presente trabalho foi feita pelo software Matlab, através da ferramenta Simulink.

**Palavras-Chave:** Qualidade da Energia Elétrica, Regulação de Tensão, Desequilíbrio de Tensões, Dispositivo Eletromagnético, Modelagem Computacional, Simulink.

## ABSTRACT

The search for solutions to several problems related to power-quality, such as voltage variation and imbalance, has resulted in proposals for innovative devices that comply with the applied standards. Therefore, despite the recognition of a wide range of products on the market for this purpose, the design of equipment based on simple control and principles, competitive cost and less need for maintenance, still presents a challenge for research and development of new products. In this circumstance, the present work continues the explorations carried out by researchers from the Group of Power-Quality Research (NQEE) at the Federal University of Uberlândia (UFU), whose focus is to propose a new concept for modeling and development of voltage regulating devices. The aforementioned researches have evolved and the research developed in this Completion of Course Work aims at the three-phase modeling of this device with independent voltage regulation control per phase. This modeling complements the previous investigation, making it possible to analyze its performance not only related to the voltage variation indicator, but also to the voltage imbalance indicator, consequently. Unlike most of the previous developments, modeled on the ATP software, the modeling contemplated by the present work was done by the Matlab software, using the Simulink tool.

**Keywords:** Power-Quality, Voltage Regulation, Voltage Imbalance, Electromagnetic Device, Computational Modeling, Simulink.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Definições de VTCD segundo o PRODIST [2].....	16
Figura 2.1 - Estrutura física do RET com mudança de tapes discretos sob carga. Adaptado de [10]. .....	25
Figura 2.2 - Esboço e formas de onda de um exemplo de compensação positiva (subtensão) com o nível de tensão disponibilizada pelo tape 3. Adaptado de [10]. ..	26
Figura 2.3 - Esboço e formas de onda de um exemplo de compensação negativa (sobretensão) com o nível de tensão disponibilizada pelo tape 3. Adaptado de [10]. .....	27
Figura 2.4 - Processo de alteração entre as chaves ChcP e ChcN. Adaptado de [13]. .....	28
Figura 2.5 - As onze faixas de operação do sistema do regulador. ....	29
Figura 2.6 - Diagrama da proposta de controle do regulador. ....	30
Figura 2.7 - Diagrama do RET atuando como elevador de tensão. Adaptado de [10]. .....	32
Figura 2.8 - Circuito equivalente do Transformador de Excitação com o RET operando como elevador de tensão. Adaptado de [10]. .....	34
Figura 2.9 - Circuito equivalente do Transformador de Acoplamento com o RET operando como elevador de tensão. Adaptado de [10]. .....	37
Figura 2.10 - Diagrama do RET atuando como abaixador de tensão. Adaptado de [10]. .....	40
Figura 2.11 - Circuito equivalente do Transformador de Excitação com o RET operando como abaixador de tensão. Adaptado de [10]. .....	42
Figura 2.12 - Circuito equivalente do Transformador de Acoplamento com o RET operando como abaixador de tensão. Adaptado de [10]. .....	45
Figura 3.1 - Circuito equivalente do bloco "Multi-Winding Transformer" com número de enrolamentos e tapes configurados para a aplicação em questão. Adaptado de [14]. .....	52
Figura 3.2 - Aparência do bloco "Multi-Winding Transformer" na plataforma Simulink. ....	52
Figura 3.3 - Abas "Configuration" (a) e "Parameters" (b) da janela de parametrização do bloco "Multi-Winding Transformer" .....	53

Figura 3.4 - Circuito equivalente do bloco “Saturable Transformer” com enrolamentos configurados para a aplicação em questão. Adaptado de [15].	54
Figura 3.5 - Aparência do bloco “Saturable Transformer” na plataforma Simulink.	55
Figura 3.6 - Abas "Configuration" (a) e "Parameters" (b) da janela de parametrização do bloco “Saturable Transformer”.	55
Figura 3.7 - Aparência do bloco “Breaker” na plataforma Simulink.	56
Figura 3.8 - Janela de parametrização do bloco "Breaker".	57
Figura 3.9 - Estágio responsável por verificar a Faixa de Operação Necessária (FON).	59
Figura 3.10 - As onze faixas de operação do sistema.	60
Figura 3.11 - Resposta teórica da tensão na Barra2 em função da tensão na Barra1 em todas as faixas de operação.	61
Figura 3.12 - Resposta simulada da tensão na Barra2 em função da tensão na Barra1 em todas as faixas de operação.	62
Figura 3.13 - Subsistemas responsáveis pela alteração gradual das faixas de operação e pela geração dos sinais de trigger para acionamento das chaves do sistema de potência.	63
Figura 3.14 - Sistema de potência monofásico do RET.	65
Figura 3.15 - (a) Subsistema “Barra1”; (b) Subsistema “Chaveamento ChBP”.	66
Figura 3.16 - Subsistema “Chaveamento Tapes e Polaridade”.	66
Figura 3.17 - Subsistema “Barra2”.	67
Figura 3.18 - (a) Subsistema "TA"; (b) Subsistema "TE".	67
Figura 3.19 - Sistema de potência trifásico do RET.	68
Figura 3.20 - (a) Subsistema “Fonte Trifásica Desequilibrada”; (b) Subsistema “Xcc Trifásico”.	69
Figura 3.21 - Subsistema “TE Trifásico”.	70
Figura 3.22 - Subsistema “TA Trifásico”.	70
Figura 4.1 - Sistema monofásico: Tensão eficaz na Barra 1.	72
Figura 4.2 - Sistema monofásico: Tensões eficazes na Barra 1 e na Barra 2.	72
Figura 4.3 - Sistema monofásico: Tensões eficazes na Barra1, na Barra2 e no primário do TA.	74

Figura 4.4 - Sistema monofásico: Correntes eficazes na fonte, na carga e no TE.....	74
Figura 4.5 - Sistema monofásico: Potências aparentes na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA.....	75
Figura 4.6 - Sistema monofásico: Potências ativas na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA.....	76
Figura 4.7 - Sistema monofásico: Potências reativas na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA.....	77
Figura 4.8 - Sistema monofásico: Potências ativa, reativa e aparente no lado de alta do TE e no primário do TA.....	77
Figura 4.9 - Sistema trifásico: Tensões de fase na Barra 1 e na Barra 2 na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).....	78
Figura 4.10 - Sistema trifásico: Tensões de linha na Barra 1 e na Barra 2 entre AB (a), entre BC (b) e entre CA (a). ....	79
Figura 4.11 - Sistema trifásico: Fatores de desequilíbrio das tensões na Barra1 e na Barra2.....	81
Figura 4.12 - Sistema trifásico: Correntes eficazes na fonte, na carga e no primário do TE na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c). ....	81
Figura 4.13 - Sistema trifásico: Correntes eficazes no primário, no neutro e no secundário do TE na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c). ....	82
Figura 4.14 - Sistema trifásico: Potências aparentes na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c). ....	82
Figura 4.15 - Sistema trifásico: Potências ativa e reativa na fonte e na carga na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c). ....	83
Figura 4.16 - Sistema trifásico: Potências ativa e reativa no lado de alta do TE e no primário do TA na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Principais propriedades dos equipamentos de compensação [10]. .....	19
Tabela 2.1 - Correntes, tensões e potências presentes no RET atuando como elevador de tensão.....	47
Tabela 2.2 - Correntes, tensões e potências presentes no RET atuando como abaixador de tensão.....	48
Tabela 2.3 - Relações entre a corrente suprida pela fonte, a corrente no primário e no neutro do TE com relação à corrente drenada pela carga nos dois modos de operação. ....	48
Tabela 3.1 - Principais parâmetros do regulador e do sistema modelado. ....	50
Tabela 3.2 - Sinais de trigger de cada chave para as onze faixas de operação. .....	63
Tabela 4.1 – Limites das faixas “Adequada”, “Precária” e “Crítica” para pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127) segundo o PRODIST. ....	73
Tabela 4.2 - Sistema monofásico: Valores de tensão eficaz na Barra 1 e na Barra 2 para cada intervalo de tempo. ....	73
Tabela 4.3 - Sistema monofásico: Valores da potência aparente drenada pela carga e a potência requerida pelo RET para cada intervalo de teste.....	75
Tabela 4.4 - Sistema trifásico: Valores das tensões de fase na Barra 1 e na Barra 2. ....	79
Tabela 4.5 - Sistema trifásico: Valores das tensões de linha na Barra 1 e na Barra 2. ....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
ATP	<i>Alternative Transients Program;</i>
CCT	Capacitores Chaveados a Tiristores;
DVR	<i>Dynamic Voltage Regulator;</i>
DySC	<i>Dynamic Sag Correctors;</i>
FD	Fator de desequilíbrio de tensões;
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor;</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor;</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos;
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica;
RCT	Reator Controlado a Tiristores;
RET	Regulador Eletromagnético de Tensão;
RMS	<i>Root Mean Square;</i>
SIPCON S	<i>Siemens Power Conditioner - Series;</i>
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensator;</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator;</i>
TA	Transformador de Acoplamento;
TE	Transformador de Excitação;
TSSC	<i>Thyristor Switched Series Capacitor;</i>
UPFC	<i>Unified Power-Flow Controller;</i>
UPQC	<i>Unified Power-Quality Conditioner;</i>
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Ch_{BP}$	Chave de ligação direta entre supridor e carga (sem regulação);
$Ch_{cN}$	Chave de <u>compensação negativa</u> (regulação de sobretensões);
$Ch_{cP}$	Chave de <u>compensação positiva</u> (regulação de subtensões);
$Ch_1$ a $Ch_5$	Chaves de acionamentos dos tapes do TE;
$Ch_0$	Chave de aterramento do enrolamento secundário do TA;
$FD_{Barra1}$	Fator de desequilíbrio das tensões na Barra 1;
$FD_{Barra2}$	Fator de desequilíbrio das tensões na Barra 2;
$\dot{I}_{carga}$	Corrente complexa drenada pela carga;
$I_{carga_{RMS}}$	Corrente eficaz drenada pela carga;
$\dot{I}_{fonte}$	Corrente complexa drenada do supridor;
$I_{fonte_{RMS}}$	Corrente eficaz drenada do supridor;
$\dot{I}_{neutro}$	Corrente complexa no neutro do TE;
$I_{neutro_{RMS}}$	Corrente eficaz no neutro do TE;
$\dot{I}_{priTE}$	Corrente complexa no primário do TE;
$I_{priTE_{RMS}}$	Corrente eficaz no primário do TE;
$\dot{I}'_{priTE}$	Corrente complexa no primário do TE referida ao seu secundário;
$\dot{I}_{secTE}$	Corrente complexa no lado secundário do TE (lado de baixa tensão);
$I_{secTE_{RMS}}$	Corrente eficaz no lado secundário do TE (lado de baixa tensão);
$L1$ a $L5$	Reatores para comutação sob carga dos tapes do TE;
$N1_{TE}$	Número de espiras do enrolamento primário do TE;
$N2_{TE}$	Número de espiras do enrolamento secundário do TE;
$P_{atTE}$	Potência ativa no lado de alta tensão do TE;
$P_{carga}$	Potência ativa absorvida pela carga;
$P_{fonte}$	Potência ativa drenada do supridor;
$P_{priTA}$	Potência ativa no primário do TA;
$Q_{atTE}$	Potência reativa no lado de alta tensão do TE;
$Q_{carga}$	Potência reativa absorvida pela carga;
$Q_{fonte}$	Potência reativa drenada do supridor;
$Q_{priTA}$	Potência reativa no primário do TA;
$R_{priTA}$	Resistência do enrolamento primário do TA;
$R_{priTE}$	Resistência do enrolamento primário do TE;
$R'_{priTE}$	Resistência do primário do TE referida ao seu secundário;
$R_{secTA}$	Resistência do enrolamento secundário do TA;

$R'_{secTA}$	Resistência do secundário do TA referida ao seu primário;
$R_{secTE}$	Resistência do enrolamento secundário do TE;
$R_{terTA}$	Resistência do enrolamento terciário do TA;
$R'_{terTA}$	Resistência do terciário do TA referida ao seu primário;
$R_{TH}$	Resistência equivalente do sistema a montante;
$\dot{S}_{atTE}$	Potência complexa no lado de alta tensão do TE;
$\dot{S}_{carga}$	Potência complexa drenada pela carga;
$\dot{S}_{fonte}$	Potência complexa drenada do supridor;
$\dot{S}_{priTA}$	Potência complexa no enrolamento primário do TA;
$\dot{V}_{barra1}$	Tensão complexa na Barra 1;
$V_{barra1_{RMS}}$	Tensão eficaz na Barra 1;
$\dot{V}_{barra2}$	Tensão complexa na Barra 2 (carga e primário do TE);
$V_{barra2_{RMS}}$	Tensão eficaz na Barra 2 (carga e primário do TE);
$\dot{V}_{comp}$	Tensão complexa no secundário do TE (qualquer seja o tape acionado);
$V_{comp_{RMS}}$	Tensão eficaz no secundário do TE (qualquer seja o tape acionado);
$\dot{V}'_{comp}$	Tensão complexa no secundário do TE referida ao primário do TA;
$\dot{V}_{priTA}$	Tensão complexa no enrolamento primário do TA;
$V_{priTA_{RMS}}$	Tensão eficaz no enrolamento primário do TA;
$\dot{V}_{TH}$	Tensão complexa equivalente de Thévenin;
$X_{CC}$	Reatância indutiva de curto-circuito do sistema a montante;
$X_{priTA}$	Reatância de dispersão do enrolamento primário do TA;
$X_{priTE}$	Reatância de dispersão do enrolamento primário do TE;
$X'_{priTE}$	Reatância de dispersão do primário do TE referida ao seu secundário;
$X_{secTA}$	Reatância de dispersão do enrolamento secundário do TA;
$X'_{secTA}$	Reatância de dispersão do secundário do TA referida ao seu primário;
$X_{secTE}$	Reatância de dispersão do enrolamento secundário do TE;
$X_{terTA}$	Reatância de dispersão do enrolamento terciário do TA;
$X'_{terTA}$	Reatância de dispersão do terciário do TA referida ao seu primário;
$Z_{carga}$	Impedância da carga alimentada;
$Z_{priTA}$	Impedância do enrolamento primário do TA;
$Z_{priTE}$	Impedância do enrolamento primário do TE;
$Z'_{priTE}$	Impedância do primário do TE referida ao seu secundário;
$Z_{reator}$	Impedância individual dos reatores para comutação sob carga;
$Z_{secTA}$	Impedância do enrolamento secundário do TA;
$Z'_{secTA}$	Impedância do secundário do TA referida ao seu primário;

$Z_{secTE}$	Impedância do enrolamento secundário do TE;
$Z_{terTA}$	Impedância do enrolamento terciário do TA;
$Z'_{terTA}$	Impedância do terciário do TA referida ao seu primário;
$Z_{TotalTA}$	Impedância total do TA;
$Z_{TotalTE}$	Impedância total do TE referida ao seu secundário (lado de baixa tensão);
$X_{TH}$	Reatância indutiva equivalente do sistema a montante;
$\alpha_{TE}$	Razão entre espiras do primário e secundário do TE ( $N_{1TE} / N_{2TE}$ );

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
1.1	Considerações iniciais.....	15
1.2	Contextualização do tema.....	17
1.3	Contribuições e objetivos oferecidos por este trabalho.....	22
2	ARRANJO FÍSICO DO REGULADOR (RET).....	24
2.1	Considerações iniciais.....	24
2.2	Estrutura física e operação do RET.....	24
2.3	Estratégia de controle do regulador.....	28
2.4	Modelagem matemática do regulador.....	31
2.4.1	Modo 1: RET atuando como elevador de tensão.....	32
2.4.2	Modo 2: RET atuando como abaixador de tensão.....	40
3	MODELAGEM DO RET NO SOFTWARE SIMULINK.....	49
3.1	Considerações iniciais.....	49
3.2	Bibliotecas do simulador simulink.....	49
3.3	Modelagem do regulador através do simulink.....	50
3.3.1	Transformador de Excitação (autotransformador).....	51
3.3.2	Transformador de Acoplamento (transformador série).....	53
3.3.3	Chaves.....	56
3.3.4	Indutâncias e carga.....	57
3.3.5	Sistema de controle.....	57
3.3.6	Sistema de potência.....	64
4	ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO.....	71
4.1	Considerações iniciais.....	71
4.2	Desempenho da modelagem monofásica do sistema.....	71
4.3	Desempenho da modelagem trifásica do sistema.....	78
5	CONCLUSÕES.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS SUBSISTEMAS DO PROCESSO DE CONTROLE DO RET.....	90
	A.1 – Subsistema “Ajusta Faixas” e “Verifica FON”.....	90
	A.1.1 – Detalhamento das regiões A.1.1.I e A.1.1.II.....	91
	A.2 – Subsistema “Compara FON com FOA. Incrementa ou decrementa FOA”.....	92
	A.3 – Subsistema “Gera sinais de trigger das chaves”.....	93

# 1 INTRODUÇÃO GERAL

## 1.1 Considerações iniciais

Um dos pontos relacionados ao desempenho das redes de distribuição e transmissão de energia está baseado na questão do atendimento aos padrões estabelecidos para a tensão de alimentação. Para tanto, diversos documentos normativos estabelecem limites para os indicadores de qualidade da energia elétrica (QEE), com a finalidade de manter as tensões nos barramentos do sistema elétrico de acordo com os requisitos mínimos considerados adequados. Uma vez que esses limites são violados, existe a necessidade de medidas para mitigação desses distúrbios, podendo até mesmo acarretar em penalizações financeiras por parte da concessionária de energia.

Dentre a gama de fenômenos de QEE, as variações de tensão têm se tornado um tema de bastante preocupação dentre as concessionárias de distribuição e transmissão [1]. O fenômeno de variação de tensão é caracterizado como um desvio significativo da amplitude da tensão nominal durante um determinado período de tempo. Este pode ser classificado de acordo com a magnitude e a duração do evento.

Um outro grave problema que compromete a qualidade da energia elétrica, tanto a nível de transmissão quanto de distribuição, é o desequilíbrio de tensões. Este fenômeno é associado às alterações dos padrões trifásicos do sistema elétrico de potência. Em outras palavras, o desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é a condição na qual as três fases possuem valores de magnitude e/ou defasagem angular diferentes. Como já se sabe, idealmente, o defasamento angular entre as fases de um sistema trifásico é de  $120^\circ$ .

Nesse contexto, a criação de normas traz um mecanismo que permite definir padrões de qualidade da energia elétrica por meio de indicadores específicos. Tais indicadores são estabelecidos nos documentos normativos dos mais diversos países. Especificamente, com relação à regulamentação brasileira, no que diz respeito ao sistema de distribuição, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através do PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico

Nacional) – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica [2], estipula procedimentos relacionados à qualidade do produto e do serviço prestado. Em relação à qualidade do produto, o módulo citado define termos, faz a caracterização e parametrização de fenômenos, e estabelece valores de referência e limites a serem respeitados.

Em termos de variação de tensão, o PRODIST [2] classifica este fenômeno de acordo com o período do evento, sendo as variações de tensão de longa duração (VTLD) as alterações significativas no valor eficaz da tensão por um período superior a três minutos. Complementarmente, as variações de tensão de curta duração (VTCD) compreendem aqueles manifestados por tempos inferiores a este limite. Ademais, conforme indicado na figura 1.1, as VTCDs também são categorizadas, de acordo com sua magnitude, em elevação, afundamento e interrupção. Já as VTLDs são classificadas em sobretensão, subtensão e interrupção sustentada. Entretanto, seus limites variam de acordo com o nível de tensão.

Figura 1.1 - Definições de VTCD segundo o PRODIST [2].

	<b>Elevação momentânea de tensão</b>	<b>Elevação temporária de tensão</b>
1,10 pu	<b>Tensão normal de suprimento</b>	
0,90 pu	<b>Afundamento momentâneo de tensão</b>	<b>Afundamento temporário de tensão</b>
0,10 pu	<b>Interrupção momentânea de tensão</b>	<b>Interrupção temporária de tensão</b>
	1 ciclo	3 s
		3 min

No que tange ao fenômeno desequilíbrio, o PRODIST apresenta um indicador denominado fator de desequilíbrio (FD). Este é calculado através da proporção entre a componente de sequência negativa em relação à de sequência positiva, como indicado em (1.1).

$$FD = \frac{V^-}{V^+} * 100\% \quad (1.1)$$

Sendo:

- $FD$ : Fator de desequilíbrio de tensões;
- $V^+$ : Módulo da componente simétrica de sequência positiva das tensões;
- $V^-$ : Módulo da componente simétrica de sequência negativa das tensões;

No tocante aos valores limites, o PRODIST define o máximo valor do percentil noventa e cinco do fator de desequilíbrio de tensão como 3,0% para sistemas com tensão nominal inferior a 1kV e 2,0% para sistemas com tensão nominal entre 1kV e 230kV.

Uma vez que os indicadores supramencionados são violados, existe a necessidade de medidas mitigatórias que visam o restabelecimento da tensão de suprimento conforme prevê as normas regulamentadoras. Nesse cenário, uma série de dispositivos foram desenvolvidos e disponibilizados para restaurar os padrões exigidos. Assim, uma variedade de produtos deve ser reconhecida, e as características operacionais de cada produto estão relacionadas ao tempo de resposta, à tecnologia utilizada, aos custos de investimento e manutenção, à confiabilidade operacional e à demanda por mão de obra qualificada.

Embora esta situação tenha sido objeto de inúmeros estudos e um grande número de produtos tenham sido reconhecidos no mercado, o assunto ainda enfrenta desafios importantes na busca de soluções que integrem respostas operacionais que atendam aos requisitos regulatórios, sem negligenciar outros aspectos relacionados a custo, confiabilidade e outros atrativos.

## **1.2 Contextualização do tema**

Manter a energia elétrica dentro dos padrões aceitáveis é um dos tópicos mais discutidos hoje na área da qualidade da energia. Isso se deve principalmente ao fato de o nível de tensão dos barramentos ser regulamentado e, se o valor de tensão atingir um patamar de fornecimento considerado inadequado, ações devem ser realizadas para mitigação desses distúrbios na rede.

Conforme descrito anteriormente, a fim de reduzir o desvio nos efeitos de longo e curto prazo da tensão de alimentação, vários dispositivos estão sendo desenvolvidos e fornecidos. A partir da tecnologia projetada para esse propósito, esses equipamentos podem ser classificados de acordo com o método de operação. O primeiro método é chamado de método indireto, que compreende os equipamentos que realizam o controle do nível de tensão por meio da variação controlada da potência reativa em determinados pontos da rede. O outro é baseado em um princípio denominado compensação direta e foca em dispositivos que atuam diretamente sobre a tensão em si.

Como exemplo de soluções que utilizam a via indireta estão os bancos de capacitores e reatores, compensadores síncronos e os reatores a núcleo saturado. Também há equipamentos com tecnologia mais sofisticada, que agregam elementos da eletrônica de potência (chaves estáticas), como os reatores controlados a tiristores (RCTs) e capacitores chaveados a tiristores (CCTs) [3], STATCOM [4], etc.

Alternativamente, o processo de compensação de tensão pode utilizar um dispositivo que atua diretamente nessa grandeza, alterando pontualmente a tensão para facilitar sua adaptação aos padrões exigidos. Isso pode ser conseguido trocando manualmente ou automaticamente tapes dos transformadores das linhas, ou inserindo uma tensão controlada, de forma aditiva ou subtrativa, em série com a linha a fim de modificar a tensão fornecida pela rede de alimentação. Dentre as formas mais elementares desses produtos estão os transformadores com mudança de tape, podendo estes serem alterados a vazio (*No-load tap changer* - NLTC) ou sob carga (*On-load tap changer* - OLTC). Além desses, outros reguladores eletromagnéticos também podem ser encontrados comercialmente, como é o caso do Toshiba TB-R1000 [5], COOPER VR-32 [6], ITB RAV-2 [7].

Ainda no contexto de dispositivos que atuam diretamente sobre os níveis de tensão, surgiram recentemente novas linhas de produtos que também utilizam os recursos dos dispositivos da eletrônica de potência. O princípio básico do dispositivo é gerar e injetar reforços diretos de tensão, de forma aditiva ou subtrativa, que proporcionem incrementos de tensões com valores e posicionamentos angulares eletronicamente controláveis de forma complementar à tensão da fonte de alimentação. Se necessário, esses recursos também podem realizar uma compensação independente

por fase, ajudando a reduzir o desequilíbrio de tensão de fornecimento. Dentro dessa linha de equipamentos, ressaltam-se as tecnologias comercialmente conhecidas por DVR, SIPCON S, TSSC, SSSC, Softswitching DySC [8], dentre outros.

Finalmente, combinando os dois conceitos de compensação acima (direta e indireta), e agrupando os recursos alocados para essas duas estratégias em um dispositivo, é necessário considerar o que é chamado de Controlador de Fluxo de Potência Unificado (*Unified Power-flow Controller – UPFC*) ou Condicionador de Qualidade da Energia Unificado (*Unified Power-quality Conditioner – UPQC*), os quais possuem componentes tanto em série quanto em paralelo à linha para o controle da potência reativa e injeção das tensões de compensação, utilizando de conversores de tensão compostos por GTO ou IGBT [9].

Diante da grande diversidade de produtos, cada qual com sua concepção física e operacional, há de se reconhecer atributos que podem se materializar na forma de vantagens e desvantagens técnicas, econômicas e operacionais. Para facilitar uma análise comparativa entre os mesmos, o trabalho [10] trouxe a tabela 1.1 onde são ilustrados, de forma sucinta, os principais aspectos atrelados com uma ou outra tecnologia e produto.

Tabela 1.1 - Principais propriedades dos equipamentos de compensação [10].

<b>Equipamento de compensação</b>	<b>Principais características operacionais</b>
<b>Reator chaveado mecanicamente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Princípio e construção simples;</li> <li>• Valores fixos.</li> </ul>
<b>Banco de capacitores chaveado mecanicamente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Princípio e construção simples;</li> <li>• Valores fixos;</li> <li>• Transitórios de chaveamento.</li> </ul>
<b>Compensador síncrono</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade de sobrecarga;</li> <li>• Totalmente controlável;</li> <li>• Tempo de resposta lento (500ms);</li> <li>• Contribuição de curto circuito na faixa capacitiva;</li> <li>• Perdas elevadas;</li> <li>• Maiores requisitos de manutenção.</li> </ul>
<b>Reator a núcleo saturado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Princípio e construção simples;</li> <li>• Menores requisitos de manutenção;</li> <li>• Controle natural da absorção de reativos;</li> <li>• Tempo de resposta rápido;</li> <li>• Não produzido em escala industrial;</li> <li>• Produção de componentes harmônicas.</li> </ul>
<b>Reator controlado a tiristores – RCT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de resposta rápido (5ms);</li> <li>• Totalmente controlável;</li> </ul>

<b>Equipamento de compensação</b>	<b>Principais características operacionais</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle contínuo de potência reativa;</li> <li>• Nenhum efeito sobre o nível de faltas;</li> <li>• Perdas medianas;</li> <li>• Menores requisitos de manutenção;</li> <li>• Geração de harmônico durante transitórios e regime permanente.</li> </ul>
<b>Banco de capacitores chaveados a tiristores – CCT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de resposta rápido (10ms);</li> <li>• Perdas baixas;</li> <li>• Menores requisitos de manutenção;</li> <li>• Harmônicos durante transitórios;</li> <li>• Controle da potência reativa somente por estágios;</li> <li>• Barramentos e controle complexos.</li> </ul>
<b>Reguladores eletromagnéticos comerciais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Princípio e construção simples;</li> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Tempo de resposta lento;</li> <li>• Maiores requisitos de manutenção;</li> <li>• Valores preestabelecidos para regulação da tensão.</li> </ul>
<b><i>Static Synchronous Compensator – STATCOM</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de resposta rápido (8ms);</li> <li>• Fornecimento ou absorção de potência reativa;</li> <li>• Total controle do montante de potência a ser absorvida/injetada;</li> <li>• Alto custo de implementação;</li> <li>• Maiores requisitos de manutenção;</li> <li>• Complexo sistema de controle.</li> </ul>
<b><i>Dynamic Voltage Restorer – DVR</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de resposta rápido (8ms);</li> <li>• Injeção de tensões controladas em módulo e ângulo de fase;</li> <li>• Alto custo de implementação;</li> <li>• Maiores requisitos de manutenção;</li> <li>• Complexo sistema de controle.</li> </ul>

Embora já se saiba que existe um grande leque de soluções disponíveis no mercado com o objetivo de restauração dos níveis de tensão, o assunto ainda movimenta pesquisadores na busca de novas ideias, projetos e construções que alcancem atributos como maior robustez, confiabilidade, volume físico reduzido, baixo custo de aquisição e manutenção, simplicidade operacional e maior índice de nacionalização.

Dentre essa gama de dispositivos para manutenção da tensão nos patamares adequados, encontra-se o equipamento que será o foco dessa monografia, o qual é denominado regulador eletromagnético de tensão (RET), cuja proposta inicial se deu no âmbito da Universidade Federal de Uberlândia [10]. O regulador em questão se enquadra entre os dispositivos que utilizam o método direto para compensação da tensão de suprimento. Sua concepção se apresenta na forma de uma estrutura física

composta por um autotransformador, em paralelo com a rede, cujos tapes suprem um segundo transformador, conectado em série com o alimentador. O transformador série é responsável por injetar uma tensão controlada de reforço, positiva ou negativa, visando a compensação requerida. Portanto, através de chaveamentos discretos dos tapes do autotransformador, o RET possibilita uma injeção de uma tensão série para controle da tensão no ponto de conexão.

Além da simplicidade operativa, o RET ainda possui uma série de atributos e características atrativas que torna o equipamento uma alternativa interessante em termos de controle da tensão [10]:

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

Além de proporcionar um restabelecimento do nível de tensão, é fato que, com um controle individual por fase, o RET ainda pode mitigar possíveis fenômenos de desequilíbrio na rede. Com isso, o regulador pode atuar na adequação de dois indicadores de QEE, tornando uma solução tecnicamente ainda mais atrativa. Dentro dessa temática é que se encontra a motivação proposta nessa monografia.

### **1.3 Contribuições e objetivos oferecidos por este trabalho**

Empregando arranjos físicos totalmente eletromagnéticos no que diz respeito às suas partes de potência, surgiu o denominado Regulador Eletromagnético de Tensão – RET. Conforme anteriormente mencionado, esse sistema é formado por duas unidades eletromagnéticas fundamentais. A primeira unidade é denominada Transformador de Excitação e consiste em um autotransformador conectado em paralelo com a rede para extração de energia da mesma. A segunda unidade é denominada Transformador de Acoplamento e é responsável pela inserção, em série com o alimentador principal, de uma tensão compatível para a adequação das tensões de suprimento nos termos requeridos pela legislação. No trabalho [10] também se definiu a estrutura física, estratégia de controle, modelagem e implementação computacional no simulador ATP em sua forma monofásica. Houve também testes laboratoriais através de um protótipo em potência reduzida, mostrando resultados promissores.

O trabalho [11] trouxe contribuições para o avanço do sistema propondo uma estratégia alternativa para o controle da tensão injetada fundamentada na utilização de chaves eletrônicas com controle de seus ângulos de disparo. Essa concepção foi capaz de fornecer um controle mais preciso do valor eficaz da tensão aplicada na rede e reduzir o tempo de resposta do equipamento, pois substituiu o sistema de mudanças de tapes discretos e mecânicos. O trabalho também trouxe uma modelagem computacional do sistema com esta estratégia de controle no software ATP, obtendo resultados promissores.

Em [12] foi definido um modelo matemático no domínio da frequência para o regulador (RET) e também foram feitas análises de desempenho diante de variações na tensão de suprimento. Também foi feito um estudo comparativo entre as respostas do modelo no domínio da frequência, no domínio do tempo e de um protótipo do regulador (RET) em escala reduzida.

Já o trabalho [13], mais recente que os demais, propôs uma variação da topologia do regulador concebido em [10], trazendo resultados promissores para a redução das correntes e, conseqüentemente, das potências exigidas das unidades eletromagnéticas sem trazer prejuízos à ação de regulação.

Dadas as informações anteriores, o presente trabalho busca contribuir adicionalmente às pesquisas anteriores para o domínio da tecnologia dos compensadores de tensão designados como RET (Regulador Eletromagnético de Tensão). Desse modo, este trabalho tem por finalidade a realização dos estágios abaixo:

- Modelar e implementar o RET concebido no trabalho [10] no simulador *Simulink* e realizar estudos de desempenho frente a desvios significativos de tensão da rede supridora;
- Implementar o RET de forma trifásica no simulador *Simulink* com controle independente por fase para analisar seu desempenho não só com relação à regulação de tensão, mas também, por consequência, com relação à mitigação do fenômeno de desequilíbrio de tensões.

## **2 ARRANJO FÍSICO DO REGULADOR (RET)**

### **2.1 Considerações iniciais**

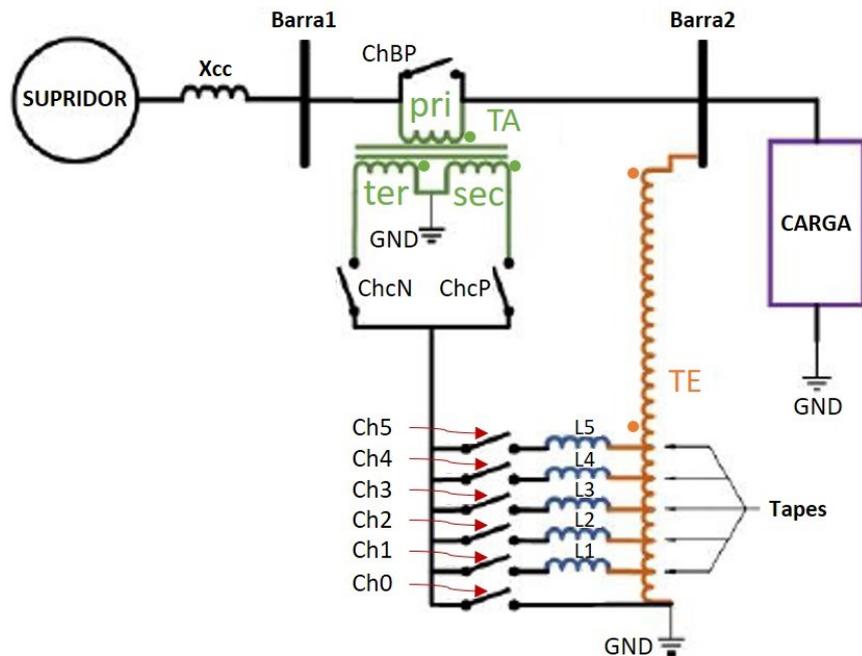
O presente capítulo contempla a apresentação da estrutura física e do processo de funcionamento do RET, abordando de forma detalhada as unidades de potência, as chaves de manobra e as demais propriedades referentes ao equipamento em pauta. Ademais, serão pormenorizados o sistema de controle e a lógica de operação do equipamento, com o regulador atuando tanto em condições de sobretensão na rede, quanto em subtensões. Por fim, será proposta uma modelagem matemática para o RET considerando os dois modos de operação.

### **2.2 Estrutura física e operação do RET**

A estrutura física do RET focado neste trabalho, como já abordado em [10], é constituída por duas unidades eletromagnéticas de potência: o Transformador de Excitação (TE), e o Transformador de Acoplamento (TA).

O TE consiste em um autotransformador abaixador cujo enrolamento primário está conectado em paralelo com a carga. Ele é responsável por extrair porções da tensão da rede e disponibilizá-las em diversos tapes em seu secundário. Já o TA representa-se na forma de um transformador convencional (enrolamentos isolados) de três enrolamentos. O enrolamento primário do TA está ligado em série com o alimentador principal e seus enrolamentos secundário e terciário estão conectados aos tapes do TE através de chaves mecânicas. O transformador de acoplamento tem por finalidade a injeção em série no sistema (seja aditiva ou subtrativamente) da tensão advinda do autotransformador para o reestabelecimento dos padrões de tensão exigidos. A topologia em questão pode ser vista na figura 2.1.

Figura 2.1 - Estrutura física do RET com mudança de tapes discretos sob carga. Adaptado de [10].



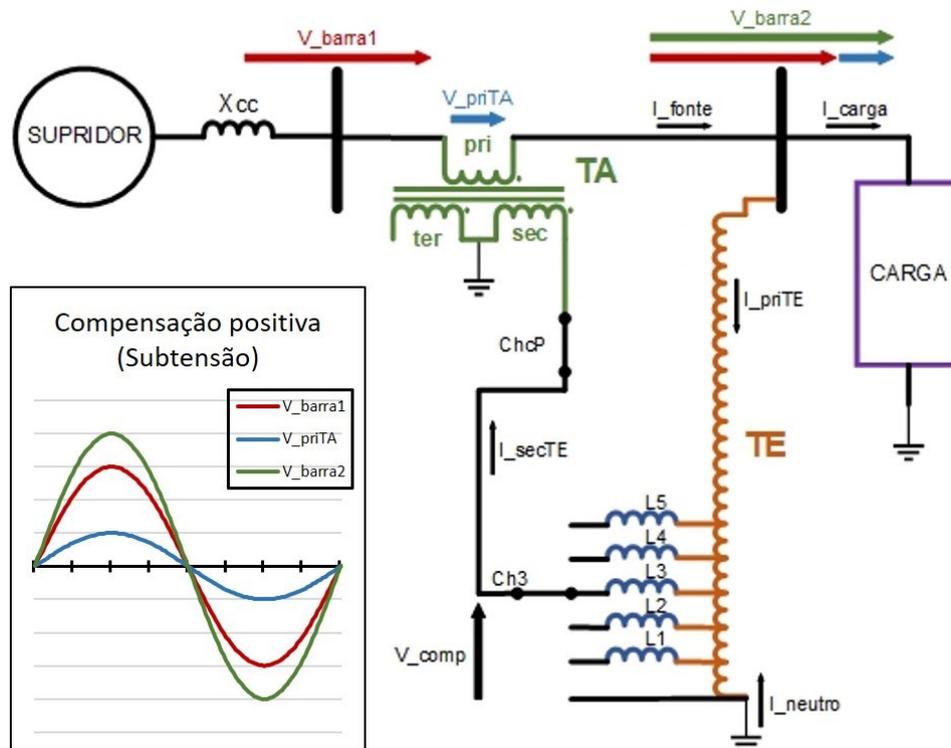
Além do Transformador de Excitação (TE), do Transformador de Acoplamento (TA) e da carga, pode-se ver no circuito a presença dos demais itens:

- $X_{cc}$ : Reatância de curto-circuito do sistema a montante;
- $L1$  a  $L5$ : Reatores para atenuação dos transitórios durante os chaveamentos;
- $Ch_0$  a  $Ch_5$ : Chaves responsáveis pelos acionamentos dos tapes do autotransformador (TE) para compensações com diferentes níveis de tensão, sendo  $Ch_0$  uma conexão direta com o neutro (sem compensação). Também serão tratadas como Chaves de Tapes;
- $Ch_{cP}$ : Chave de compensação positiva para regulação de subtensões;
- $Ch_{cN}$ : Chave de compensação negativa para regulação de sobretensões. As chaves  $Ch_{cP}$  e  $Ch_{cN}$  serão tratadas como Chaves de Polaridade;
- $Ch_{BP}$ : Chave de *by-pass* para retirar o sistema de operação e ligação direta entre carga e suprimento, fechada juntamente com  $Ch_0$  quando a tensão de suprimento não requer compensação. Quando acionada, essa chave também permite a desconexão do RET do sistema para eventuais manutenções sem a interrupção da alimentação da carga.

Em síntese, as chaves conectadas aos tapes do autotransformador (**Ch1** a **Ch5**) têm por finalidade determinar a magnitude da tensão que será injetada no sistema para compensação, enquanto as chaves **ChcP** e **ChcN** definem o sentido da compensação, isto é, se positiva ou negativa.

As figuras 2.2 e 2.3 mostram a atuação esperada para o compensador em situações de subtensões e sobretensões, respectivamente. Como já dito, a polaridade da compensação (se positiva ou negativa) é determinada pelas chaves **Ch<sub>cP</sub>** e **Ch<sub>cN</sub>**. Estas chaves definem qual enrolamento do Transformador de Acoplamento (secundário ou terciário) será conectado ao Transformador de Excitação. Já as chaves **Ch<sub>1</sub>** a **Ch<sub>5</sub>**, conectadas aos tapes do autotransformador, definem a magnitude da tensão a ser injetada em série à linha para compensação das variações de tensão.

Figura 2.2 - Esboço e formas de onda de um exemplo de compensação positiva (subtensão) com o nível de tensão disponibilizada pelo tape 3. Adaptado de [10].

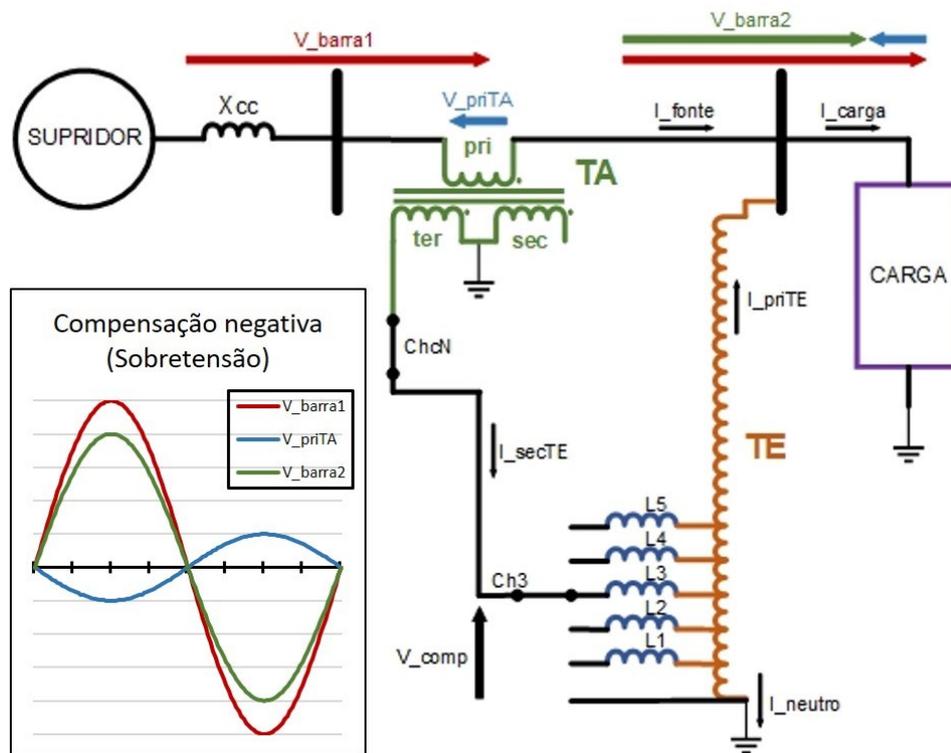


Sendo:

- $\dot{V}_{comp}$ : Tensão no ponto de ligação entre as chaves de tapes e de polaridade;
- $\dot{V}_{priTA}$ : Tensão no enrolamento primário do TA;
- $\dot{V}_{barra1}$ : Tensão na Barra 1;
- $\dot{V}_{barra2}$ : Tensão na Barra 2;

- $I_{fonte}$ : Corrente drenada do supridor;
- $I_{carga}$ : Corrente drenada pela carga;
- $I_{priTE}$ : Corrente circulante no primário do TE;
- $I_{secTE}$ : Corrente circulante no secundário do TE;
- $I_{neutro}$ : Corrente circulante no neutro do TE.

Figura 2.3 - Esboço e formas de onda de um exemplo de compensação negativa (sobretensão) com o nível de tensão disponibilizada pelo tape 3. Adaptado de [10].



Para as duas condições de operação haverá corrente sendo drenada da fonte e corrente na carga. Assim, observando a polaridade dos enrolamentos do TA através do ponto na figura, constata-se que as correntes na malha de compensação e, conseqüentemente, no primário e neutro do TE, alteram de sentido dependendo do modo de operação. Em síntese, quando funcionando como regulador de subtensões, a corrente flui do TE para o TA, enquanto ao funcionar como regulador de sobretensões, do TA para o TE.

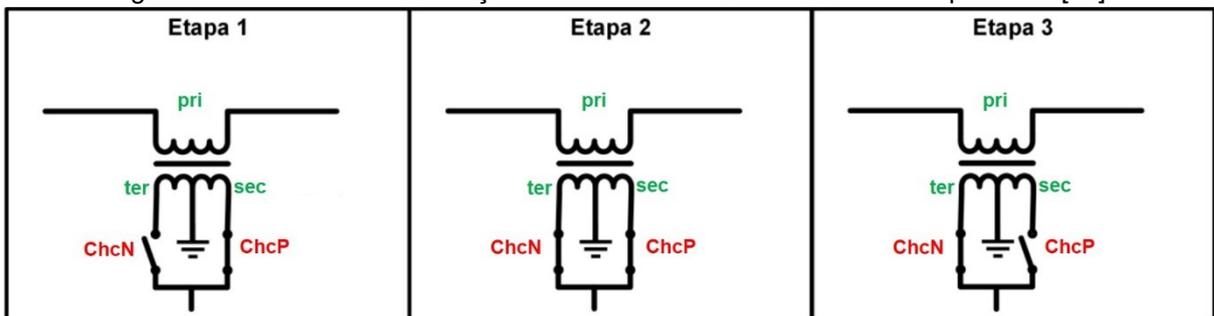
É importante observar que o Transformador de Acoplamento possui um princípio de operação bem diferente dos transformadores convencionais, já que em um de seus enrolamentos tem-se uma tensão imposta e no outro uma corrente imposta. Isso motivou o trabalho [13] a trazer uma análise das condições magnéticas deste

componente através do método dos elementos finitos (MEF) objetivando, sobretudo, orientar o processo fabril desta unidade.

Também é pertinente mencionar que as chaves de compensação positiva (ChcP) e negativa (ChcN) não podem estar abertas simultaneamente, já que isso interromperia a corrente nos enrolamentos secundário e terciário do TA. Como a corrente em seu enrolamento primário continuaria sendo imposta pela fonte, tensões extremamente altas surgiriam nos enrolamentos secundário e terciário, semelhante a um transformador de corrente (TC) com o secundário aberto.

O trabalho [13], já mencionado, também trouxe uma análise do fluxo magnético no TA para a condição supracitada através do MEF, comprovando a impossibilidade de manter ChcP e ChcN abertas simultaneamente. Assim, o processo de alternância entre as chaves de polaridade deve ocorrer mantendo ambas fechadas simultaneamente por um curto período de tempo como se pode ver na figura 2.4, que exemplifica o processo de abertura de ChcP e fechamento de ChcN.

Figura 2.4 - Processo de alteração entre as chaves ChcP e ChcN. Adaptado de [13].



Deve-se mencionar também que as chaves conectadas aos tapes do TE não devem estar todas abertas simultaneamente, pois ocorreria o mesmo problema abordado acima. Por isso, ao se realizar a troca de um tape por outro, deve-se manter as chaves de ambos os tapes (tape a ser acionado e tape a ser aberto) fechadas simultaneamente por um curto período de tempo, semelhante ao processo indicado para as chaves de polaridade.

### 2.3 Estratégia de controle do regulador

A estratégia de controle aqui proposta foi baseada em [10]. Entretanto, por se tratar de modelagens em softwares com arquiteturas distintas, foram feitas diversas alterações. A estratégia adotada nesta monografia se baseou no ajuste das faixas de

operação que determinam quais chaves de polaridade e tape devem ser acionadas para uma compensação de tensão eficaz. Como exemplo, pode-se observar na figura 2.5 que, para um RET composto por cinco tapes, existem onze faixas de operação que o regulador pode atuar.

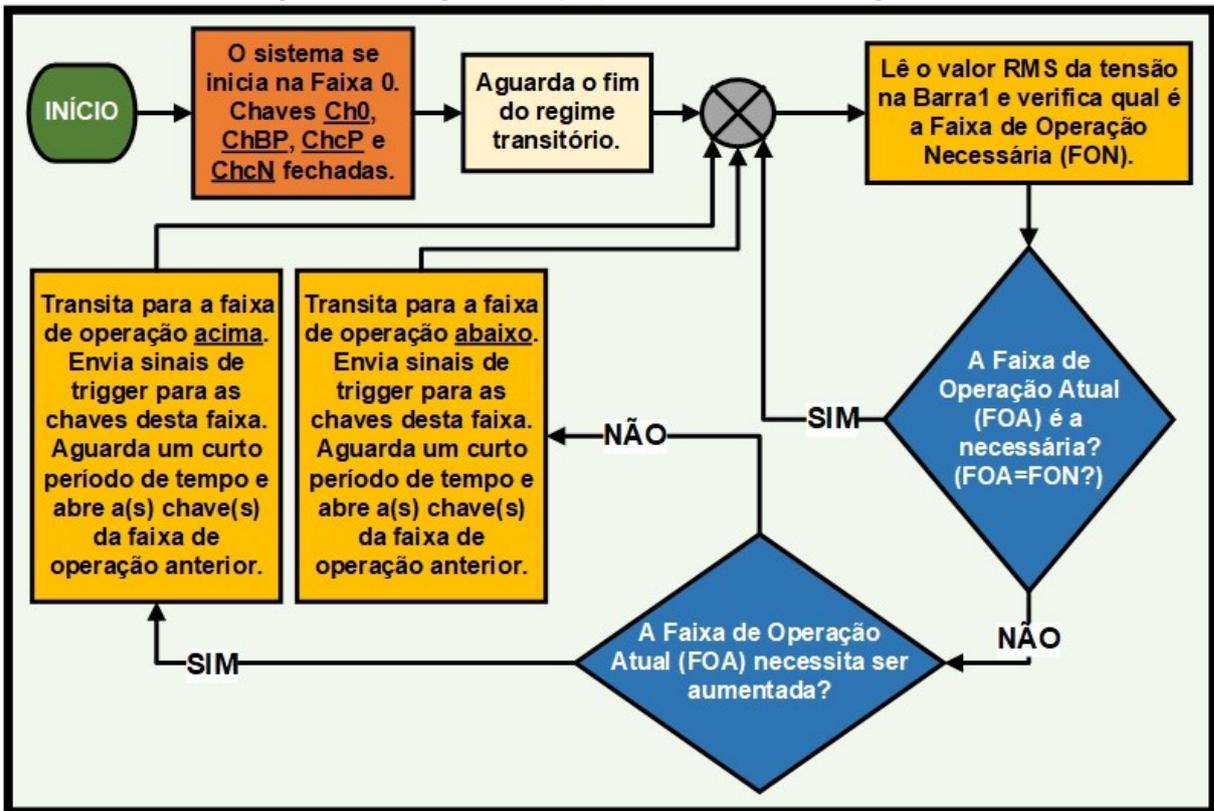
Figura 2.5 - As onze faixas de operação do sistema do regulador.

<b>Tipo de compensação</b>	<b>Chave de polaridade</b>	<b>Chave de tape</b>	<b>Faixa de operação</b>
Compensação negativa (Sobretensão)	ChcN	Ch5	Faixa N5
		Ch4	Faixa N4
		Ch3	Faixa N3
		Ch2	Faixa N2
		Ch1	Faixa N1
Sem compensação	ChcP + ChcN	Ch0 + ChBP	Faixa 0
Compensação positiva (Subtensão)	ChcP	Ch1	Faixa P1
		Ch2	Faixa P2
		Ch3	Faixa P3
		Ch4	Faixa P4
		Ch5	Faixa P5

↑  
Sentido de aumento das  
faixas de operação

As faixas ilustradas são sequenciais, ou seja, caso o sistema de controle detecte a necessidade de alteração de uma faixa para outra, a mudança é feita de forma gradual, de faixa a faixa, até se chegar na tensão desejada. Observa-se a seta indicando o sentido de aumento das faixas, de forma que, conforme a operação do RET é alterada no sentido da seta, menor será a tensão no barramento da carga. Na figura 2.6 está ilustrado o diagrama do sistema de controle.

Figura 2.6 - Diagrama da proposta de controle do regulador.



De forma resumida, o valor eficaz da tensão na Barra 1 (a montante do Transformador de Acoplamento) é constantemente monitorado, então, de acordo com este valor, o sistema de controle determina se é necessário compensação, se esta deve ser positiva ou negativa, e qual tape do TE deve ser acionado. Essa determinação é feita com base no ajuste das faixas de operação.

Como forma de diferenciação dos termos “Faixa de Operação Atual” (FOA) e “Faixa de Operação Necessária” (FON), pode-se assumir que a FOA é a faixa em que o RET se encontra operando no momento presente e a FON é a faixa em que ele, efetivamente, necessitaria estar atuando para atuando para uma regulação de tensão eficaz. De modo geral, a lógica estabelecida para o funcionamento do compensador pode ser resumida da seguinte forma:

- Após a energização do sistema, as chaves  $Ch_0$ ,  $Ch_{BP}$ ,  $Ch_{cP}$  e  $Ch_{cN}$  são acionadas, ou seja, o sistema se inicia executando a Faixa 0, sem compensação de tensão;
- Depois é aguardado um período de tempo para garantia de que já se tenha calculado os valores eficazes corretos de todas as grandezas

necessárias pelo sistema de controle, além disso, esse tempo também deve ser suficiente para estabilização do sistema, garantindo que esteja em regime permanente;

- Então se inicia o loop. O sistema de controle lê o valor eficaz da tensão da Barra 1 e verifica em qual faixa de operação ele está enquadrado, ou seja, qual é a faixa de operação necessária (FON) para correta atuação do regulador;
  - Caso a faixa de operação atual (FOA) já seja a FON, nenhuma ação do controle é necessária e o loop é reiniciado;
  - Todavia, caso a faixa de operação atual (FOA) não seja a FON, será necessária a alteração de faixa, isto é, deverá ocorrer troca de Chaves de Tapes e, talvez, até troca de Chaves de Polaridade;
    - Então é verificado se a faixa de operação em execução deve ser aumentada ou diminuída. Caso ela necessite ser aumentada (de acordo com a seta indicada da figura 2.5), o sistema transita para a faixa acima, fechando as chaves relativas a ela. Então é aguardado um curto período de tempo, as chaves relativas à antiga faixa são abertas e o loop se reinicia;
    - Mas caso a faixa necessite ser diminuída, o sistema fecha as chaves relativas à faixa abaixo. Então é aguardado um curto período de tempo para abertura das chaves relativa à antiga faixa e o loop pode ser reiniciado.

Vale destacar que, o cálculo da faixa de operação necessária será detalhado nos capítulos posteriores, e utiliza como referência a modelagem matemática proposta no próximo tópico.

## **2.4 Modelagem matemática do regulador**

Consistente com os procedimentos clássicos, a modelagem de equipamentos e complexos elétricos é baseada em duas técnicas. Uma se baseia no princípio da representação no domínio do tempo com suas particularidades e características, e a outra baseada no domínio da frequência. Esta última possui atributos que a torna bastante atrativa para muitas aplicações, pois proporciona uma visualização mais direta

da operacionalidade dos dispositivos e a interação dos mesmos com a rede elétrica, além de ajudar a simplificar, agilizar e melhorar o desempenho dos cálculos computacionais. A modelagem matemática no domínio da frequência do RET aparece em [10] e [12], e considera:

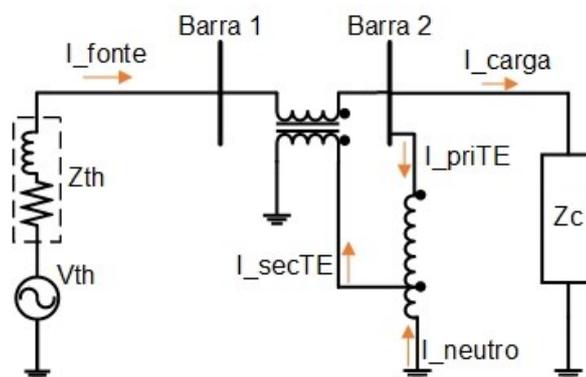
- A fonte de suprimento, na forma de um circuito equivalente de Thévenin;
- As unidades físicas constituintes do regulador propriamente dito, com destaque às unidades eletromagnéticas constituídas pelo autotransformador e o transformador série;
- A carga, na forma de uma impedância constante.

Como o RET age tanto no sentido de elevar baixas tensões quanto no de reduzir elevadas tensões, o equacionamento é feito para as duas condições de compensação e se encontra transcrito a seguir.

#### 2.4.1 Modo 1: RET atuando como elevador de tensão

Pode ser visto no circuito da figura 2.7 que o Transformador de Acoplamento é representado de forma simplificada, com apenas dois de seus três enrolamentos: o enrolamento primário, conectado em série com a malha principal, e o enrolamento secundário, que recebe a tensão do tape do autotransformador. O Transformador de Excitação está representado assumindo um tape genérico. Também são mostrados os sentidos das correntes nas duas unidades eletromagnéticas do RET.

Figura 2.7 - Diagrama do RET atuando como elevador de tensão. Adaptado de [10].



Sendo:

- $\dot{V}_{TH}$ : Tensão equivalente de Thévenin;

- $\dot{Z}_{TH}$ : Impedância equivalente do sistema a montante;
- $\dot{Z}_C$ : Impedância da carga alimentada;
- $\dot{I}_{fonte}$ : Corrente drenada da fonte;
- $\dot{I}_{carga}$ : Corrente drenada pela carga;
- $\dot{I}_{priTE}$ : Corrente no primário do TE;
- $\dot{I}_{secTE}$ : Corrente no secundário do TE;
- $\dot{I}_{neutro}$ : Corrente no neutro do TE.

Com o intuito de simplificação, será considerado que a relação de transformação do Transformador de Acoplamento é unitária, então, desprezando a parcela da corrente destinada à magnetização do núcleo, pode-se dizer que a corrente no secundário ou terciário é igual à corrente imposta pela fonte em seu enrolamento primário, portanto:

$$\dot{I}_{secTE} = \dot{I}_{fonte} \quad (2.1)$$

Sabe-se que a corrente drenada da fonte ( $\dot{I}_{fonte}$ ) é dada pela soma da corrente da carga ( $\dot{I}_{carga}$ ) com a corrente do primário do TE ( $\dot{I}_{priTE}$ ). Portanto:

$$\dot{I}_{fonte} = \dot{I}_{carga} + \dot{I}_{priTE} \quad (2.2)$$

Observa-se também que a corrente fornecida pelo tape do TE ( $\dot{I}_{secTE}$ ) é composta pela soma das correntes do seu primário ( $\dot{I}_{priTE}$ ) e neutro ( $\dot{I}_{neutro}$ ). Assim:

$$\dot{I}_{secTE} = \dot{I}_{neutro} + \dot{I}_{priTE} \quad (2.3)$$

Substituindo (2.1) em (2.3):

$$\dot{I}_{fonte} = \dot{I}_{neutro} + \dot{I}_{priTE} \quad (2.4)$$

Igualando as expressões (2.2) e (2.4):

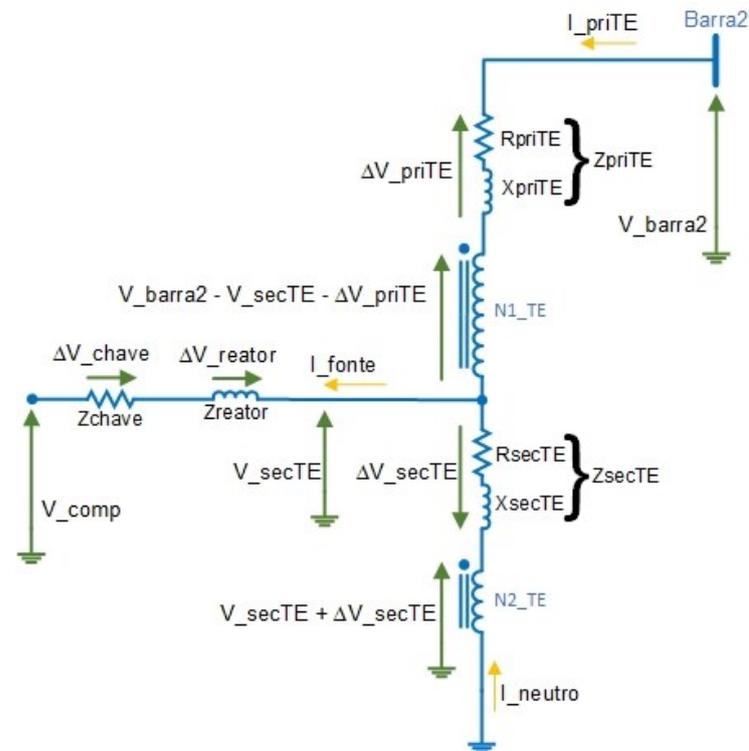
$$\dot{I}_{carga} + \dot{I}_{priTE} = \dot{I}_{neutro} + \dot{I}_{priTE} \quad (2.5)$$

$$\dot{I}_{neutro} = \dot{I}_{carga} \quad (2.6)$$

- Grandezas Elétricas presentes no Transformador de Excitação

Será ilustrado agora na figura 2.8 o circuito equivalente do Transformador de Excitação quando o RET está operando em condições de subtensão (compensação positiva), onde estão presentes as resistências e reatâncias de dispersão dos dois enrolamentos. Adicionalmente, no secundário do TE estão expostas as impedâncias do reator, destinado à atenuação dos impactos de chaveamento, e da chave responsável pelo acionamento de tape.

Figura 2.8 - Circuito equivalente do Transformador de Excitação com o RET operando como elevador de tensão. Adaptado de [10].



Sendo:

- $N1_{TE}$ : Número de espiras do enrolamento primário do TE;
- $N2_{TE}$ : Número de espiras do enrolamento secundário do TE;
- $R_{priTE}$ : Resistência do enrolamento primário do TE;
- $X_{priTE}$ : Reatância de dispersão do enrolamento primário do TE;
- $Z_{priTE}$ : Impedância do enrolamento primário do TE;
- $R_{secTE}$ : Resistência do enrolamento secundário do TE;
- $X_{secTE}$ : Reatância de dispersão do enrolamento secundário do TE;

- $\dot{Z}_{secTE}$ : Impedância do enrolamento secundário do TE;
- $\dot{Z}_{reator}$ : Impedância do reator de mitigação de transitórios;
- $\dot{Z}_{chave}$ : Impedância da chave de tape.

Como mostrado, o transformador é representado pelo seu circuito equivalente simplificado, com suas impedâncias divididas entre os enrolamentos primário e secundário. O ramo de magnetização é desconsiderado, ou seja, a corrente de magnetização é assumida nula.

A relação de transformação do TE pode ser expressa como a quantidade de espiras do primário dividida pela quantidade de espiras do secundário. Assim:

$$\alpha_{TE} = \frac{N1_{TE}}{N2_{TE}} \quad (2.7)$$

Igualando os produtos ampères-espiras do primário e secundário do TE:

$$\dot{I}_{priTE} * N1_{TE} = \dot{I}_{neutro} * N2_{TE} \quad (2.8)$$

$$\dot{I}_{priTE} = \dot{I}_{neutro} * \left( \frac{N2_{TE}}{N1_{TE}} \right) \quad (2.9)$$

Substituindo (2.6) e (2.7) em (2.9):

$$\dot{I}_{priTE} = \dot{I}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.10)$$

Substituindo (2.10) em (2.2):

$$\dot{I}_{fonte} = \dot{I}_{carga} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.11)$$

$$\dot{I}_{fonte} = \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.12)$$

Prosseguindo com os desenvolvimentos matemáticos, tem-se:

$$\frac{\dot{V}_{barra2} - \Delta\dot{V}_{priTE} - \dot{V}_{secTE}}{N1_{TE}} = \frac{\dot{V}_{secTE} + \Delta\dot{V}_{secTE}}{N2_{TE}} \quad (2.13)$$

$$\dot{V}_{secTE} = (\dot{V}_{barra2} - \Delta\dot{V}_{priTE} - \dot{V}_{secTE}) * \left(\frac{1}{\alpha_{TE}}\right) - \Delta\dot{V}_{secTE} \quad (2.14)$$

$$\dot{V}_{secTE} + \dot{V}_{secTE} * \left(\frac{1}{\alpha_{TE}}\right) = (\dot{V}_{barra2} - \Delta\dot{V}_{priTE}) * \left(\frac{1}{\alpha_{TE}}\right) - \Delta\dot{V}_{secTE} \quad (2.15)$$

$$\dot{V}_{secTE} * \left(\frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}}\right) = (\dot{V}_{barra2} - \Delta\dot{V}_{priTE}) * \left(\frac{1}{\alpha_{TE}}\right) - \Delta\dot{V}_{secTE} \quad (2.16)$$

$$\dot{V}_{secTE} = (\dot{V}_{barra2} - \Delta\dot{V}_{priTE}) * \left(\frac{1}{\alpha_{TE} + 1}\right) - \Delta\dot{V}_{secTE} * \left(\frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1}\right) \quad (2.17)$$

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} - \frac{(Z_{priTE} * \dot{I}_{priTE})}{\alpha_{TE} + 1} - \frac{(Z_{secTE} * \dot{I}_{neutro}) * \alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \quad (2.18)$$

Sabe-se que:

$$Z_{priTE} = Z'_{priTE} * \alpha_{TE}^2 \quad (2.19)$$

Sendo:

- $Z'_{priTE}$ : Impedância série do enrolamento primário do TE referida ao seu secundário ( $Z'_{priTE} = R'_{priTE} + jX'_{priTE}$ ).

Substituindo (2.19), (2.10) e (2.6) em (2.18):

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} - \frac{(Z'_{priTE} * \dot{I}_{carga}) * \alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} - \frac{(Z_{secTE} * \dot{I}_{carga}) * \alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \quad (2.20)$$

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} - \dot{I}_{carga} * \left(\frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1}\right) * (Z'_{priTE} + Z_{secTE}) \quad (2.21)$$

Considerando que  $Z_{TotalTE}$  é a impedância total do TE referida ao secundário, tem-se

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} - \dot{I}_{carga} * \left(\frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1}\right) * Z_{TotalTE} \quad (2.22)$$

$$\dot{V}_{comp} = \dot{V}_{secTE} - \Delta\dot{V}_{reator} - \Delta\dot{V}_{chave} \quad (2.23)$$



$$\dot{V}_{secTA} = \dot{V}_{comp} - \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * Z_{chave} \quad (2.28)$$

Substituindo (2.25) em (2.28):

$$\dot{V}_{secTA} = \dot{V}_{secTE} - \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * (2 * Z_{chave} + Z_{reator}) \quad (2.29)$$

Sabendo que a relação de transformação entre os enrolamentos do TA é unitária, e desprezando seu ramo de magnetização, pode-se inferir que:

$$\dot{V}_{priTA} + \Delta\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{secTA} - \Delta\dot{V}_{secTA} \quad (2.30)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{secTA} - \Delta\dot{V}_{secTA} - \Delta\dot{V}_{priTA} \quad (2.31)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{secTA} - \dot{I}_{fonte} * (Z_{secTA} + Z_{priTA}) \quad (2.32)$$

Substituindo (2.12) em (2.32):

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{secTA} - \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * (Z_{secTA} + Z_{priTA}) \quad (2.33)$$

Considerando que  $Z_{TotalTA}$  é a impedância total do TA, tem-se:

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{secTA} - \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * Z_{TotalTA} \quad (2.34)$$

Substituindo (2.29) em (2.34):

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{secTE} - \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) \quad (2.35)$$

Substituindo (2.22) em (2.35):

$$\dot{V}_{priTA} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} - \dot{I}_{carga} * \left( \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \left( \frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \right) Z_{TotalTE} \right) \quad (2.36)$$

Considerando a carga do sistema como uma impedância constante:

$$i_{carga} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{Z_{carga}} \quad (2.37)$$

Portanto, pode-se reescrever a equação (2.36):

$$\dot{V}_{priTA} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} - \frac{\dot{V}_{barra2}}{Z_{carga}} * \left( \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * (Z_{totalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \left( \frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \right) * Z_{TotalTE} \right) \quad (2.38)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{barra2} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 1} - \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) * \frac{(Z_{totalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator})}{Z_{carga}} - \left( \frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \right) * \frac{Z_{TotalTE}}{Z_{carga}} \right) \quad (2.39)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{barra2} * \left( \frac{\alpha_{TE} * Z_{carga} - (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{totalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) - \alpha_{TE}^2 * Z_{TotalTE}}{\alpha_{TE} * (\alpha_{TE} + 1) * Z_{carga}} \right) \quad (2.40)$$

Sabendo que:

$$\dot{V}_{barra2} = \dot{V}_{barra1} + \dot{V}_{priTA} \quad (2.41)$$

Substituindo (2.40) em (2.41) e isolando  $\dot{V}_{barra2}$ :

$$\dot{V}_{barra2} = \dot{V}_{barra1} * \left( \frac{\alpha_{TE} * (\alpha_{TE} + 1) * Z_{carga}}{\alpha_{TE}^2 * (Z_{carga} + Z_{TotalTE}) + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{totalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator})} \right) \quad (2.42)$$

Na compensação positiva, a potência requerida pela compensação flui do Transformador de Excitação para o Transformador de Acoplamento, ou seja, desconsiderando as perdas, a potência que circula em ambos os transformadores é igual. Assim, pode-se considerar que a potência requerida para que seja realizada a compensação é a potência no lado de alta tensão do TE.

$$\dot{S}_{RET} = \dot{V}_{barra2} * \dot{I}_{priTE}^* \quad (2.43)$$

Sendo:

- $\dot{I}_{priTE}^*$ : o número complexo conjugado de  $\dot{I}_{priTE}$ .

Substituindo (2.10) em (2.43):

$$\dot{S}_{RET} = \dot{V}_{barra2} * \dot{I}_{carga}^* * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.44)$$

Onde:

- $\dot{I}^*_{carga}$ : o número complexo conjugado de  $\dot{I}_{carga}$ .

Sabendo que:

$$\dot{V}_{barra2} * \dot{I}^*_{carga} = \dot{S}_{carga} \quad (2.45)$$

A potência que circula no regulador, em função da potência da carga é expressa por:

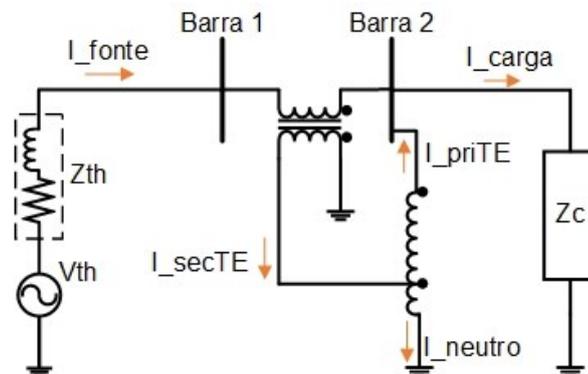
$$\dot{S}_{RET} = \dot{S}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.46)$$

Vemos que na situação de compensação positiva, o valor da potência requerida pelo RET é consideravelmente menor que a potência drenada pela carga, sendo que este valor depende da relação de transformação do TE, ou seja, do tape ativado. Dessa forma, é possível concluir que, quanto maior a tensão do tape acionado, maior é a potência requerida pelo RET.

#### 2.4.2 Modo 2: RET atuando como abaixador de tensão

No circuito da figura 2.10, o Transformador de Acoplamento é representado somente pelo enrolamento primário, conectado em série com a malha principal, e o enrolamento terciário, responsável pela compensação negativa. O autotransformador (TE) é representado com um tape genérico. Também pode se ver os fluxos de corrente nas duas unidades eletromagnéticas do RET.

Figura 2.10 - Diagrama do RET atuando como abaixador de tensão. Adaptado de [10].



Para esse caso, a corrente na carga ( $\dot{I}_{carga}$ ) é dada pela soma da corrente da fonte ( $\dot{I}_{fonte}$ ) com a corrente do primário do TE ( $\dot{I}_{priTE}$ ). Portanto:

$$\dot{I}_{carga} = \dot{I}_{fonte} + \dot{I}_{priTE} \quad (2.47)$$

$$\dot{I}_{fonte} = \dot{I}_{carga} - \dot{I}_{priTE} \quad (2.48)$$

$$\dot{I}_{priTE} = \dot{I}_{carga} - \dot{I}_{fonte} \quad (2.49)$$

A corrente presente no tape (secundário) do TE ( $\dot{I}_{secTE}$ ), que é igual à corrente drenada da fonte ( $\dot{I}_{fonte}$ ), é composta pela soma das correntes do seu primário ( $\dot{I}_{priTE}$ ) e neutro ( $\dot{I}_{neutro}$ ). Assim:

$$\dot{I}_{fonte} = \dot{I}_{neutro} + \dot{I}_{priTE} \quad (2.50)$$

$$\dot{I}_{neutro} = \dot{I}_{fonte} - \dot{I}_{priTE} \quad (2.51)$$

Substituindo (2.49) em (2.51):

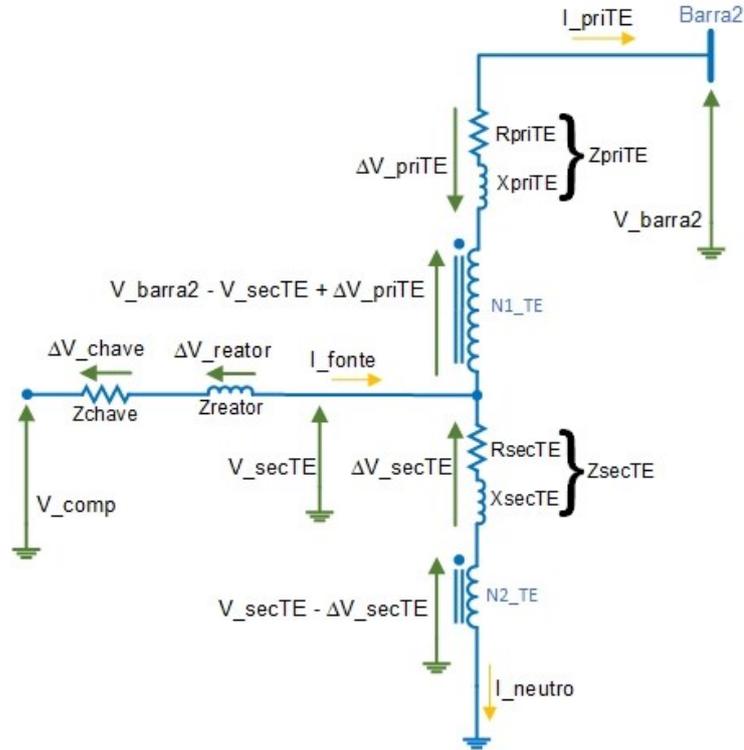
$$\dot{I}_{neutro} = \dot{I}_{fonte} - (\dot{I}_{carga} - \dot{I}_{fonte}) \quad (2.52)$$

$$\dot{I}_{neutro} = 2 * \dot{I}_{fonte} - \dot{I}_{carga} \quad (2.53)$$

- Grandezas Elétricas presentes no Transformador de Excitação

A figura 2.11 contém o circuito equivalente do Transformador de Excitação quando o RET está em regulação de sobretensão, onde estão presentes as resistências e reatâncias de dispersão dos dois enrolamentos. Também estão expostas as impedâncias do reator destinado à atenuação dos impactos de chaveamento e da chave responsável pelo acionamento de tape do TE.

Figura 2.11 - Circuito equivalente do Transformador de Excitação com o RET operando como abaixador de tensão. Adaptado de [10].



O autotransformador é representado pelo seu circuito equivalente simplificado, com suas impedâncias divididas entre os enrolamentos primário e secundário. O ramo de magnetização é desconsiderado, portanto a corrente de magnetização é considerada nula.

Igualando os produtos ampères-espiras do primário e secundário do TE:

$$i_{priTE} * N1_{TE} = i_{neutro} * N2_{TE} \quad (2.54)$$

$$i_{priTE} = i_{neutro} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.55)$$

Substituindo (2.55) em (2.48):

$$i_{fonte} = i_{carga} - i_{neutro} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.56)$$

Substituindo (2.53) em (2.56):

$$i_{fonte} = i_{carga} - (2 * i_{fonte} - i_{carga}) * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.57)$$

$$\dot{I}_{fonte} + \dot{I}_{fonte} * \left( \frac{2}{\alpha_{TE}} \right) = \dot{I}_{carga} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.58)$$

$$\dot{I}_{fonte} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 2}{\alpha_{TE}} \right) = \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.59)$$

$$\dot{I}_{fonte} = \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) \quad (2.60)$$

Substituindo (2.60) em (2.49):

$$\dot{I}_{priTE} = \dot{I}_{carga} - \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) \quad (2.61)$$

$$\dot{I}_{priTE} = \dot{I}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 2} \right) \quad (2.62)$$

Igualando (2.55) e (2.62):

$$\dot{I}_{neutro} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) = \dot{I}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 2} \right) \quad (2.63)$$

$$\dot{I}_{neutro} = \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 2} \right) \quad (2.64)$$

Sabe-se que:

$$\frac{\dot{V}_{barra2} + \Delta\dot{V}_{priTE} - \dot{V}_{secTE}}{N1_{TE}} = \frac{\dot{V}_{secTE} - \Delta\dot{V}_{secTE}}{N2_{TE}} \quad (2.65)$$

Portanto:

$$\dot{V}_{secTE} = \Delta\dot{V}_{secTE} + (\dot{V}_{barra2} + \Delta\dot{V}_{priTE} - \dot{V}_{secTE}) * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) \quad (2.66)$$

$$\dot{V}_{secTE} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right) = (\dot{V}_{barra2} + \Delta\dot{V}_{priTE}) * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right) + \Delta\dot{V}_{secTE} \quad (2.67)$$

$$\dot{V}_{secTE} = (\dot{V}_{barra2} + \Delta\dot{V}_{priTE}) * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 1} \right) + \Delta\dot{V}_{secTE} * \left( \frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \right) \quad (2.68)$$

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} + \frac{Z_{priTE} * \dot{I}_{priTE}}{\alpha_{TE} + 1} + \frac{Z_{secTE} * \dot{I}_{neutro} * \alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \quad (2.69)$$

Substituindo (2.19) em (2.69):

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} + \frac{Z'_{priTE} * \dot{I}_{priTE} * \alpha_{TE}^2}{\alpha_{TE} + 1} + \frac{Z_{secTE} * \dot{I}_{neutro} * \alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1} \quad (2.70)$$

Substituindo (2.62) e (2.64) em (2.70):

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} + \frac{Z'_{priTE} * \dot{I}_{carga} * \alpha_{TE}^2}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2)} + \frac{Z_{secTE} * \dot{I}_{carga} * \alpha_{TE}^2}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2)} \quad (2.71)$$

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE}^2}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2)} \right) * (Z'_{priTE} + Z_{secTE}) \quad (2.72)$$

Considerando que  $Z_{TotalTE}$  é a impedância total do TE referida ao secundário, tem-se, então:

$$\dot{V}_{secTE} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE}^2}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2)} \right) * Z_{TotalTE} \quad (2.73)$$

$$\dot{V}_{comp} = \dot{V}_{secTE} + \Delta\dot{V}_{reator} + \Delta\dot{V}_{chave} \quad (2.74)$$

$$\dot{V}_{comp} = \dot{V}_{secTE} + \dot{I}_{fonte} * (Z_{reator} + Z_{chave}) \quad (2.75)$$

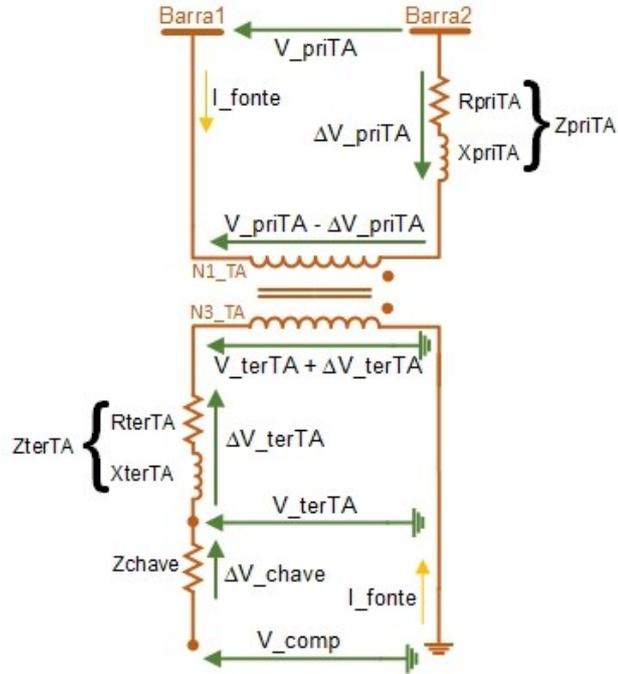
Substituindo (2.60) em (2.75):

$$\dot{V}_{comp} = \dot{V}_{secTE} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * (Z_{reator} + Z_{chave}) \quad (2.76)$$

- Grandezas Elétricas presentes no Transformador de Acoplamento

A figura 2.12 mostra o circuito equivalente do Transformador de Acoplamento com o RET regulando uma sobretensão. Neste, estão presentes as impedâncias dos enrolamentos terciário e primário do TA, assim como a impedância da chave ChcN.

Figura 2.12 - Circuito equivalente do Transformador de Acoplamento com o RET operando como abaixador de tensão. Adaptado de [10].



Tendo como referência o circuito do TA, tem-se que:

$$\dot{V}_{terTA} = \dot{V}_{comp} + \Delta\dot{V}_{chave} \quad (2.77)$$

$$\dot{V}_{terTA} = \dot{V}_{comp} + \dot{I}_{fonte} * Z_{chave} \quad (2.78)$$

Substituindo (2.60) em (2.78):

$$\dot{V}_{terTA} = \dot{V}_{comp} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * Z_{chave} \quad (2.79)$$

Substituindo (2.76) em (2.79):

$$\dot{V}_{terTA} = \dot{V}_{secTE} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * (2 * Z_{chave} + Z_{reator}) \quad (2.80)$$

Sabendo que a relação de transformação entre os enrolamentos do TA é considerada unitária, pode-se inferir que:

$$\dot{V}_{priTA} - \Delta\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{terTA} + \Delta\dot{V}_{terTA} \quad (2.81)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{terTA} + \Delta\dot{V}_{terTA} + \Delta\dot{V}_{priTA} \quad (2.82)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{terTA} + \dot{I}_{fonte} * (Z_{terTA} + Z_{priTA}) \quad (2.83)$$

Substituindo (2.60) em (2.83):

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{terTA} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * (Z_{terTA} + Z_{priTA}) \quad (2.84)$$

Considerando que  $Z_{TotalTA}$  é a impedância total do TA referido ao primário, tem-se:

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{terTA} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * Z_{TotalTA} \quad (2.85)$$

Substituindo (2.80) em (2.85):

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{secTE} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) \quad (2.86)$$

Substituindo (2.73) em (2.86):

$$\dot{V}_{priTA} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} + \dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \left( \frac{\alpha_{TE}^2}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2)} \right) * Z_{TotalTE} \quad (2.87)$$

Considerando a carga do sistema como uma impedância constante, pode-se reescrever a equação (2.87) como:

$$\dot{V}_{priTA} = \frac{\dot{V}_{barra2}}{\alpha_{TE} + 1} + \frac{\dot{V}_{barra2}}{Z_{carga}} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right) * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \left( \frac{\alpha_{TE}^2}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2)} \right) * Z_{TotalTE} \quad (2.88)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{barra2} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 1} + \frac{(\alpha_{TE} + 1)}{(\alpha_{TE} + 2)} * \frac{(Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator})}{Z_{carga}} \right) + \left( \frac{\alpha_{TE}^2}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2)} \right) * \frac{Z_{TotalTE}}{Z_{carga}} \quad (2.89)$$

$$\dot{V}_{priTA} = \dot{V}_{barra2} * \left( \frac{(\alpha_{TE} + 2) * Z_{carga} + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \alpha_{TE}^2 * Z_{TotalTE}}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2) * Z_{carga}} \right) \quad (2.90)$$

Sabendo que:

$$\dot{V}_{barra2} = \dot{V}_{barra1} - \dot{V}_{priTA} \quad (2.91)$$

Substituindo (2.90) em (2.91) e isolando  $\dot{V}_{barra2}$ :

$$\dot{V}_{barra2} = \dot{V}_{barra1} * \left( \frac{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2) * Z_{carga}}{(\alpha_{TE} + 2)^2 * Z_{carga} + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \alpha_{TE}^2 * Z_{TotalTE}} \right) \quad (2.92)$$

Na compensação negativa, a potência requerida pela compensação flui do Transformador de Acoplamento para o Transformador de Excitação. Assim, pode-se considerar que a potência requerida para que seja realizada a compensação é a potência no enrolamento primário do TA. Todavia, desconsiderando as perdas na malha de compensação, pode-se considerar as potências no TE e no TA iguais. Sendo assim:

$$\dot{S}_{RET} = \dot{V}_{barra2} * \dot{I}^*_{priTE} \quad (2.93)$$

Substituindo (2.62) em (2.93):

$$\dot{S}_{RET} = \dot{V}_{barra2} * \dot{I}^*_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 2} \right) \quad (2.94)$$

Por fim, substituindo (2.45) em (2.94):

$$\dot{S}_{RET} = \dot{S}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 2} \right) \quad (2.95)$$

Vemos que na condição de regulador de sobretensões o valor da potência requerida pelo RET também é consideravelmente menor que a potência drenada pela carga. Além disso, comparando as equações (2.46) e (2.95), percebe-se que a potência drenada pelo RET na condição de compensação negativa também é menor do que quando em compensação positiva utilizando o mesmo tape.

Pode-se ver nas tabelas 2.1 e 2.2 as correntes, tensões e potências presentes no RET para as duas condições de operação.

Tabela 2.1 - Correntes, tensões e potências presentes no RET atuando como elevador de tensão.

<b>Correntes, tensões e potências no RET atuando como elevador de tensão</b>	
$\dot{I}_{fonte}$	$\dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE}} \right)$
$\dot{I}_{priTE}$	$\dot{I}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right)$
$\dot{I}_{neutro}$	$\dot{I}_{carga}$

<b>Correntes, tensões e potências no RET atuando como elevador de tensão</b>	
$\dot{V}_{priTA}$	$\dot{V}_{barra2} * \left( \frac{\alpha_{TE} * Z_{carga} - (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) - \alpha_{TE}^2 * Z_{TotalTE}}{\alpha_{TE} * (\alpha_{TE} + 1) * Z_{carga}} \right)$
$\dot{V}_{barra2}$	$\dot{V}_{barra1} * \left( \frac{\alpha_{TE} * (\alpha_{TE} + 1) * Z_{carga}}{\alpha_{TE}^2 * (Z_{carga} + Z_{TotalTE}) + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator})} \right)$
$\dot{S}_{RET}$	$\dot{S}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE}} \right)$

Tabela 2.2 - Correntes, tensões e potências presentes no RET atuando como abaixador de tensão.

<b>Correntes, tensões e potências no RET atuando como abaixador de tensão</b>	
$\dot{I}_{fonte}$	$\dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 2} \right)$
$\dot{I}_{priTE}$	$\dot{I}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 2} \right)$
$\dot{I}_{neutro}$	$\dot{I}_{carga} * \left( \frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 2} \right)$
$\dot{V}_{priTA}$	$\dot{V}_{barra2} * \left( \frac{(\alpha_{TE} + 2) * Z_{carga} + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \alpha_{TE}^2 * Z_{TotalTE}}{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2) * Z_{carga}} \right)$
$\dot{V}_{barra2}$	$\dot{V}_{barra1} * \left( \frac{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2) * Z_{carga}}{(\alpha_{TE} + 2)^2 * Z_{carga} + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \alpha_{TE}^2 * Z_{TotalTE}} \right)$
$\dot{S}_{RET}$	$\dot{S}_{carga} * \left( \frac{1}{\alpha_{TE} + 2} \right)$

A tabela 2.3 mostra as relações entre a corrente suprida pela fonte ( $\dot{I}_{fonte}$ ), a corrente no primário ( $\dot{I}_{priTE}$ ) e no neutro do TE ( $\dot{I}_{neutro}$ ) com relação à corrente drenada pela carga ( $\dot{I}_{carga}$ ) nos dois modos de operação, considerando as premissas estabelecidas.

Tabela 2.3 - Relações entre a corrente suprida pela fonte, a corrente no primário e no neutro do TE com relação à corrente drenada pela carga nos dois modos de operação.

<b>RET elevador</b>	<b>RET abaixador</b>
$ \dot{I}_{fonte}  >  \dot{I}_{carga} $	$ \dot{I}_{fonte}  <  \dot{I}_{carga} $
$ \dot{I}_{priTE}  <  \dot{I}_{carga} $	$ \dot{I}_{priTE}  <  \dot{I}_{carga} $
$ \dot{I}_{neutro}  =  \dot{I}_{carga} $	$ \dot{I}_{neutro}  <  \dot{I}_{carga} $

## 3 MODELAGEM DO RET NO SOFTWARE SIMULINK

### 3.1 Considerações iniciais

Já tendo sido exposta a estrutura do RET, o atual capítulo encontra-se dedicado ao desenvolvimento de uma modelagem computacional monofásica destinada a análises avaliativas do desempenho do dispositivo frente aos fenômenos de variação de tensão. A partir da triplicação do circuito monofásico foi modelado um sistema trifásico para avaliação da atuação do RET no desequilíbrio de tensão. A ferramenta escolhida para isto foi o software Simulink, da companhia MathWorks, que é uma plataforma já consolidada e reconhecida para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. A versão utilizada foi o Simulink 8.6 (Matlab R2015b).

### 3.2 Bibliotecas do simulador simulink

O Simulink possui uma ótima interface gráfica e uma extensa biblioteca de blocos das mais diversas áreas da engenharia. Dessa forma, uma grande variedade de sistemas pode ser projetada e testada, como sistemas de controle, sistemas de processamento de sinal, sistemas de comunicação, entre muitos outros. Ao contrário do Matlab, que funciona com base em linhas de código, o Simulink possui um ambiente de programação gráfico em que os modelos estão disponibilizados sob a forma de diagramas de blocos, facilitando sua utilização.

Como exemplo de biblioteca do Simulink tem-se a *SimPowerSystems*. Ela fornece blocos eletrônicos, mecatrônicos e elétricos. Inclui modelos como semicondutores, motores, componentes para acionamento eletromecânico, *Smart Grids*, e sistemas de energias renováveis. Estes componentes podem ser utilizados para avaliar circuitos elétricos de potência, circuitos de acionamentos elétricos, dentre outras aplicações.

Nesta biblioteca pode-se encontrar modelos de fontes de tensão, resistores, indutores, capacitores, transformadores, linhas de transmissão, chaves mecânicas controladas, motores, semicondutores, além de blocos destinados à medição de sinais (tensão e corrente).

O Simulink também conta com uma série de blocos dedicados a operações matemáticas (biblioteca “*Math Operations*”) que possibilitam a implementação de diversas lógicas de controle, tudo de uma forma gráfica através de diagramas de blocos, tornando desnecessário o uso de código de programação.

### 3.3 Modelagem do regulador através do simulink

O desenvolvimento do texto daqui em diante terá a finalidade de correferir cada componente do RET relatado no capítulo anterior a blocos do Simulink que melhor os descrevem matematicamente. Lembrando que, embora essa pesquisa se apoie em [10], há diferenças no processo de modelagem e parametrização dos blocos, já que os softwares utilizados não foram os mesmos. A maior diferença está na implementação do sistema de controle. Em [10], o mesmo foi embasado inteiramente na linguagem MODELS, ferramenta do ATPDraw que permite modelar dispositivos de controle a partir de um algoritmo. No presente trabalho, todo o sistema de controle foi implementado através de diagramas de blocos, que podem ser vistos no Apêndice A.

De forma geral, os principais parâmetros associados ao regulador e ao sistema elétrico modelado em [10] estão dispostos na tabela 3.1. As etapas de definição de cada parâmetro estão detalhadas no trabalho mencionado. O regulador em questão trata-se de um protótipo monofásico para estudos laboratoriais, todavia o mesmo se mostrou eficiente para adequação de distúrbios de variações de tensão a qual foi submetido.

Tabela 3.1 - Principais parâmetros do regulador e do sistema modelado.

Dados	Potência [VA]	Fator de potência	Tensão [V]	Potência de CC [MVA]	Zcc [%]	Rcc [%]
<u>Fonte</u>	-	-	127	3,40	-	-
<u>TE</u>	1500	-	127 : (34,0–27,2–20,4–13,6–6,8)	-	3,5	2,27
<u>TA</u>	1500	-	50 : 50 : 50	-	3,5	1,73
<u>Carga</u>	1500	0,94 ind	127	-	-	-

Serão detalhados a seguir os blocos utilizados para as unidades eletromagnéticas do regulador.

### 3.3.1 Transformador de Excitação (autotransformador)

O bloco escolhido para representar o Transformador de Excitação foi o “*Multi-Winding Transformer*”, que pode ser encontrado pela barra de busca da biblioteca do Simulink ou pelo caminho **Simscape / SimPowerSystems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Elements**.

O bloco “*Multi-Winding Transformer*” implementa um transformador que permite a escolha da sua quantidade de enrolamentos. As informações relacionadas à característica de saturação do núcleo deste transformador podem ser especificadas. Nesse caso devem ser inseridos em sua parametrização uma série de pares de pontos da curva de saturação (Corrente / Fluxo). Caso não se queira simular a saturação, pode-se também inserir somente um valor fixo para a indutância de magnetização do núcleo [14].

A característica de saturação (ou indutância de magnetização) e a resistência que representa as perdas no núcleo devem estar referidas ao enrolamento primário deste transformador, conforme é apresentado na figura 3.1. Também deve-se informar as resistências e indutâncias de dispersão de cada enrolamento do transformador.

A vantagem deste bloco para a representação do Transformador de Excitação é que ele possibilita a inserção de múltiplos tapes igualmente distribuídos ao longo de um enrolamento. Assim, parametrizou-se o bloco com um enrolamento primário e um enrolamento secundário, sendo este último subdividido em quatro tapes igualmente espaçados. Levando em conta ainda a tensão total do enrolamento secundário, pode-se considerar a existência de cinco tapes.

Ainda realçando a facilidade de parametrização do bloco, a resistência e reatância de dispersão de cada tape são automaticamente calculadas a partir da resistência e da reatância de dispersão totais do enrolamento secundário, assim só é necessário informar as impedâncias totais de cada enrolamento, dispensando a parametrização de cada tape individualmente. A mesma modelagem no software ATP demandaria a utilização de um transformador simbolizando cada tape, ou seja, cinco transformadores para esta mesma aplicação.

Na figura 3.1 pode-se ver o circuito equivalente do bloco com a modelagem descrita acima. Os tapes numerados com 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 estão igualmente espaçados no segundo enrolamento, assim as tensões nominais nesses tapes são, respectivamente,  $\left(\frac{4}{5}\right) * V2$ ,  $\left(\frac{3}{5}\right) * V2$ ,  $\left(\frac{2}{5}\right) * V2$  e  $\left(\frac{1}{5}\right) * V2$ . O ponto 2+ é o quinto tape, que possui a tensão total do enrolamento secundário ( $V2$ ). Nessa aplicação o ponto 2 é conectado à terra, e como se trata de um autotransformador, o ponto 1 deve ser conectado ao ponto 2+. Na figura 3.2 pode-se ver uma imagem representativa do bloco em si, assim como é visto na plataforma Simulink, e na figura 3.3 pode-se ver sua janela de parametrização. Vale observar que, como o autotransformador está sendo modelado como um transformador de dois enrolamentos com o primário e secundário ligados em série, conseqüentemente, os parâmetros nominais que serão inseridos no bloco do Simulink não são numericamente iguais àqueles dispostos na tabela 3.1. Por exemplo, para este caso, embora a potência do autotransformador seja de 1500 VA, quando este é modelado como um transformador convencional, a potência deve ser corrigida para 1000 VA.

Figura 3.1 - Circuito equivalente do bloco “Multi-Winding Transformer” com número de enrolamentos e tapes configurados para a aplicação em questão. Adaptado de [14].

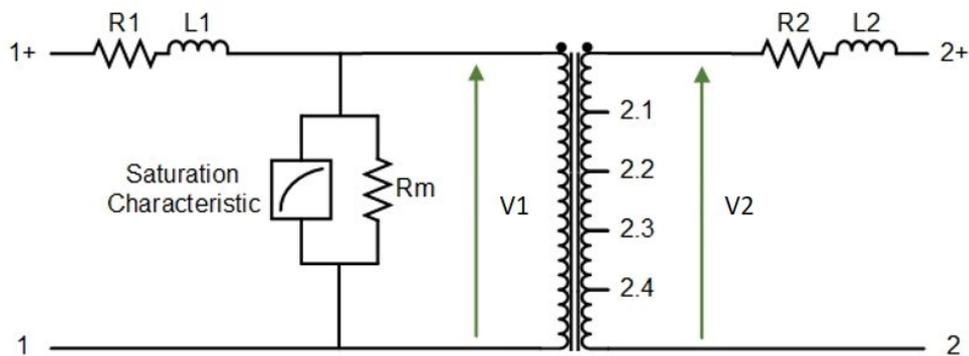


Figura 3.2 - Aparência do bloco “Multi-Winding Transformer” na plataforma Simulink.

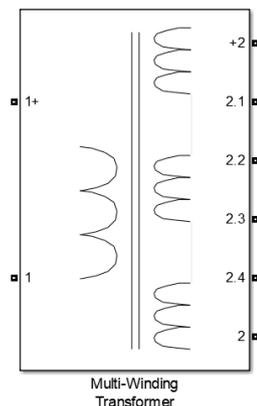
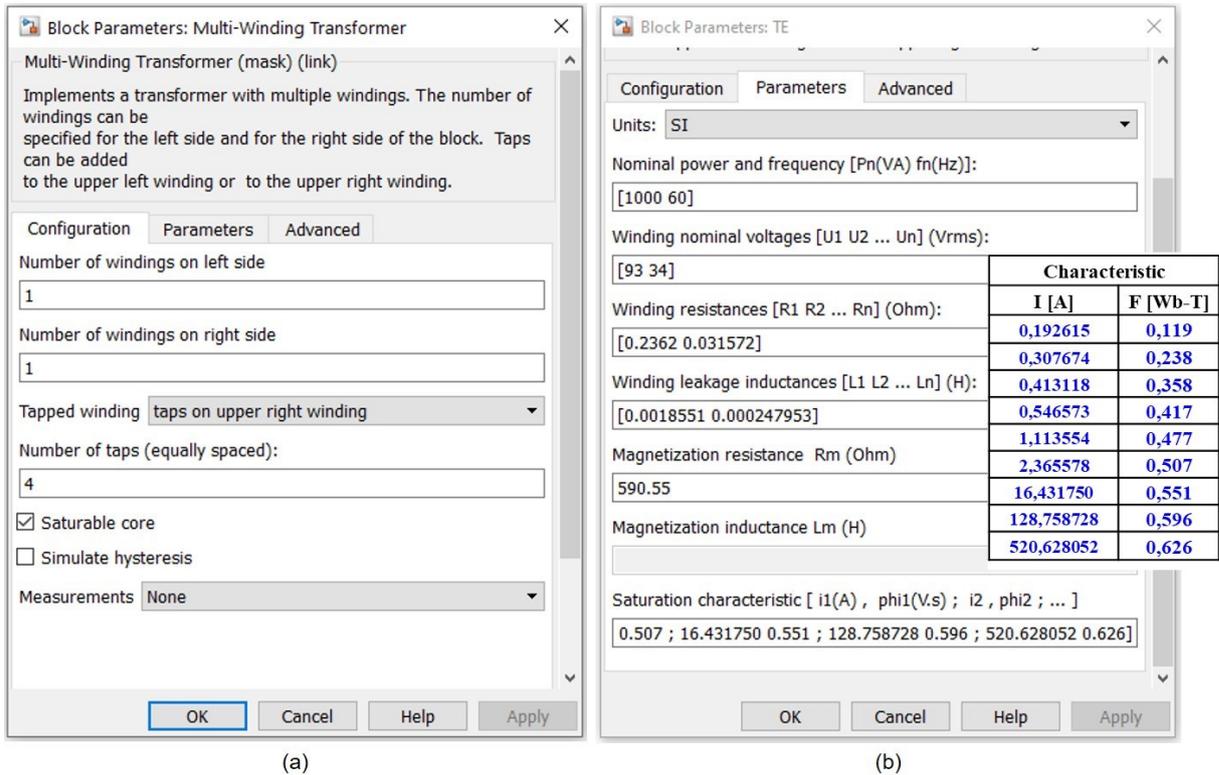


Figura 3.3 - Abas "Configuration" (a) e "Parameters" (b) da janela de parametrização do bloco "Multi-Winding Transformer".



Vê-se na figura 3.3(a) que a primeira aba da janela tem por finalidade configurar os enrolamentos do transformador. Escolheu-se a configuração de um enrolamento de cada lado do bloco, sendo ainda dividido um desses enrolamentos (destinado ao secundário do TE) em 5 partes iguais, ou seja, adicionando 4 tapes a este enrolamento.

Já na figura 3.3(b) nota-se que na segunda aba da janela de parametrização são inseridos os valores de resistências e indutâncias de dispersão de cada enrolamento do transformador. Também são estabelecidos os valores de potência, tensões e frequência nominais, além dos pares de valores de Corrente/Fluxo da curva de saturação, referidos ao enrolamento primário. Insere-se também o valor da resistência que simboliza as perdas no núcleo ( $R_m$ ), também referida ao enrolamento primário.

### 3.3.2 Transformador de Acoplamento (transformador série)

Já o bloco escolhido para representar o Transformador de Acoplamento foi o "Saturable Transformer", que pode ser encontrado pela barra de busca da biblioteca do Simulink ou também pelo mesmo caminho do "Multi-Winding Transformer",

## Simscape / SimPowerSystems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Elements.

Pode-se dizer que o “*Saturable Transformer*” é uma versão mais simples do “*Multi-Winding Transformer*”. Quanto à quantidade de enrolamentos, ele só permite a presença de dois ou três, além de não ser possível adicionar taps a eles [15]. Todavia é um modelo condizente com as necessidades de representação do Transformador de Acoplamento, onde há três enrolamentos com relação de transformação unitária entre si.

Assim como no “*Multi-Winding Transformer*”, a característica de saturação e a resistência que representa as perdas no núcleo devem estar referidas ao enrolamento primário (referência). Também deve-se informar as resistências e indutâncias de dispersão de cada enrolamento do transformador.

Na figura 3.4 pode-se ver o circuito equivalente do bloco com a modelagem descrita acima. Na figura 3.5 pode-se observar uma imagem do bloco em si, assim como é visto na plataforma Simulink, e na figura 3.6 é apresentada a janela de parametrização. Nesse caso, o enrolamento 1 está conectado em série na linha, o enrolamento 2 será responsável pela compensação positiva (subtensão) e o enrolamento 3 será utilizado para compensação negativa (sobretensão).

Figura 3.4 - Circuito equivalente do bloco “*Saturable Transformer*” com enrolamentos configurados para a aplicação em questão. Adaptado de [15].

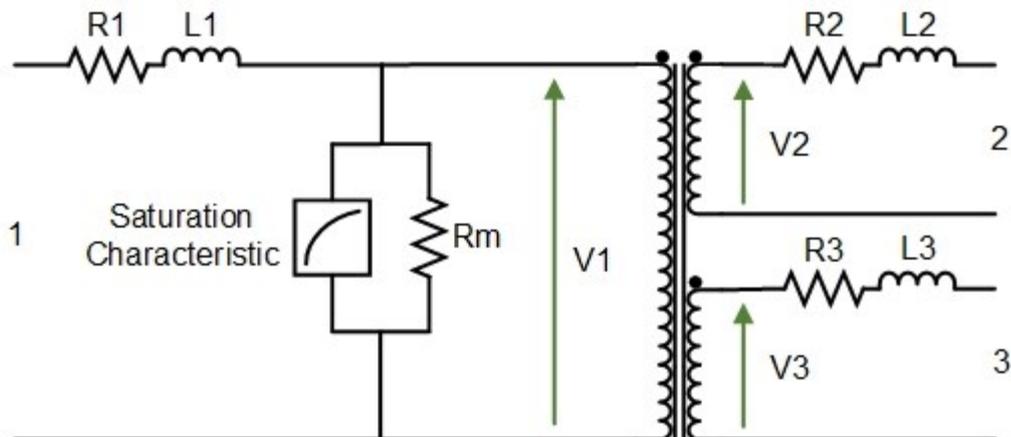


Figura 3.5 - Aparência do bloco "Saturable Transformer" na plataforma Simulink.

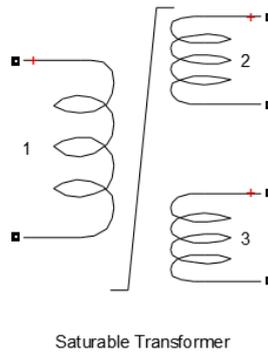
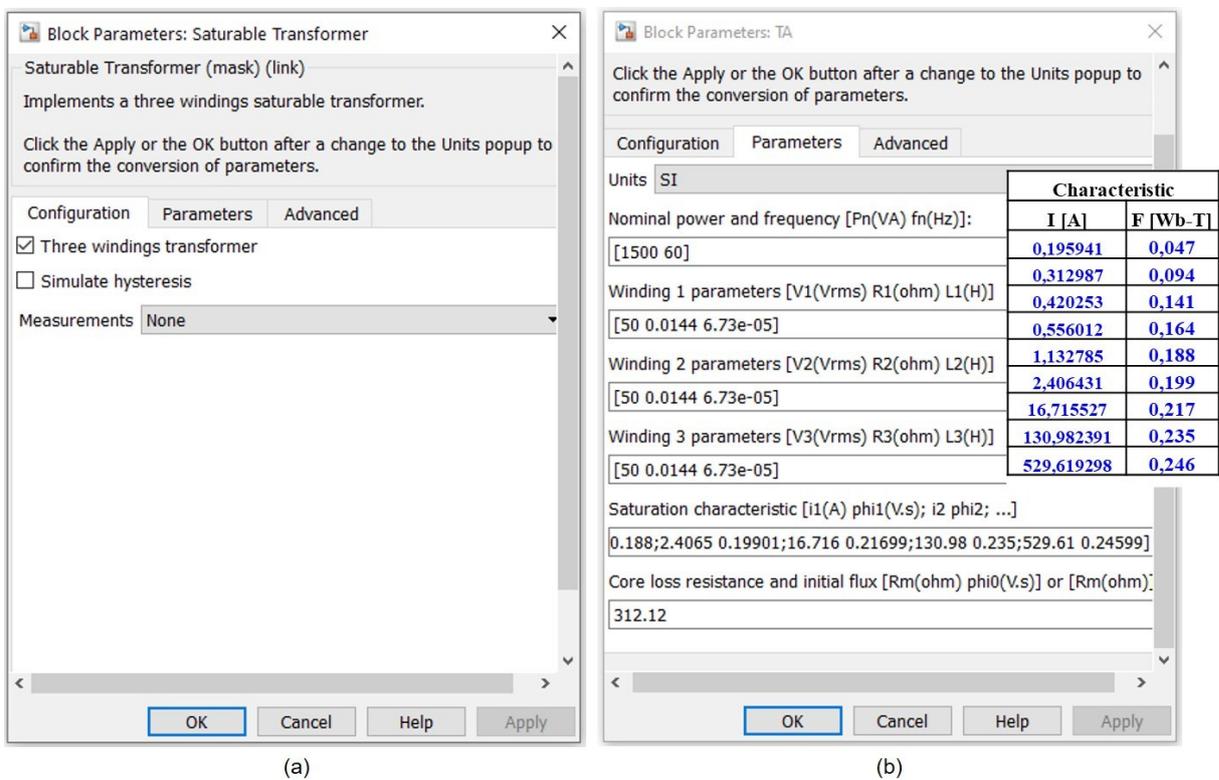


Figura 3.6 - Abas "Configuration" (a) e "Parameters" (b) da janela de parametrização do bloco "Saturable Transformer".



Nota-se na figura 3.6(a) que a primeira aba da janela de parametrização possui os campos para configuração dos três enrolamentos. Já na segunda aba (figura 3.6(b)) é onde são inseridos os valores de resistências e indutâncias de dispersão dos três enrolamentos. Também são inseridos os valores de potência, tensões e frequência nominais, além dos pares de valores de Corrente/Fluxo da curva de saturação, referidos ao enrolamento primário (referência). Insere-se também o valor da resistência que simboliza as perdas no núcleo ( $R_m$ ), também referida ao enrolamento primário.

### 3.3.3 Chaves

O bloco escolhido para as chaves foi o “*Breaker*”, que pode ser encontrado pela barra de busca da biblioteca do Simulink ou pelo caminho **Simscape / SimPowerSystems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Elements**.

Este bloco implementa um disjuntor cuja abertura e fechamento podem ser controlados a partir de um sinal Simulink® externo ou a partir de parametrização interna [16]. O bloco conta ainda com um circuito *snubber* RC conectado paralelamente à chave. A utilização desse circuito *snubber* RC é indicada quando a chave está conectada em série com circuitos indutivos, como é o caso. Também é possível parametrizar uma pequena resistência de contato, sendo representada em série com a chave.

Quando se escolhe o modo de abertura e fechamento da chave via sinal externo, a porta de entrada para este sinal aparece no bloco (porta “c”). A chave está aberta quando o sinal na porta de controle é zero e fechada quando qualquer valor positivo é aplicado. O modelo de RET em questão utiliza nove chaves, sendo seis chaves para acionamento dos tapes do TE e duas chaves de polaridade, relacionadas com o TA. Pode-se ver na figura 3.7 o bloco no ambiente gráfico do software, e na figura 3.8 sua janela de parametrização.

Figura 3.7 - Aparência do bloco “Breaker” na plataforma Simulink.

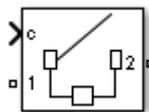
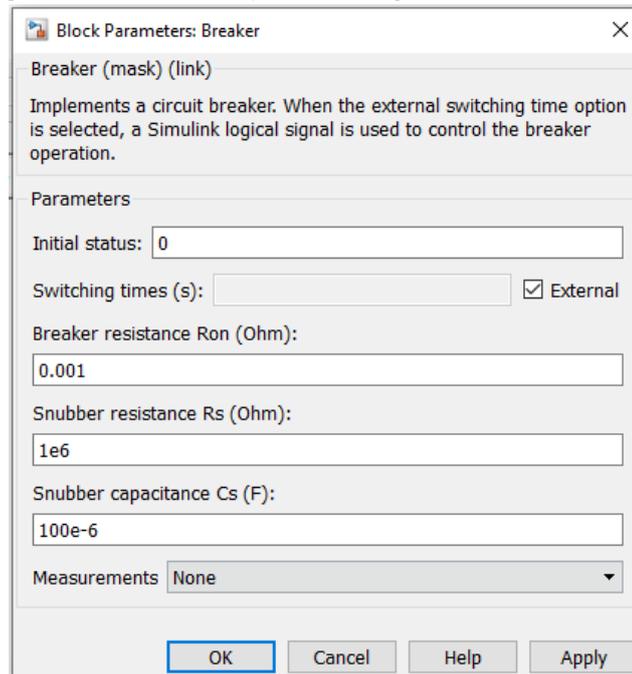


Figura 3.8 - Janela de parametrização do bloco "Breaker".



### 3.3.4 Indutâncias e carga

Ainda vale lembrar que o modelo conta com cinco indutores (reatores) para mitigação dos impactos de chaveamento, sendo disposto um desses reatores em série com cada tape do Transformador de Excitação, além de uma indutância simbolizando a impedância de curto-circuito do sistema. Também há a carga, composta por uma impedância constante RL.

O bloco escolhido para representa-los foi o “*Series RLC Branch*”, que pode ser encontrado pela barra de busca da biblioteca do Simulink ou pelo caminho **Simscape / SimPowerSystems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Elements**. Este bloco permite desde a implementação de um resistor (R) ou um indutor (L) ou um capacitor (C) isolado, até a combinação em série destes em pares (RL, RC, LC) ou trio (RLC) [17].

### 3.3.5 Sistema de controle

Como já foi mencionado, o modelo de chave utilizado conta com controle de abertura e fechamento via sinal de lógica externo. Sendo o *Simulink* um ambiente gráfico, a criação dessas lógicas de controle pode ser feita de forma simples utilizando blocos para manipulação dos sinais. A extensa biblioteca do *Simulink* torna ainda mais

fácil a implementação do sistema de controle, sendo utilizados somente blocos para sua construção, não sendo necessária a utilização de código de programação.

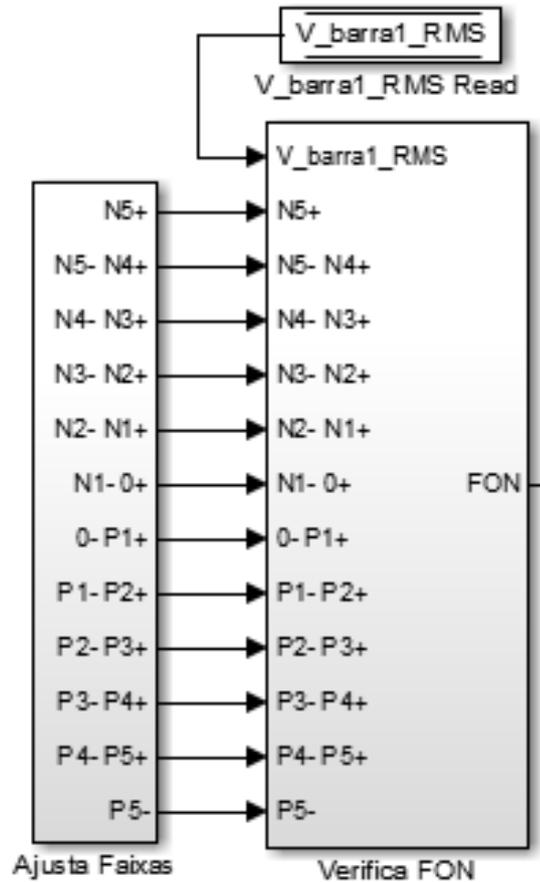
Dois blocos essenciais para o sistema de controle são o “*Voltage Measurement*” e o “*Current Measurement*”, ambos no caminho **Simscape / SimPowerSystems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Measurements**. Estes blocos são conectados ao circuito de potência.

O *Voltage Measurement* mede a tensão instantânea entre dois nós, enquanto o *Current Measurement* é usado para medir a corrente instantânea fluindo em um ramo. As saídas de ambos os blocos fornecem um sinal *Simulink*® que pode ser manipulado por outros blocos de controle para desenvolvimento da lógica de acionamento das chaves [18] [19].

Outro bloco muito importante para a implementação do sistema de controle é o “*RMS*”, que pode ser encontrado no caminho **Simscape / SimPowerSystems / Specialized Technology / Control & Measurements / Measurements**. Este bloco recebe o sinal de medidores instantâneos de tensão e corrente, e com o valor da frequência fundamental do sinal de entrada, calcula o valor eficaz verdadeiro (true Root Mean Square) deste [20]. É com base em valores eficazes que o sistema de controle irá funcionar, daí a importância deste bloco.

Portanto, através dos componentes supramencionados é realizada a medição da tensão do barramento à montante do regulador (Barra1), e armazenada na variável “V\_barra1\_RMS”, como mostra a figura 3.9. Essa variável é disponibilizada como um dado de entrada para o bloco “Verifica FON”, indicado na mesma figura.

Figura 3.9 - Estágio responsável por verificar a Faixa de Operação Necessária (FON).



Além do valor da tensão medida na Barra1, também são necessários outros parâmetros de entrada para posterior tomada de decisão do sistema de controle. O outro bloco que fornece tais parâmetros de entrada está indicado na figura 3.9, denominado de “Ajusta Faixas” (Apêndice A.1). Conforme abordado na seção 2.2 deste trabalho e novamente apresentado na figura 3.10, para cada uma das onze faixas de operação do regulador existe um limite superior e um inferior de tensão, de modo que, se a tensão na Barra1 estiver dentro desse limite, significa que o regulador deve acionar as chaves referentes a essa faixa de operação. A título de exemplo, a FaixaP5, que ocorre quando a chave de polaridade positiva e a chave de tape 5 estão acionadas, possui um limite inferior (P5-) e um limite superior (P5+) de operação. Portanto, o bloco “Ajusta Faixas” é o responsável por disponibilizar esses valores limites para o bloco “Verifica FON”.

Figura 3.10 - As onze faixas de operação do sistema.

Tipo de compensação	Chave de polaridade	Chave de tape	Faixa de operação
Compensação negativa (Sobretensão)	ChcN	Ch5	Faixa N5
		Ch4	Faixa N4
		Ch3	Faixa N3
		Ch2	Faixa N2
		Ch1	Faixa N1
Sem compensação	ChcP + ChcN	Ch0 + ChBP	Faixa 0
Compensação positiva (Subtensão)	ChcP	Ch1	Faixa P1
		Ch2	Faixa P2
		Ch3	Faixa P3
		Ch4	Faixa P4
		Ch5	Faixa P5

↑  
Sentido de aumento das faixas de operação

Posteriormente com todos os parâmetros de entrada estabelecidos, o bloco “Verifica FON” (Apêndice A.1) faz a comparação entre a tensão medida e os limites das faixas de operação e determina a faixa de operação necessária (FON). Por exemplo, se a tensão na Barra1 estiver dentro dos limites P5+ e P5-, significa que a FON é a FaixaP5. Em seguida será explicado o processo de determinação dos limites para cada faixa de operação.

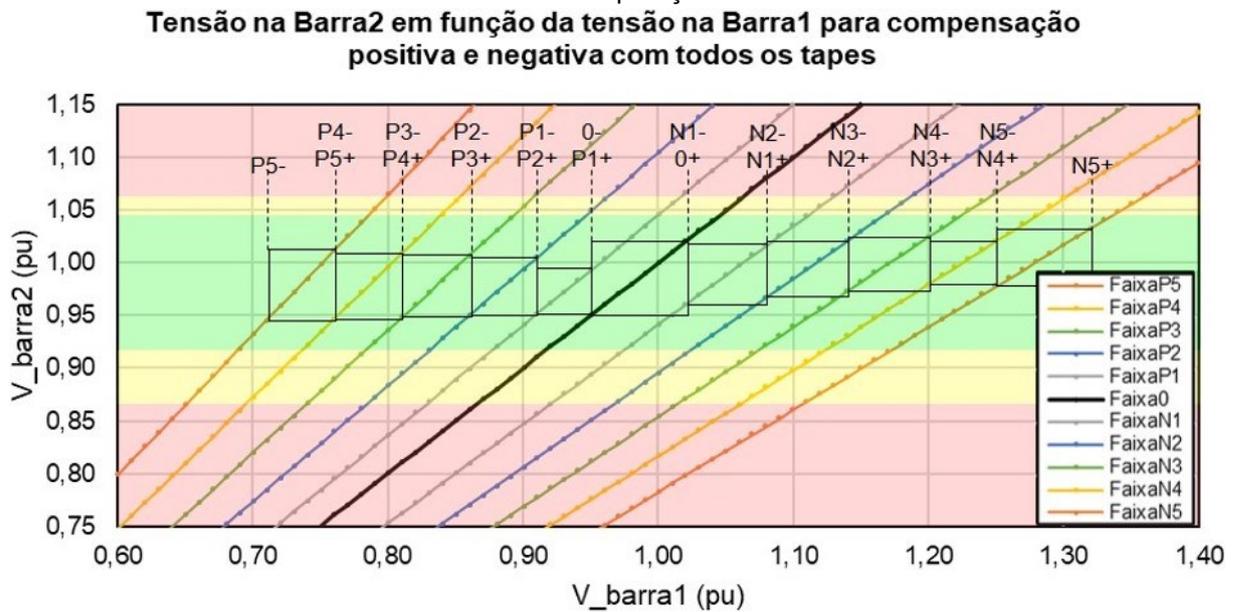
O cálculo dos limites para cada faixa de operação foi feito com base na modelagem matemática feita na seção 2.3, mais precisamente através das equações (2.42) e (2.92).

$$\dot{V}_{barra2} = \dot{V}_{barra1} * \left( \frac{\alpha_{TE} * (\alpha_{TE} + 1) * Z_{carga}}{\alpha_{TE}^2 * (Z_{carga} + Z_{TotalTE}) + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator})} \right) \quad (2.42)$$

$$\dot{V}_{barra2} = \dot{V}_{barra1} * \left( \frac{(\alpha_{TE} + 1) * (\alpha_{TE} + 2) * Z_{carga}}{(\alpha_{TE} + 2)^2 * Z_{carga} + (\alpha_{TE} + 1)^2 * (Z_{TotalTA} + 2 * Z_{chave} + Z_{reator}) + \alpha_{TE}^2 * Z_{TotalTE}} \right) \quad (2.92)$$

Com base nos parâmetros dos transformadores utilizados no trabalho [10] e nos valores das impedâncias das chaves, dos reatores e da carga, foram levantadas as curvas teóricas da figura 3.11. Nela se vê o comportamento da tensão na Barra2 (barra da carga) em função da tensão na Barra1 com o RET operando em cada uma das faixas de operação.

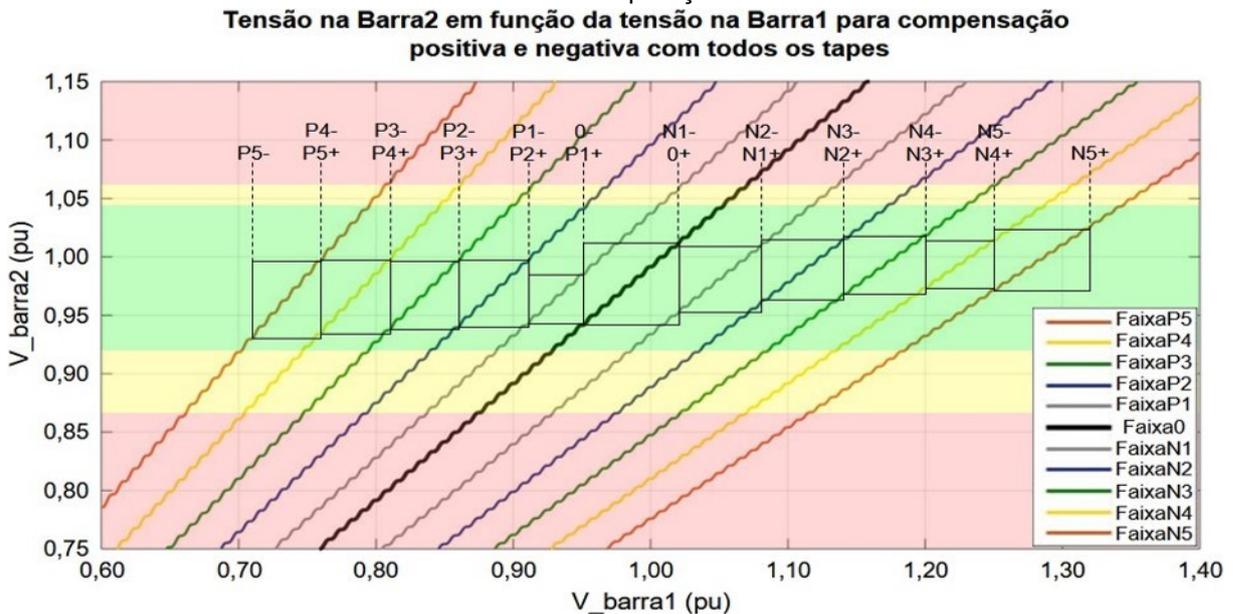
Figura 3.11 - Resposta teórica da tensão na Barra2 em função da tensão na Barra1 em todas as faixas de operação.



Os retângulos pretos na figura delimitam as onze faixas de operação que foram ajustadas e seus respectivos limites. Os limites das faixas foram escolhidos de forma que a tensão na Barra2 seja mantida o mais próximo do seu valor nominal, ou seja, de 1,0 pu. Observa-se também que o gráfico possui faixas vermelhas, amarelas e verde representando as classificações crítica, precária e adequada, respectivamente, de acordo com o PRODIST [2]. Obviamente, todas as faixas ajustadas se encontram dentro da classificação adequada.

Para efeito de comparação, foi feita a simulação no *Simulink* da mesma condição abordada acima, buscando ver a resposta da tensão na Barra2 com relação à variação da tensão na Barra1. Para isso, a tensão na Barra1 foi alterada continuamente através de variação na fonte de suprimento, e a tensão na Barra2 foi medida. Esse processo de medição foi realizado para cada faixa de operação do regulador. O resultado pode ser visto no gráfico da figura 3.12.

Figura 3.12 - Resposta simulada da tensão na Barra2 em função da tensão na Barra1 em todas as faixas de operação.



Pode-se observar quão próxima é a resposta teórica, gerada com base no equacionamento desenvolvido na seção 2.3, da resposta obtida através da simulação do sistema no domínio do tempo. A diferença média entre os resultados da simulação e teóricos é menor do que 1%. Esta pequena diferença pode ser explicada pela omissão dos ramos *shunt* dos dois transformadores do RET na modelagem matemática, não levando em conta, portanto, os efeitos das correntes de magnetização.

Por fim, a figura 3.13 ilustra os últimos estágios do sistema de controle. O primeiro tem a função de comparar a faixa de operação atual (FOA) – faixa que o regulador está operando naquele instante –, com a faixa de operação necessária (FON) – faixa que o regulador precisa atingir –. Caso elas não sejam iguais, este bloco altera a FOA de forma gradual, faixa a faixa, até que a mesma se iguale à FON. Já o segundo subsistema da figura tem a função de gerar os sinais lógicos de *trigger* que serão levados até as chaves do sistema de potência. Este subsistema recebe constantemente o valor da faixa de operação atual (FOA) e gera os sinais de *trigger* para as chaves referentes àquela faixa de operação.



No “Apêndice A – Detalhamento dos subsistemas do processo de controle do RET” estão apresentados os conteúdos de cada um dos subsistemas relacionados à lógica de controle do regulador. É possível observar a diversidade de blocos utilizados e a fácil implementação dos mesmos.

### 3.3.6 Sistema de potência

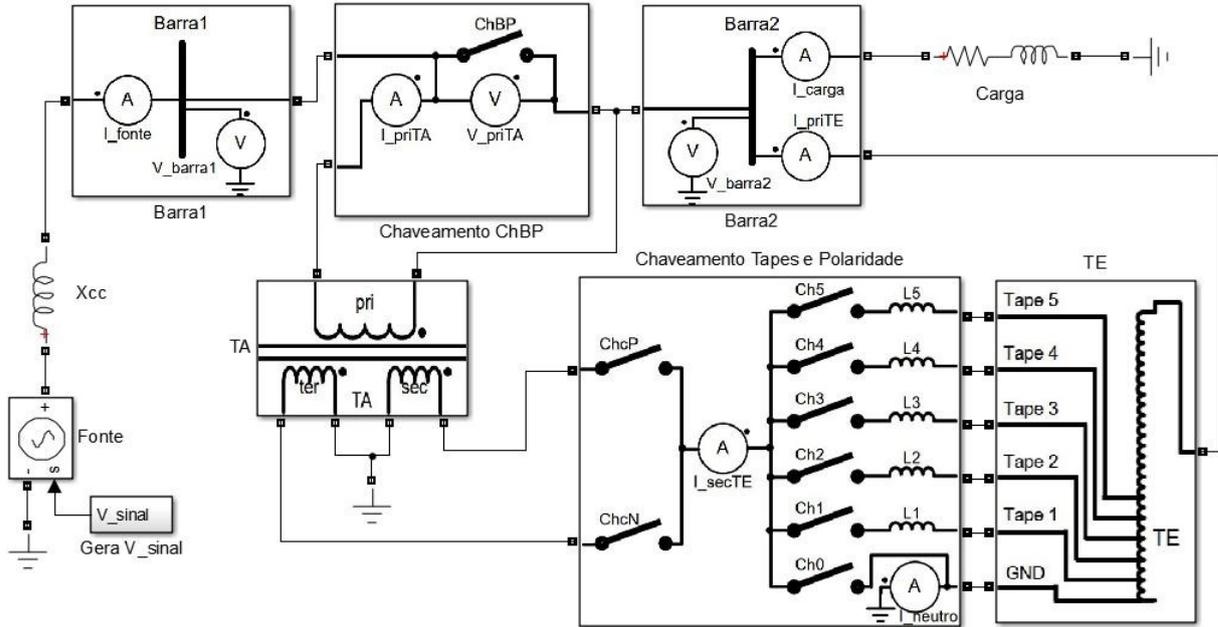
Na figura 3.14 pode-se ver o circuito de potência do regulador de tensão (RET) e do restante do sistema elétrico, modelado na forma monofásica. Nele é possível ver:

- a fonte controlada, intitulada “Fonte”;
- o subsistema “Gera  $V_{\text{sin}}$ ”, onde é programada a sequência de eventos de variação de tensão a serem gerados pela fonte controlada;
- a reatância de curto-circuito do sistema a montante do RET, nomeada de “Xcc”;
- o Transformador de Acoplamento (TA);
- o Transformador de Excitação (TE);
- a carga RL do sistema de  $(10,059 + j3,651)\Omega$ , de 1500VA com  $fp = 0,94$ ;
- o subsistema “Barra1”, onde são medidas a tensão na Barra1 e a corrente drenada da fonte. Nele também é calculada a potência absorvida da fonte;
- o subsistema “Barra2”, onde são medidas a tensão na Barra2 e as correntes drenadas pela carga e pelo primário do TE. Também são calculadas as potências absorvidas pela carga e pelo primário do TE;
- o subsistema “Chaveamento Tapes e Polaridade”, onde estão as chaves  $Ch0, Ch1, Ch2, Ch3, Ch4, Ch5, ChcP$  e  $ChcN$  e os reatores para o auxílio da alteração de tapes sob carga  $L1, L2, L3, L4$  e  $L5$ . Neste subsistema são medidas as correntes no neutro e no secundário do TE;
- o subsistema “Chaveamento ChBP”, onde está a chave de by-pass ( $ChBP$ ). Neste subsistema são medidas tensão e corrente no primário do TA, bem como a potência neste enrolamento.

Os subsistemas “Chaveamento Tapes e Polaridade” e “Chaveamento ChBP” recebem os sinais de *trigger* do sistema de controle, como já abordados, enquanto o

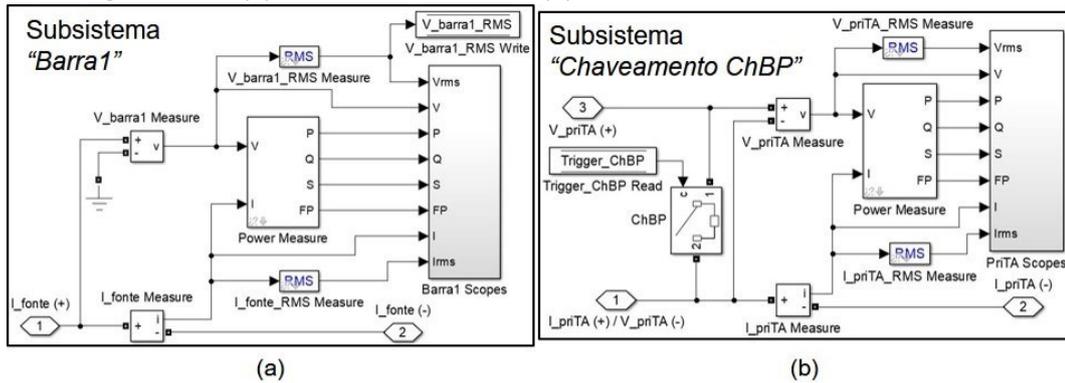
subsistema “Barra1” externa a variável “V\_barra1\_RMS” para que a mesma seja usada pelo sistema de controle.

Figura 3.14 - Sistema de potência monofásico do RET.



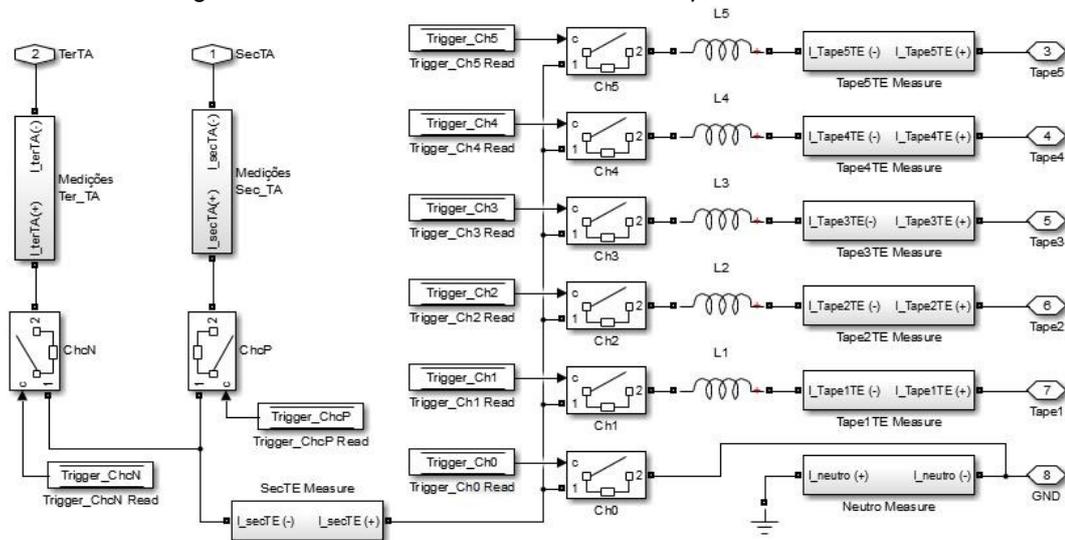
Na figura 3.15 estão mostrados os detalhes dos subsistemas “Barra1” e “Chaveamento ChBP”. Em seus interiores pode-se ver os sistemas destinados às medições de tensão na Barra1, corrente na fonte, tensão e corrente no enrolamento série do TA. Nestes subsistemas, além dos blocos “Voltage Measurement”, “Current Measurement” e “RMS”, também foi utilizada uma modificação do bloco “Power”, que pode ser encontrado no caminho **Simscape / SimPowerSystems / Specialized Technology / Control & Measurements / Measurements**. O bloco “Power”, renomeado como “Power Measure”, que convencionalmente fornece apenas os valores de potência ativa e reativa, foi modificado pelo autor para também fornecer os valores de potência aparente e fator de potência. Ainda se vê, no subsistema “Chaveamento ChBP” a presença da chave ChBP.

Figura 3.15 - (a) Subsistema “Barra1”, (b) Subsistema “Chaveamento ChBP”.



A seguir, na figura 3.16, está o interior do subsistema “Chaveamento Tapes e Polaridade”. Pode-se ver a presença das chaves de tape (*Ch0, Ch1, Ch2, Ch3, Ch4 e Ch5*) e de polaridade (*ChcP e ChcN*) que recebem os sinais de *trigger* do sistema de controle, assim como os reatores conectados em cada tape do Transformador de Excitação. Também há diversos blocos para medições iguais ao da figura 3.15(a).

Figura 3.16 - Subsistema “Chaveamento Tapes e Polaridade”.



Na figura 3.17 está detalhado o subsistema “Barra2”. Neste bloco há sistemas para medição da tensão na Barra2, e das correntes no enrolamento primário do TE e na carga. Nele também são calculadas as potências nestes trechos. Por último, a figura 3.18 traz o interior dos blocos “TA” e “TE” que contém, respectivamente, o Transformador de Acoplamento e o Transformador de Excitação.

Figura 3.17 - Subsistema "Barra2".

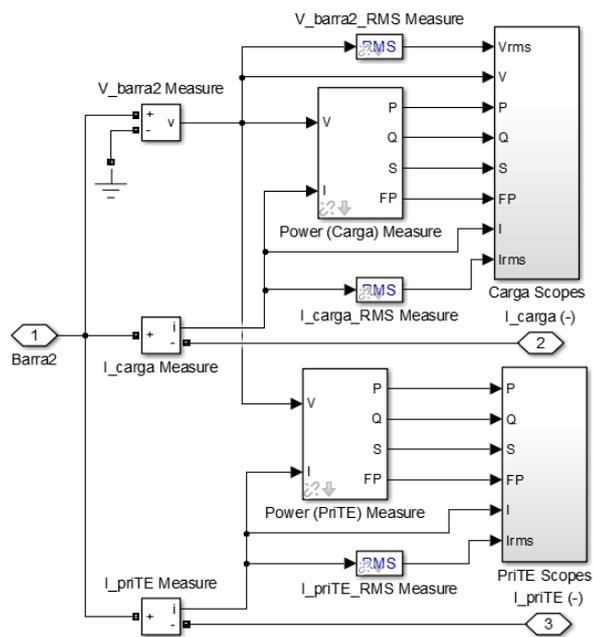
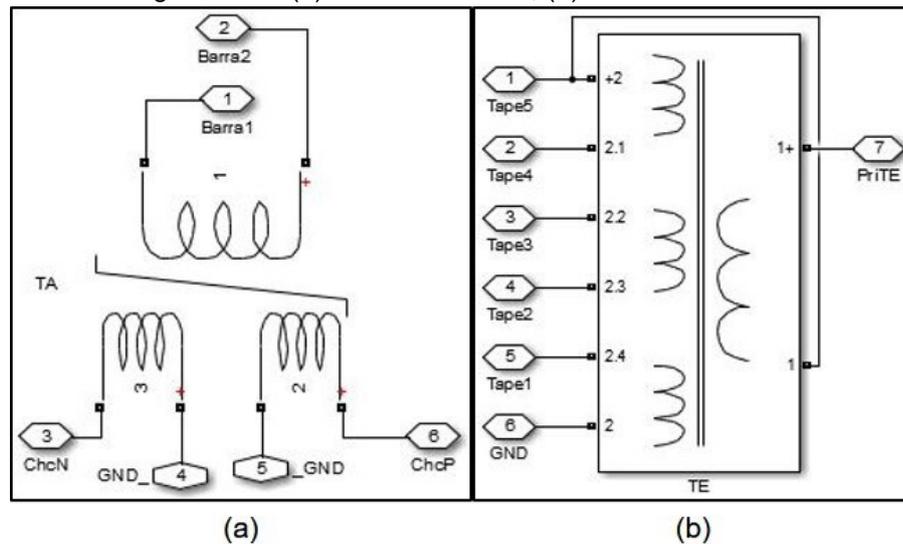
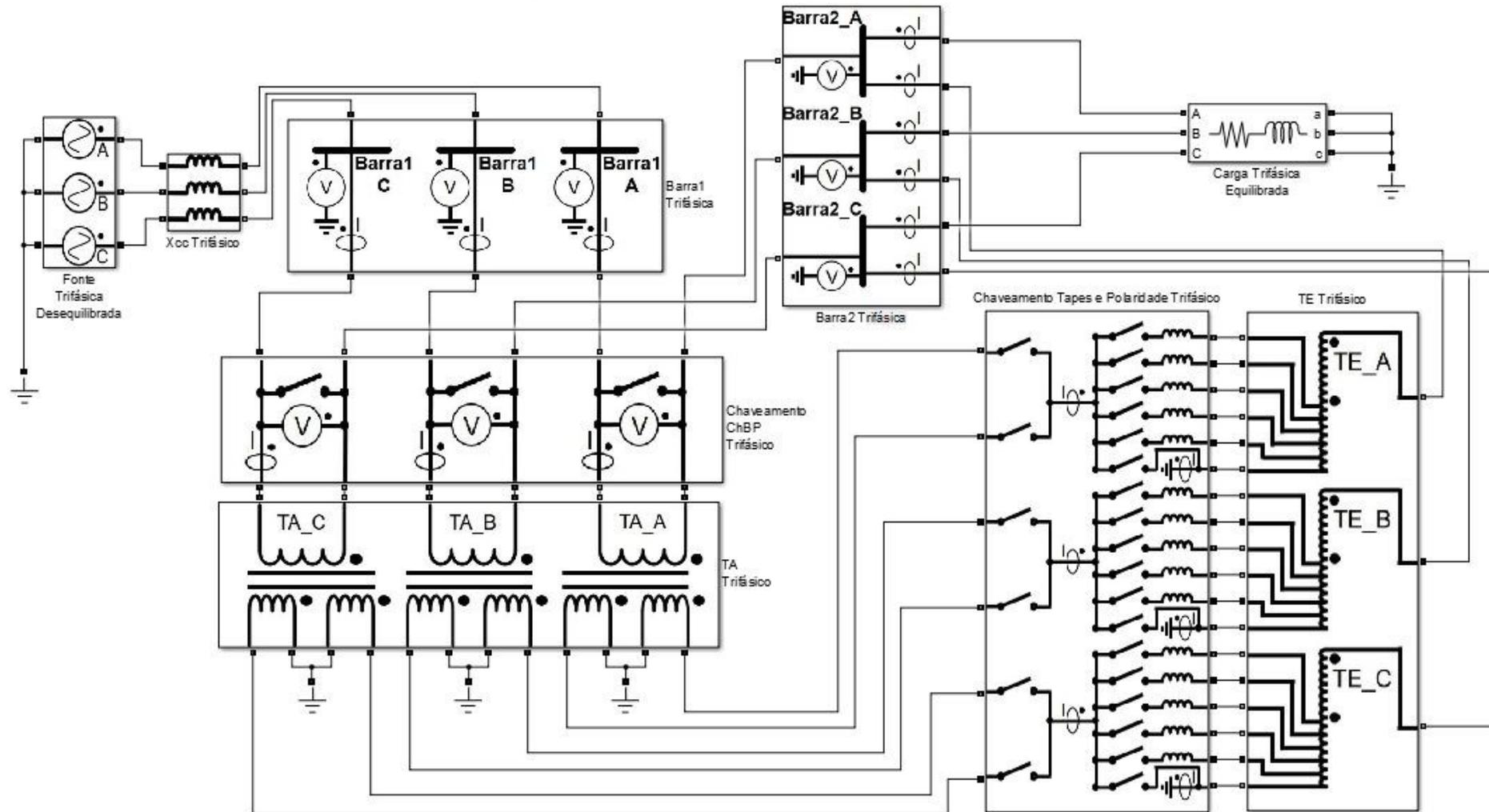


Figura 3.18 - (a) Subsistema "TA"; (b) Subsistema "TE".



A modelagem trifásica do sistema de potência foi concebida a partir da combinação de uma fonte e de uma carga trifásicas conectadas em estrela (Y) com três RETs monofásicos (sistema de potência e controle). A carga é considerada equilibrada e constante, enquanto a fonte é desequilibrada. É possível ver o sistema de potência trifásico na imagem 3.19.

Figura 3.19 - Sistema de potência trifásico do RET.

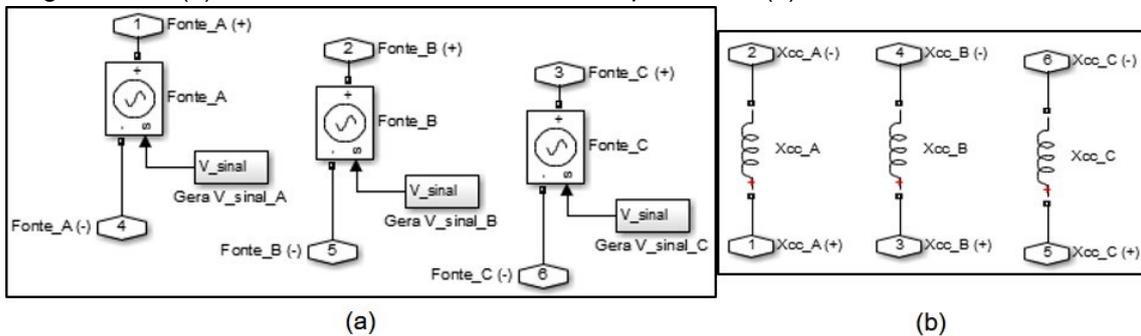


A modelagem trifásica foi feita basicamente triplicando o sistema monofásico, já abordado. Com exceção do bloco “*Carga Trifásica Equilibrada*”, todos os outros subsistemas da modelagem trifásica foram gerados estendendo seu respectivo subsistema monofásico para cada fase, não havendo, portanto, muita necessidade de elucidação destes blocos.

O interior do subsistema “*Fonte Trifásica Desequilibrada*” pode ser visto na figura 3.20(a). A fonte é considerada desequilibrada com relação aos valores dos módulos das tensões trifásicas ajustados pelos blocos “*Gera V\_sinal*”, mas possuindo, todavia, a defasagem angular equilibrada ( $120^\circ$ ). A sequência de fase é ABC. Esse sistema foi implementado para verificar o comportamento do RET perante desequilíbrios na rede.

Já na figura 3.20(b) pode ser visto o interior do bloco “*Xcc Trifásico*”, onde estão alocadas as reatâncias equivalentes por fase do sistema a montante.

Figura 3.20 - (a) Subsistema “*Fonte Trifásica Desequilibrada*”; (b) Subsistema “*Xcc Trifásico*”.



Tanto a fonte quanto a carga são ligadas em estrela (Y) e têm seus neutros aterrados. O Transformador de Excitação e o Transformador de Acoplamento também foram compostos por três unidades monofásicas do TE e do TA já abordados, como pode ser visto nas figuras 3.21 e 3.22.

Figura 3.21 - Subsistema "TE Trifásico".

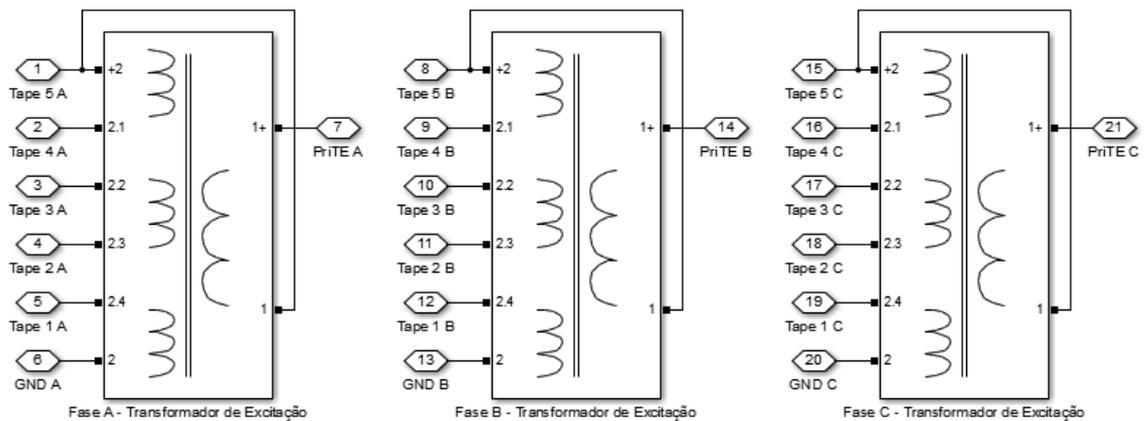
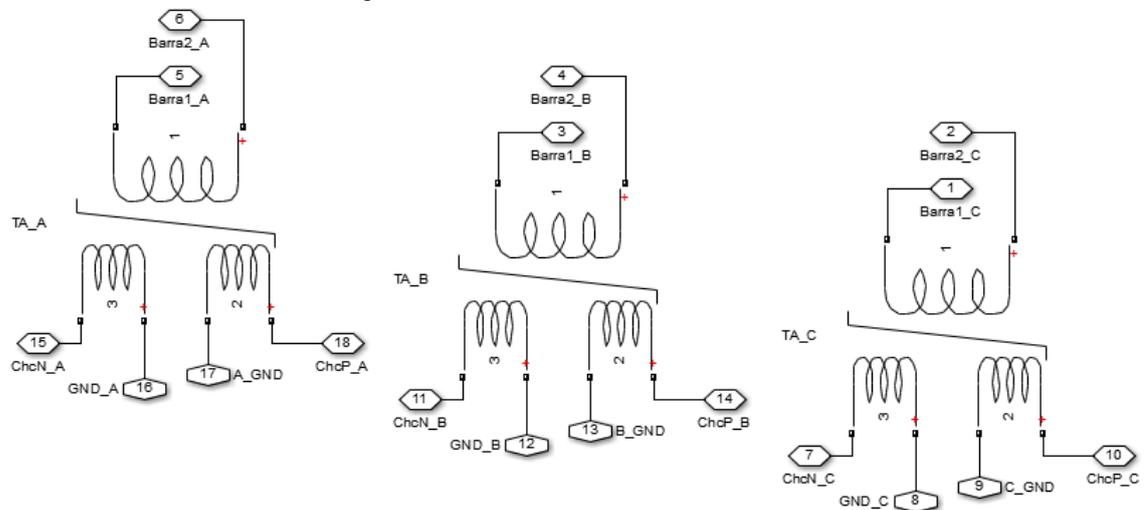


Figura 3.22 - Subsistema "TA Trifásico".



O sistema de controle foi feito de forma monofásica e independente por cada fase, de forma que o RET possa regular, por exemplo, uma sobretensão na fase A e uma subtensão na fase B de forma simultânea. Esse sistema recebe o valor eficaz da tensão de fase na Barra 1 das três fases para determinação da faixa de operação necessária (FON) para cada fase independentemente.

## 4 ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO

### 4.1 Considerações iniciais

Tendo o modelo computacional do RET no software *Simulink* já concebido e detalhado, nesse capítulo serão realizadas simulações do regulador em conjunto com a rede elétrica de conexão com o intuito de avaliar o desempenho do dispositivo frente à distintos eventos de variação de tensão. O foco das análises ora tratadas são os fenômenos de longa duração, desta forma, na primeira parte deste capítulo são realizados estudos com o objetivo de verificar o comportamento do regulador diante de distintos eventos de sobretensão e subtensão da fonte de suprimento. Nessa primeira análise o sistema elétrico e o RET utilizado na simulação está em seu formato monofásico e, além de apontar os resultados das tensões, também serão avaliados os níveis de corrente e potência em cada parte do circuito considerado.

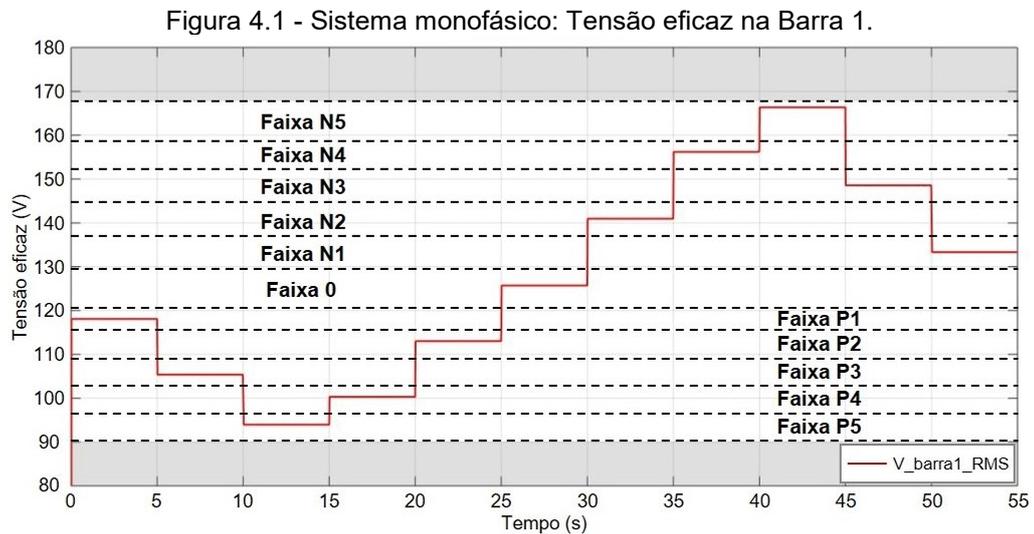
Em um segundo momento será avaliado o modelo do RET trifásico, assim, variações de tensão serão aplicadas na fonte para avaliações do desempenho do equipamento. Para esse caso, a sequência de eventos de variação de tensão foi aplicada em cada fase de forma separada, tornando possível verificar o controle individual do RET por fase. Além disso, também será avaliado o efeito da operação do regulador no indicador de desequilíbrio.

### 4.2 Desempenho da modelagem monofásica do sistema

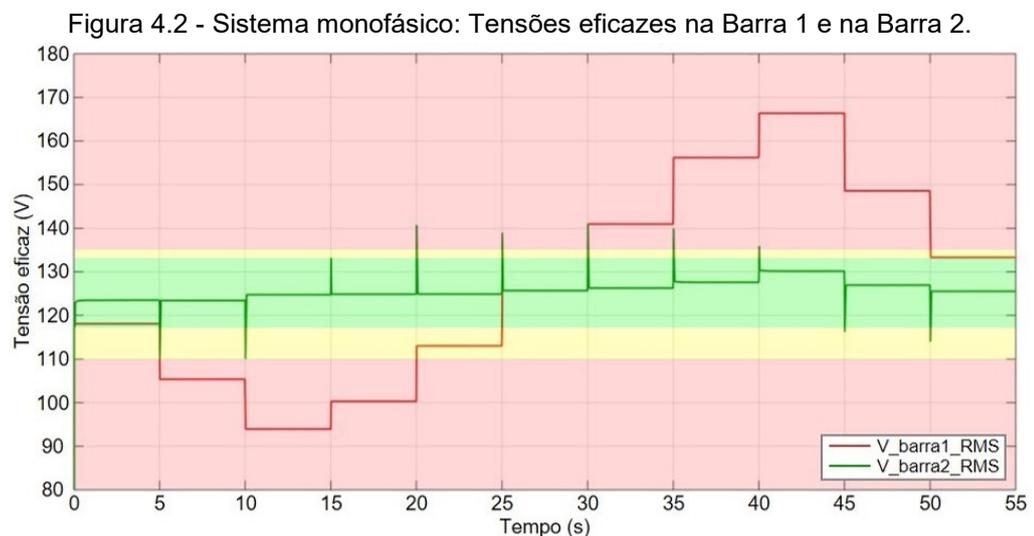
Nessa seção será avaliado o desempenho da modelagem monofásica do sistema diante de condições de subtensão e sobretensão em diferentes níveis afim de se testar todas as faixas de operação programadas. Para isso, foi ajustado no bloco “Gera V\_sinal” uma série de degraus hipotéticos de variação de tensão.

Ao todo foram definidos 11 intervalos de 5 segundos cada, totalizando num tempo total de simulação de 55 segundos. Vale ressaltar que os valores das tensões eficazes geradas pela fonte sofrem pequenas quedas devido à impedância de curto-circuito do sistema, ou seja, as tensões na Barra 1 (barramento a montante do RET) serão ligeiramente menores do que as tensões ajustadas em “Gera V\_sinal”. O passo de simulação utilizado foi de 50 microssegundos (0,000050s).

Na figura 4.1 pode-se ver o comportamento da tensão na Barra 1 no decorrer dos 55 segundos. Pode-se ver também que os valores de cada intervalo estão dentro de uma certa faixa de operação diferente, já que o objetivo aqui é testar todas as faixas de operação do sistema.



Já a figura 4.2 ilustra a tensão eficaz na Barra 1 e na Barra2 (barra da carga). Pode-se ver a eficácia do processo de regulação de tensão proposto.



Na figura acima pode-se observar também a faixa verde e as faixas amarelas e vermelhas representando, respectivamente, as classificações Adequada, Precária e Crítica para a tensão em regime permanente, segundo os valores do PRODIST para pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (220/127V). Os valores de tensão que delimitam essas faixas de classificação podem ser vistos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Limites das faixas “Adequada”, “Precária” e “Crítica” para pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127) segundo o PRODIST.

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL)	
	127V	220V
Adequada	$117V \leq TL \leq 133V$	$202V \leq TL \leq 231V$
Precária	$110V \leq TL < 117V$	$191V \leq TL < 202V$
	$133V < TL \leq 135V$	$231V < TL \leq 233V$
Crítica	$TL < 110V$	$TL < 191V$
	$TL > 135V$	$TL > 233V$

Na tabela 4.2 estão listados os correspondentes valores eficazes de tensão para cada intervalo de tempo. Os valores de tensão adequados, precários e críticos também estão destacados em verde, amarelo e vermelho, respectivamente. Foram desconsiderados os picos transitórios vistos na tensão da Barra 2 (figura anterior), sendo considerados somente os valores de regime permanente. Pode-se observar que todos os valores de tensão na Barra 2 se enquadram na classificação “Adequada”, evidenciando que os níveis de regulação atingidos se mostram satisfatórios. Além do mais, também estão indicados na tabela os desvios de tensão em relação ao valor nominal do sistema (127V).

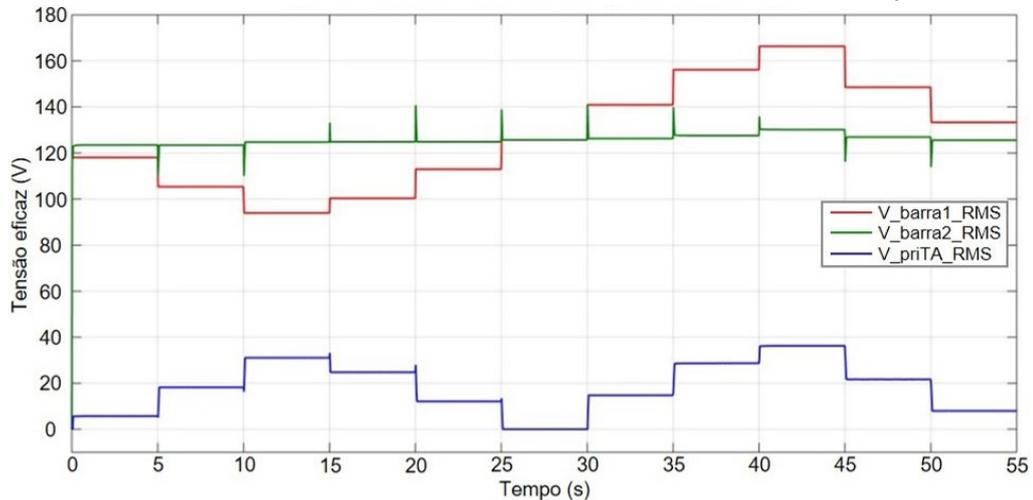
Tabela 4.2 - Sistema monofásico: Valores de tensão eficaz na Barra 1 e na Barra 2 para cada intervalo de tempo.

Intervalo	Barra 1		Barra 2	
	Tensão (V)	$\Delta V$ (%)	Tensão (V)	$\Delta V$ (%)
0s < t ≤ 5s	118,10	-7,008	123,50	-2,756
5s < t ≤ 10s	105,40	-17,008	123,40	-2,835
10s < t ≤ 15s	93,95	-26,024	124,80	-1,732
15s < t ≤ 20s	100,30	-21,024	124,90	-1,654
20s < t ≤ 25s	113,00	-11,024	124,90	-1,654
25s < t ≤ 30s	125,70	-1,024	125,70	-1,024
30s < t ≤ 35s	140,90	10,945	126,30	-0,551
35s < t ≤ 40s	156,20	22,992	127,60	0,472
40s < t ≤ 45s	166,40	31,024	130,10	2,441
45s < t ≤ 50s	148,60	17,008	127,00	0,000
50s < t ≤ 55s	133,30	4,961	125,50	-1,181

Além das tensões eficazes na Barra1 e na Barra2, a figura 4.3 traz a tensão eficaz no enrolamento primário do TA. Tensão esta que é inserida em série na linha de alimentação. Se tratando de um gráfico de tensão eficaz (magnitude), todos os valores são positivos. Entretanto, é importante lembrar que, na compensação

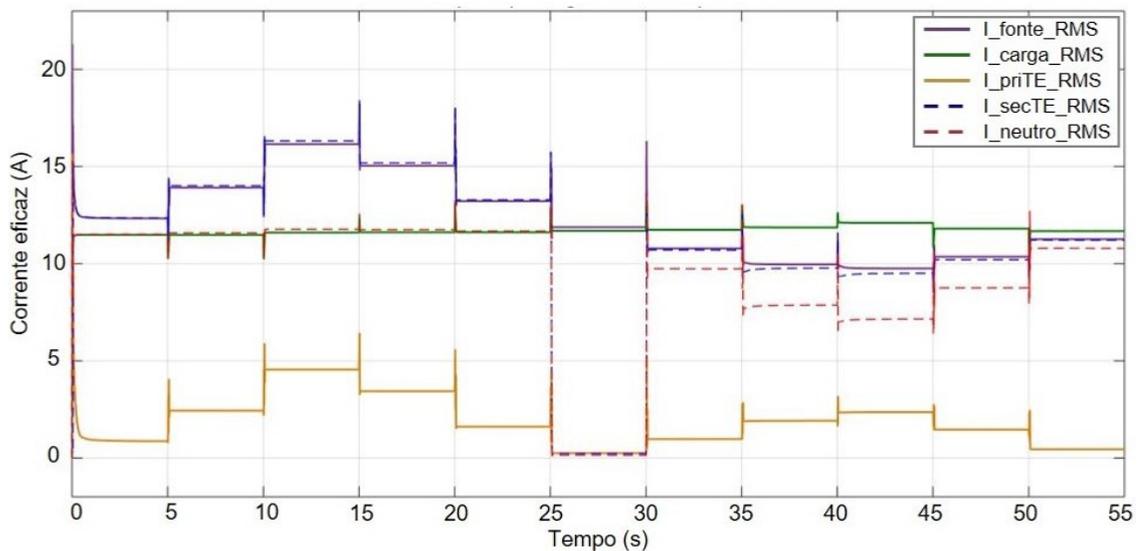
negativa, a tensão no enrolamento série tem sua polaridade trocada (defasamento de  $180^\circ$ ).

Figura 4.3 - Sistema monofásico: Tensões eficazes na Barra1, na Barra2 e no primário do TA.



Na figura 4.4 estão os valores eficazes da corrente na fonte, na carga, no primário (lado de alta tensão), secundário (lado de baixa tensão) e neutro do TE.

Figura 4.4 - Sistema monofásico: Correntes eficazes na fonte, na carga e no TE.

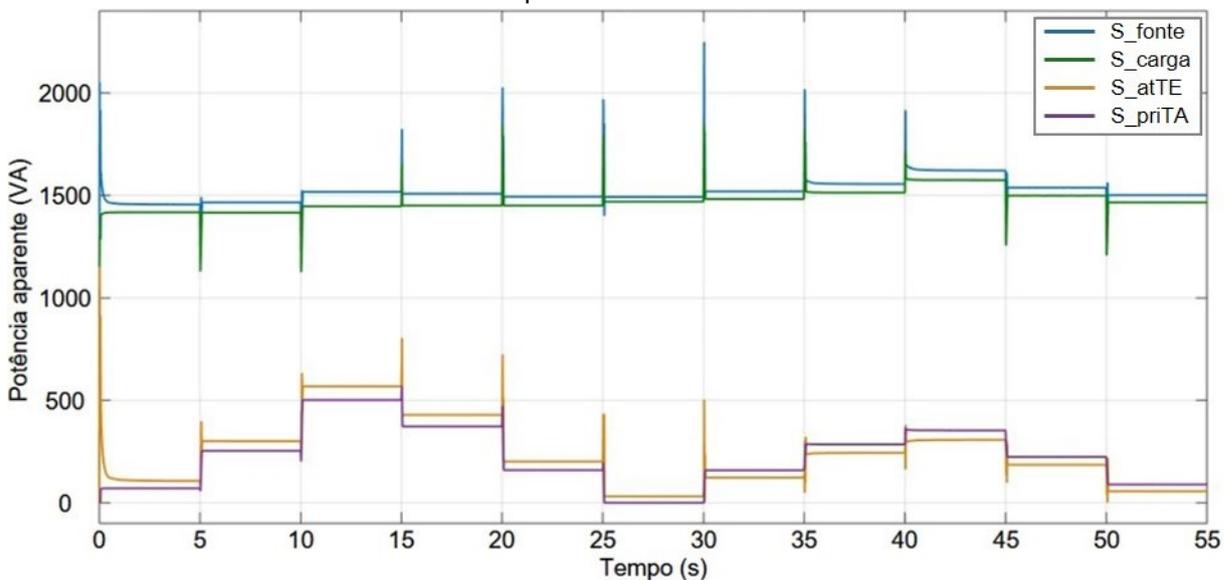


Pode-se ver as potências aparentes drenada da fonte, requerida pela carga, presentes no lado de alta do TE e no enrolamento primário do TA na figura 4.5. Os valores destas duas últimas potências são bem próximos e estão relacionadas com a potência requerida para o funcionamento do RET. Entretanto, uma delas leva em consideração as perdas envolvidas no processo de compensação (perdas no reator de

comutação, nas chaves e nas impedâncias dos transformadores) enquanto a outra não leva em conta nenhuma perda, por isso há uma pequena diferença entre elas.

No modo de compensação positiva a potência flui do TE em direção ao TA, então a potência no lado de alta tensão do TE ( $S_{atTE}$ ) leva em conta todas as perdas e, por isso, é maior do que no enrolamento série ( $S_{priTA}$ ), que não leva em conta nenhuma perda. Porém, no modo de compensação negativa o fluxo de potência se inverte, então  $S_{priTA}$  passa a ser maior que  $S_{atTE}$ .

Figura 4.5 - Sistema monofásico: Potências aparentes na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA.



Considerando  $S_{atTE}$  e  $S_{priTA}$  como sendo a potência requerida para o funcionamento do RET nas condições de regulador de subtensões e sobretensões, respectivamente, pode-se ver na tabela 4.3 os valores da potência aparente drenada pela carga e a potência requerida pelo RET para cada intervalo de teste.

Tabela 4.3 - Sistema monofásico: Valores da potência aparente drenada pela carga e a potência requerida pelo RET para cada intervalo de teste.

Intervalo	$S_{carga}$ (VA)	$S_{RET}$ (VA)	$S_{RET}/S_{carga}$ (%)
0s < t ≤ 5s	1418,00	107,00	7,55
5s < t ≤ 10s	1417,00	300,90	21,24
10s < t ≤ 15s	1447,00	568,20	39,27
15s < t ≤ 20s	1450,00	429,50	29,62
20s < t ≤ 25s	1451,00	201,60	13,89
25s < t ≤ 30s	1469,00	31,09	2,12
30s < t ≤ 35s	1483,00	159,10	10,73
35s < t ≤ 40s	1514,00	285,50	18,86
40s < t ≤ 45s	1575,00	353,50	22,44

Intervalo	S_carga (VA)	S_RET (VA)	S_RET/S_carga (%)
45s < t ≤ 50s	1499,00	224,40	14,97
50s < t ≤ 55s	1466,00	89,46	6,10

De posse dos valores listados na tabela acima, é possível constatar que o caso de maior exigência de potência do RET foi com a compensação positiva com o Tape5 (FaixaP5). Todavia, pode-se ver que essa potência requerida foi menor do que 40% da potência fornecida à carga. A compensação positiva com o Tape4 (FaixaP4) foi ligeiramente menor que 30% da potência drenada pela carga e com o Tape3 (FaixaP3), pouco maior que 20%. Já para a compensação negativa (sobretensões), a maior exigência de potência pelo RET foi com o Tape5 (FaixaN5) e foi pouco maior do que 20% da potência da carga.

A razão para a potência requerida pelo RET ser menor do que a potência drenada pela carga foi mostrada matematicamente no capítulo 2. Isso se justifica pelo fato de o RET não estar alimentando diretamente a carga, diferentemente de alguns reguladores eletromagnéticos citados no capítulo 1 deste trabalho. Por último, nas figuras 4.6 e 4.7 estão as potências ativas e reativas, respectivamente, nos mesmos trechos referidos na figura 4.5.

Figura 4.6 - Sistema monofásico: Potências ativas na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA.

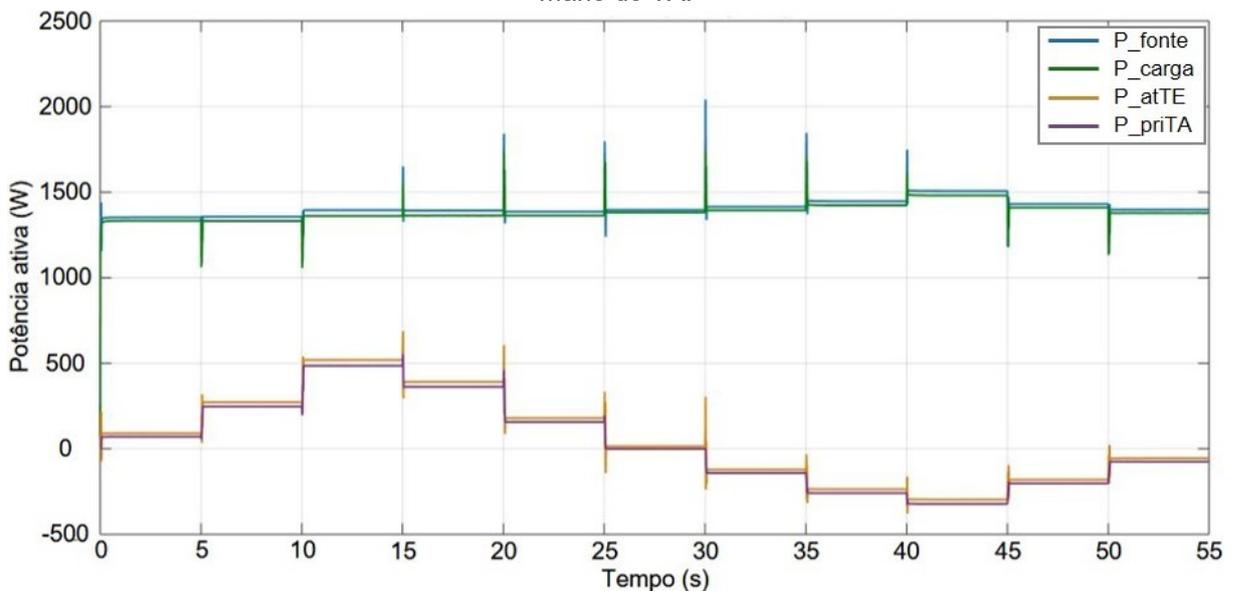
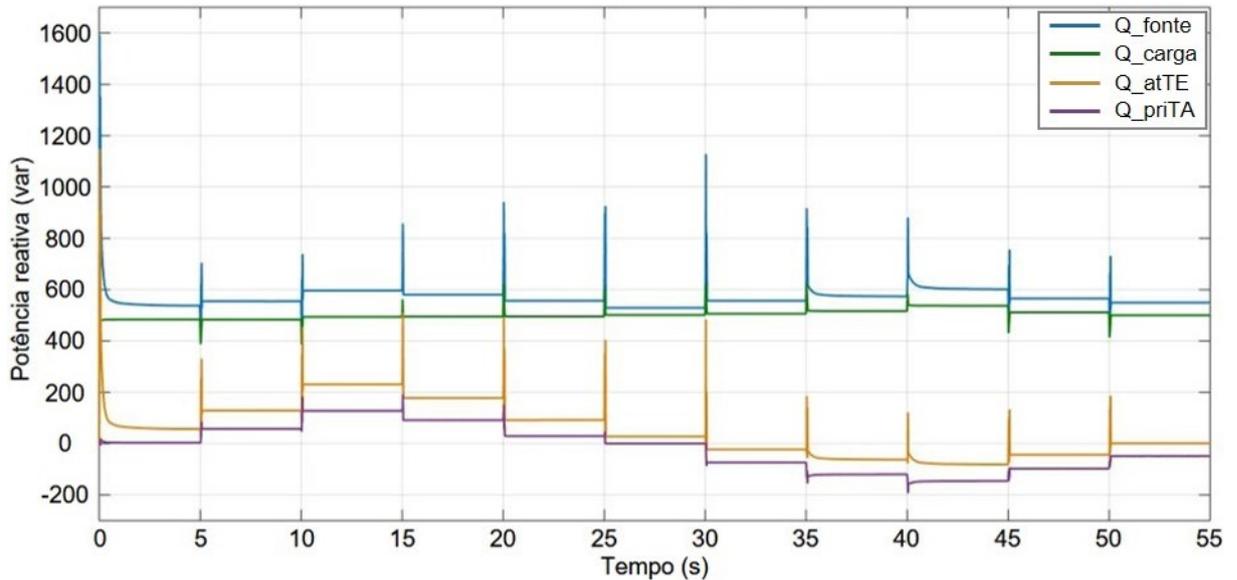
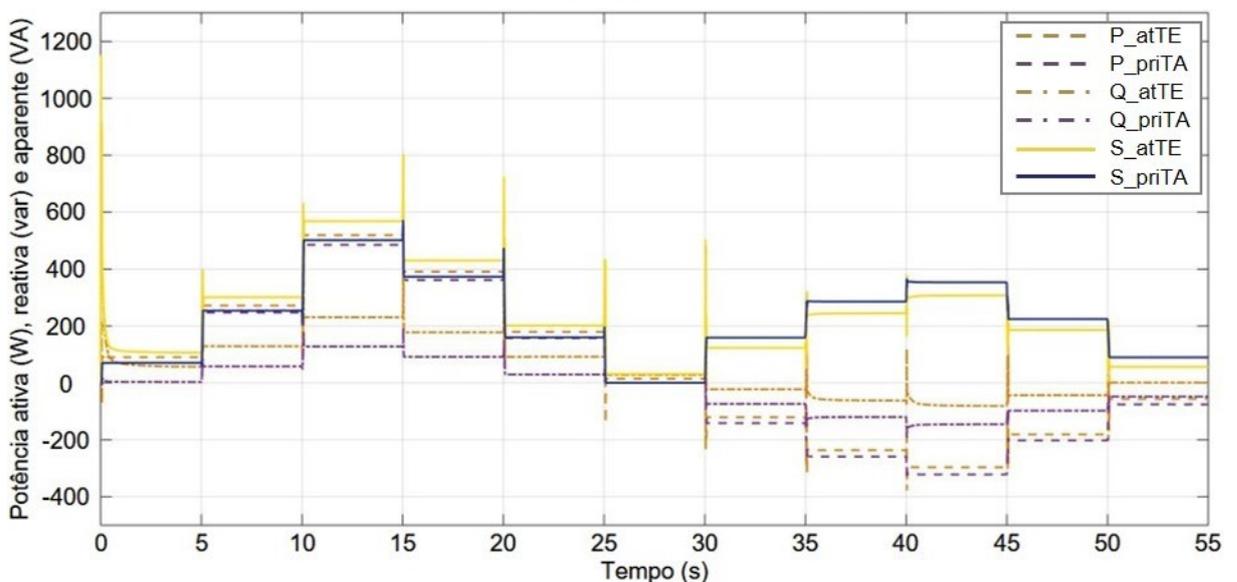


Figura 4.7 - Sistema monofásico: Potências reativas na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA.



A figura 4.8 traz novamente as potências no lado de alta do primário do Transformador de Excitação e no primário do Transformador de Acoplamento. É possível ver que as potências ativas e reativas trocam de sentido dependendo se a operação do RET é de regulação de subtensões ou de sobretensões. Isso se dá pela alteração de sentido da tensão no primário do TA e da corrente no primário do TE, dependendo do modo de operação.

Figura 4.8 - Sistema monofásico: Potências ativa, reativa e aparente no lado de alta do TE e no primário do TA.



### 4.3 Desempenho da modelagem trifásica do sistema

Tendo já sido feita a modelagem e simulação monofásica do RET, e sendo satisfatórios os resultados obtidos, nessa seção será avaliado o desempenho da modelagem trifásica do sistema para fins de mitigação dos fenômenos de variações e de desequilíbrio de tensões.

De forma análoga à simulação monofásica, degraus hipotéticos de variação de tensão foram ajustados nos três blocos “Gera V\_sinal”. Para cada fase do sistema foi gerada uma sequência distinta de eventos de variação de tensão, conseqüentemente, foi verificada a presença de desequilíbrios na rede. Durante todo o tempo de simulação, os ângulos de tensão da fonte nas três fases foram mantidos em  $0^\circ$  na fase A,  $-120^\circ$  na fase B e  $120^\circ$  na fase C. O tempo total de simulação é de 150 segundos, com os degraus de variação da tensão com duração de 15 segundos na fase A, 25 segundos na fase B e 20 segundos na fase C. O passo de simulação utilizado na simulação foi de 100 microssegundos (0,000100s).

A figuras 4.9 e 4.10 trazem respectivamente as tensões de fase (A, B e C) e de linha (AB, BC e CA) na Barra 1 e na Barra 2, mostrando mais uma vez a eficiência da regulação. As faixas verde, amarelas e vermelhas representam, respectivamente, as zonas de tensão adequada, precária e crítica.

Figura 4.9 - Sistema trifásico: Tensões de fase na Barra 1 e na Barra 2 na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).

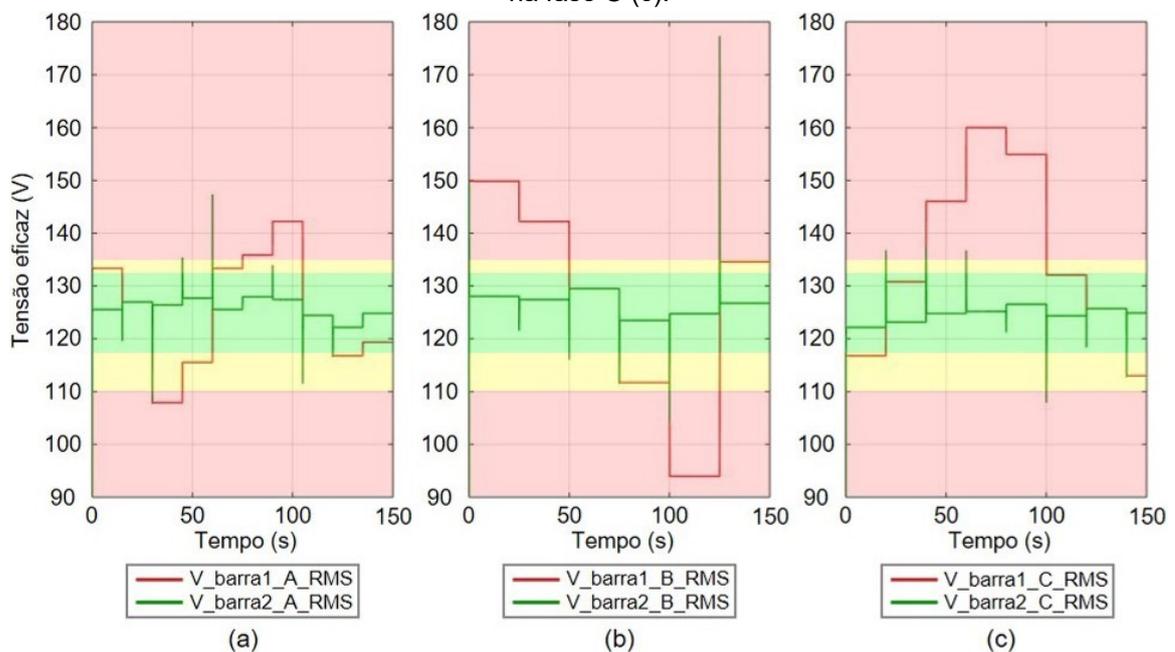
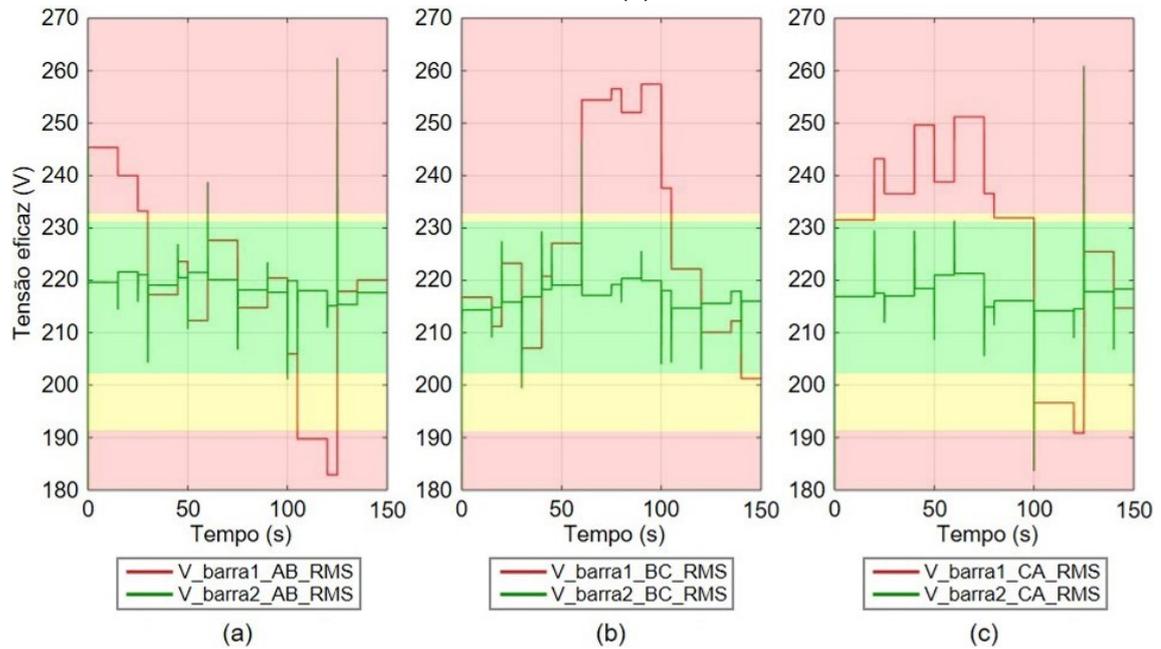


Figura 4.10 - Sistema trifásico: Tensões de linha na Barra 1 e na Barra 2 entre AB (a), entre BC (b) e entre CA (a).



As tabelas 4.4 e 4.5 trazem os valores eficazes das tensões de fase e de linha nas Barras 1 e 2.

Tabela 4.4 - Sistema trifásico: Valores das tensões de fase na Barra 1 e na Barra 2.

Fase A				Fase B				Fase C			
Intervalo (s)		Vbarra1	Vbarra2	Intervalo (s)		Vbarra1	Vbarra2	Intervalo (s)		Vbarra1	Vbarra2
Início	Fim	(V)	(V)	Início	Fim	(V)	(V)	Início	Fim	(V)	(V)
0	15	133,3	125,5	0	25	149,8	128,0	0	20	116,8	122,2
15	30	127,0	127,0					20	40	130,8	123,2
30	45	107,9	126,4	25	50	142,2	127,4	40	60	146,0	124,8
45	60	115,5	127,7					60	80	160,0	125,2
60	75	133,3	125,5	50	75	129,5	129,5	80	100	154,9	126,5
75	90	135,9	127,9					100	120	132,1	124,3
90	105	142,2	127,4	75	100	111,7	123,5	120	140	125,7	125,7
105	120	124,4	124,4					140	150	113,0	124,9
120	135	116,8	122,2	100	125	93,95	124,8	150			
135	150	119,4	124,8					125	150	134,6	126,7

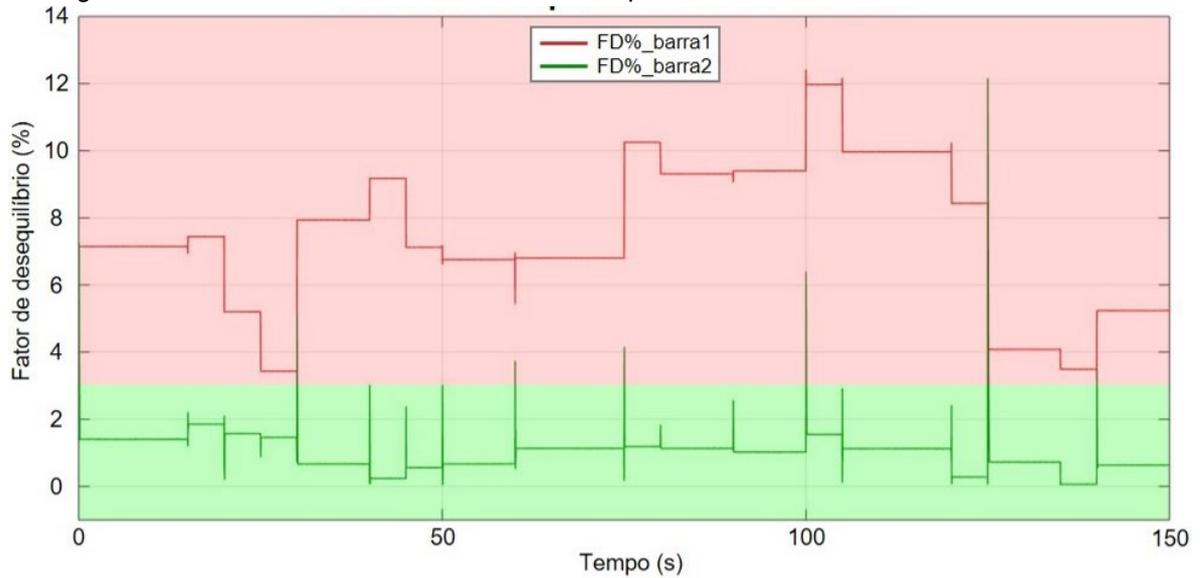
Tabela 4.5 - Sistema trifásico: Valores das tensões de linha na Barra 1 e na Barra 2.

Linha AB				Linha BC				Linha CA			
Intervalo (s)		Vbarra1	Vbarra2	Intervalo (s)		Vbarra1	Vbarra2	Intervalo (s)		Vbarra1	Vbarra2
Início	Fim	(V)	(V)	Início	Fim	(V)	(V)	Início	Fim	(V)	(V)
0	15	245,4	219,6	0	15	216,8	214,4	0	20	231,5	216,9
15	25	240,0	221,6	15	20	211,2	214,8	20	25	243,2	217,6
25	30	233,2	221,1	20	30	223,2	215,9	25	40	236,5	217,0
30	45	217,3	219,1	30	40	207,1	216,8	40	50	249,6	218,4
45	50	223,6	220,5	40	45	220,8	218,3	50	60	238,8	221,0
50	60	212,3	221,5	45	60	227,1	219,1	60	75	251,2	221,3
60	75	227,7	220,1	60	75	254,4	217,1	75	80	236,6	214,9
75	90	214,8	218,2	75	80	256,5	219,2	80	100	231,9	216,1
90	100	220,5	217,7	80	90	252,0	220,4	90	100	257,4	219,9
100	105	206,0	219,9	90	100	257,4	219,9	100	105	237,6	218,0
105	120	189,8	218,0	100	105	237,6	218,0	100	120	196,6	214,2
120	125	182,9	215,2	105	120	222,2	214,7	120	125	190,9	214,6
125	135	217,9	215,4	120	135	210,1	215,6	125	140	225,5	217,8
135	150	220,1	217,7	135	140	212,3	217,9	140	150	214,7	218,4
				140	150	201,3	216,0				

Observa-se também o bom desempenho do RET para a modelagem trifásica, partindo do ponto de que todos os valores de tensão se encontram dentro da faixa adequada. Na figura 4.11 estão expostos graficamente, ao longo do tempo, os valores dos fatores de desequilíbrio na Barra 1 e na Barra 2 acompanhados de faixas verde e vermelha representando os valores que estão de acordo e que estão fora dos limites do PRODIST, respectivamente.

Como já foi mencionado no capítulo 1, os valores limites que o PRODIST define para o fator de desequilíbrio de tensão é de 2,0% para sistemas com tensão nominal entre 1kV e 230kV e de 3,0% para sistemas com tensão nominal inferior a 1kV. Assim sendo, pode-se observar que todos os valores de fator de desequilíbrio na Barra 1 se encontram acima do limite estabelecido pelo PRODIST, enquanto, na Barra 2, todos os valores de fator de desequilíbrio estão adequados.

Figura 4.11 - Sistema trifásico: Fatores de desequilíbrio das tensões na Barra1 e na Barra2.



Analisando os dados expostos, verifica-se que, assim como regulador de tensão, o RET trifásico, por consequência, é capaz de reduzir o desequilíbrio das tensões trifásicas nas condições estabelecidas.

As figuras 4.12 e 4.13 trazem os valores das correntes eficazes fornecida pela fonte, drenadas pela carga, circulantes no enrolamento primário, no neutro e no lado secundário do Transformador de Excitação, nas três fases.

Figura 4.12 - Sistema trifásico: Correntes eficazes na fonte, na carga e no primário do TE na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).

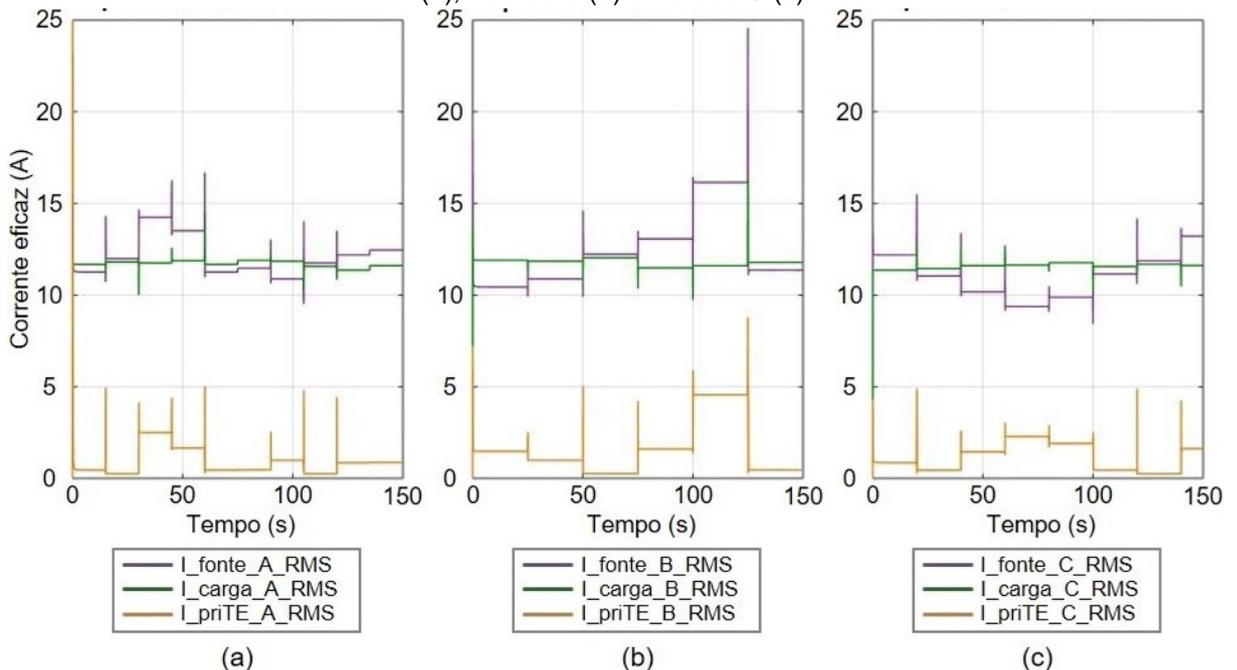
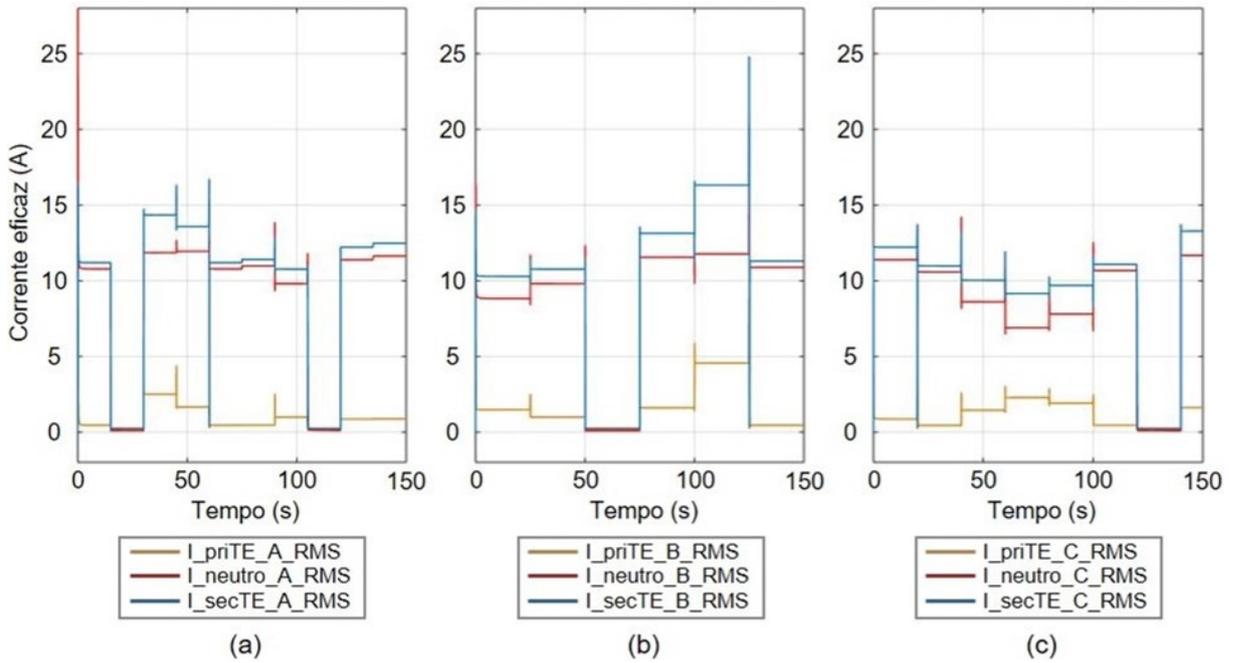


Figura 4.13 - Sistema trifásico: Correntes eficazes no primário, no neutro e no secundário do TE na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).



As figuras a seguir (4.14, 4.15 e 4.16) trazem as potências aparentes, ativas e reativas fornecidas pela fonte, absorvidas pela carga e requeridas pelo RET. Observando as grandezas elétricas de corrente e potência, é possível notar uma semelhança de comportamento em relação ao modelo monofásico.

Figura 4.14 - Sistema trifásico: Potências aparentes na fonte, na carga, no lado de alta do TE e no primário do TA na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).

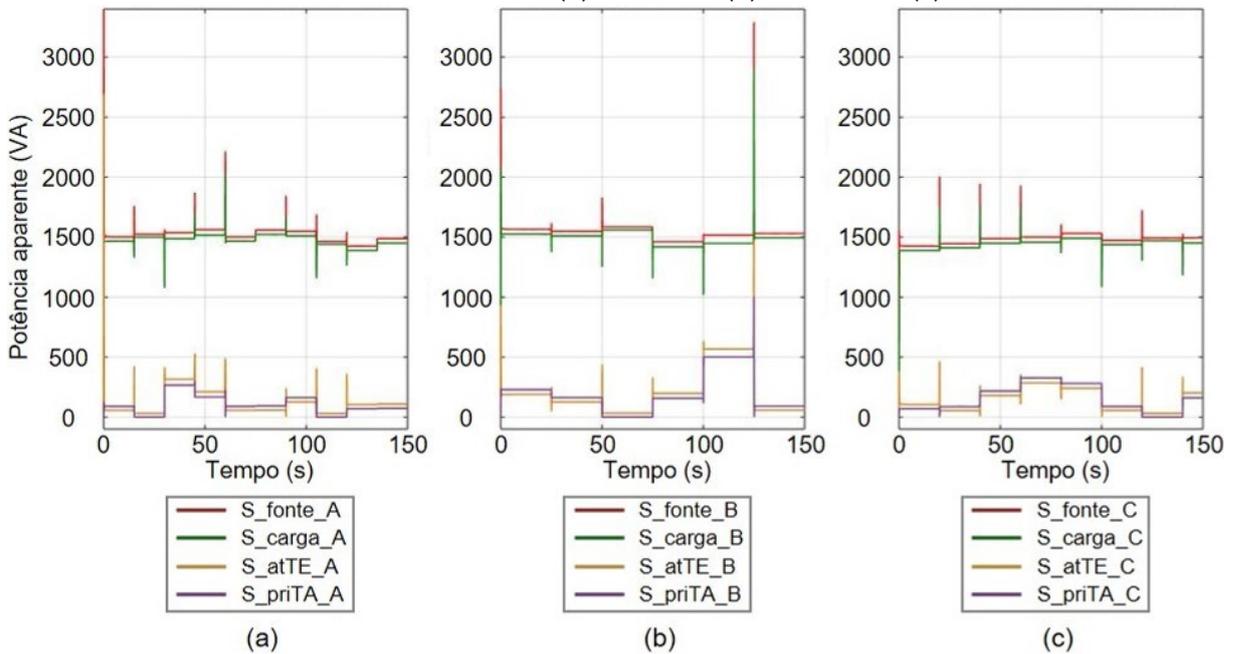


Figura 4.15 - Sistema trifásico: Potências ativa e reativa na fonte e na carga na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).

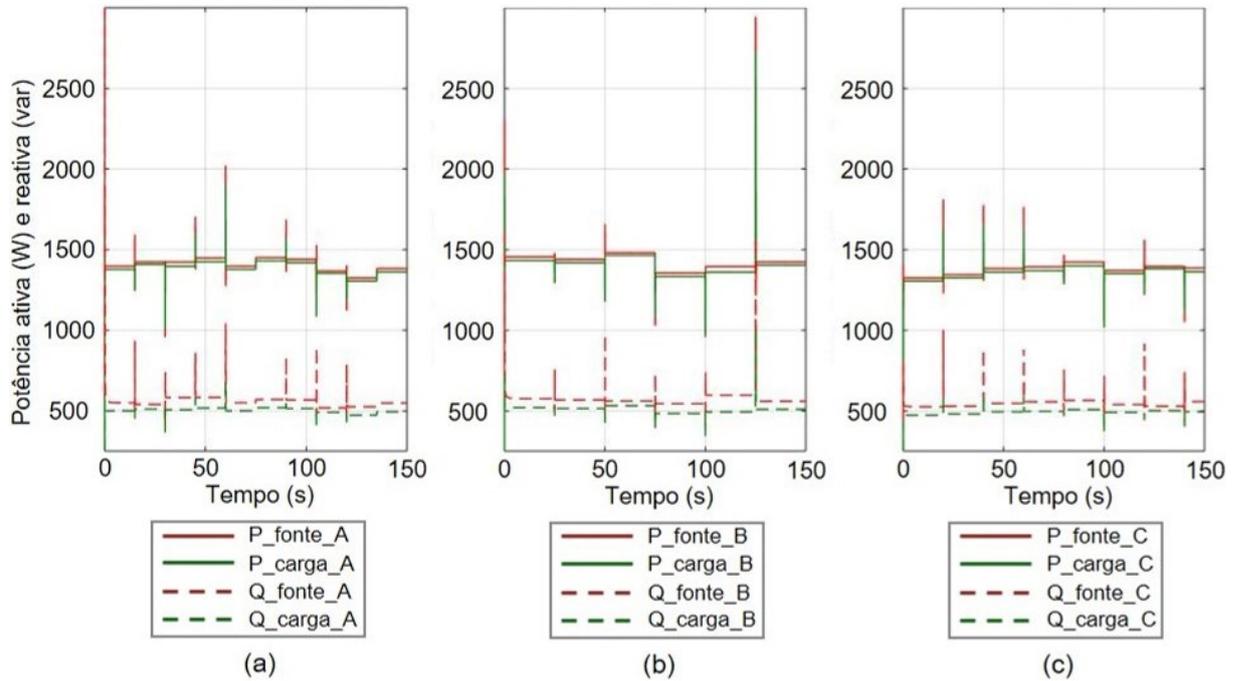
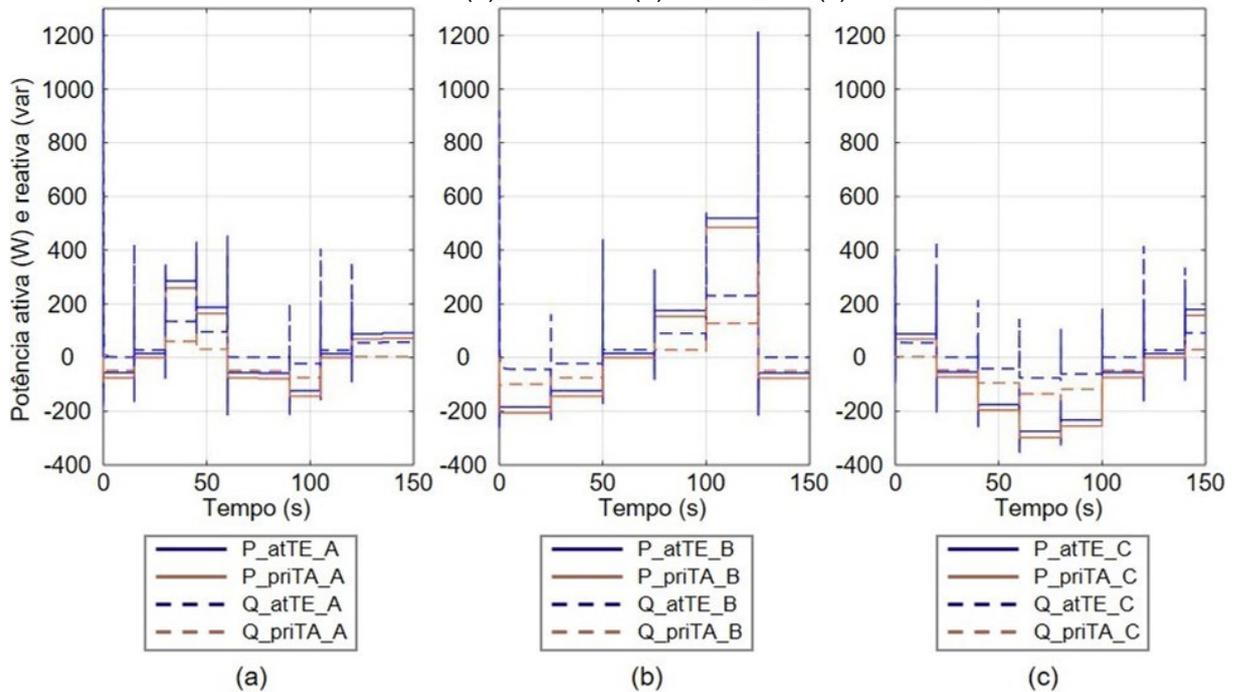


Figura 4.16 - Sistema trifásico: Potências ativa e reativa no lado de alta do TE e no primário do TA na fase A (a), na fase B (b) e na fase C (c).



## 5 CONCLUSÕES

O objetivo deste último capítulo é discorrer de forma resumida sobre as comprovações e resultados obtidos ao decorrer do processo de redação do presente trabalho de conclusão de curso, de forma a propiciar uma perspectiva mais ampla e concisa das atividades aqui desempenhadas.

Inicialmente, foram expostos alguns conceitos e adversidades atrelados à área da qualidade da energia elétrica. Estes problemas se referem à indispensabilidade da adequação das tensões nas redes para que haja conformidade com as imposições das agências reguladoras no que tange às variações e ao desequilíbrio de tensões.

Ainda no primeiro capítulo, foram abordados os mais diversos equipamentos disponíveis comercialmente com o propósito de regulação dinâmica de tensões. Foram apresentadas também as particularidades, os princípios operacionais e as aplicações destas tecnologias. Tais conhecimentos compuseram o cerne de trabalhos como [11], [14] e [15] que, por suas vezes, foram as bases do presente trabalho.

O foco de estudo dos trabalhos supracitados é um equipamento denominado regulador eletromagnético de tensão (RET), cujos componentes de potência são baseados em tecnologias totalmente eletromagnéticas. É dada maior atenção a essa topologia pela maior simplicidade construtiva e operacional, facilidade de implementação do controle, confiabilidade, menores custos e baixa demanda de manutenção. É necessário ratificar que a tecnologia abordada tem por finalidade a regulação exclusiva da magnitude (módulo) das tensões, não havendo controle para regulação do ângulo de fase.

O segundo capítulo trouxe a explicação da estrutura física do regulador, sendo detalhada a função de cada elemento que compõe o equipamento. Além de trazer os conceitos referentes ao sistema de potência, também foi apresentada a lógica de controle do RET para acionamento das chaves dos tapes e de polaridade.

Ainda foram descritos os equacionamentos referentes às principais grandezas elétricas envolvidas no processo de regulação do RET, quando o mesmo opera como regulador e abaixador de tensão. As formulações desenvolvidas foram baseadas em

[14]. Estas análises puderam relacionar a tensão de compensação com a relação de transformação do autotransformador e com as impedâncias dos transformadores (TE e TA), da carga e dos elementos presentes na malha de compensação (reator e chaves). A modelagem no domínio da frequência também foi capaz de mostrar que a potência demandada pelo regulador para restaurar a tensão aos padrões aceitáveis é substancialmente inferior à potência drenada pela carga, destoando dos reguladores comerciais abordados no capítulo 1.

No capítulo 3 foi apresentada uma modelagem computacional do regulador conectado em um alimentador radial, para isso utilizou-se o software Simulink. Assim, primeiramente foi feita uma breve introdução da plataforma utilizada e foram elucidadas algumas das suas bibliotecas, como a *SimPowerSystems* e a *Math Operations*, bem como os blocos mais importantes utilizados em todo o sistema.

No que diz respeito à implementação computacional, começou-se com a abordagem das unidades eletromagnéticas de potência, expondo os blocos usados para representar o Transformador de Excitação (*Multi-Winding Transformer*) e o Transformador de Acoplamento (*Saturable Transformer*). Para fins de explicação, foram mostrados os circuitos equivalentes destes blocos com suas resistências de enrolamento, indutâncias de dispersão e ramos shunt (características de saturação e resistência que representa as perdas no núcleo). Também foram exibidas suas janelas de parametrização e os dados inseridos.

Seguindo com a análise de outros elementos constituintes do sistema de potência, foi abordado o bloco usado para representar as chaves mecânicas (*Breaker*) conectadas aos tapes do Transformador de Excitação (*Ch0*, *Ch1*, *Ch2*, *Ch3*, *Ch4* e *Ch5*) e aos enrolamentos do Transformador de Acoplamento (*ChcP*, *ChcN* e *ChBP*). Em seguida foi mostrado o bloco utilizado para retratar a carga e os indutores conectados a cada tape do TE e a reatância de curto-circuito do sistema (*Series RLC Branch*).

A partir daí, deu-se início à elucidação do sistema de controle, mostrando o estágio onde são ajustados os valores limites de cada uma das faixas de operação. Também foi explicada a lógica digital responsável por executar a estratégia de

controle traçada no capítulo 2. Por fim, mostrou-se uma visão geral do sistema de potência monofásico e trifásico.

Por último, o capítulo 4 teve como finalidade apresentar e avaliar o desempenho obtido pelas modelagens monofásica e trifásica do Regulador Eletromagnético de Tensão no que tange a adequação de tensões frente a subtensões e sobretensões impostas. Para a modelagem trifásica, além da avaliação da regulação, também foi avaliado, por consequência, a redução do fator de desequilíbrio de tensões do sistema.

Começou-se com a abordagem do sistema monofásico. Num primeiro momento foram mostrados gráficos das tensões eficazes nas barras 1 e 2 e uma tabela contendo os valores eficazes destas tensões em regime permanente. Nesta tabela ainda estão contidos os desvios percentuais destas tensões com relação à tensão nominal (127V) e a classificação das mesmas em "Adequada", "Precária" e "Crítica".

Posteriormente foram mostrados gráficos com valores eficazes de tensão e corrente em diversos trechos do sistema. Dentre eles: a tensão no primário do TA inserida em série com a linha, a corrente suprida pela fonte, que percorre o enrolamento primário do TA, a corrente drenada pela carga, a corrente circulante no lado primário, no neutro e no secundário do TE.

Em seguida foram apresentados os gráficos com valores das potências que fluem em diversos trechos do sistema: potências aparente, ativa e reativa suprida pela fonte, drenada pela carga, no enrolamento primário do TA, e no lado primário (alta tensão) do TE. Foi mostrada também a relação entre a potência requerida pelo RET e a potência drenada pela carga, comprovando que a potência necessária para o funcionamento do regulador é bem inferior à potência drenada pela carga.

A posteriori deu-se início à inspeção dos dados para o modelo trifásico. Foram trazidos gráficos e tabelas com os valores eficazes das tensões de fase e de linha nas barras 1 e 2. Também foi mostrado os valores do fator de desequilíbrio das tensões durante o período de simulação em ambas as barras, corroborando a efetividade do RET trifásico na mitigação desse indicador.

Ainda foram inseridos gráficos contendo os valores eficazes das correntes supridas pela fonte, drenada pela carga e circulante no primário, neutro e secundário do Transformador de Excitação nas três fases. E também, gráficos contendo os valores das potências aparentes, ativas e reativas supridas pela fonte, drenada pela carga e nos enrolamentos primários do Transformador de Excitação e do Transformador de Acoplamento nas três fases.

Por fim, com o objetivo de encerrar o presente trabalho, é necessário frisar que, embora os resultados obtidos pela modelagem tenham se mostrados satisfatórios no ambiente computacional para as condições testadas, a validação do modelo ainda carece de diversas outras investigações mediante condições dinâmicas do sistema, uma vez que este trabalho contemplou somente o funcionamento do RET em um sistema isolado, sem interligações.

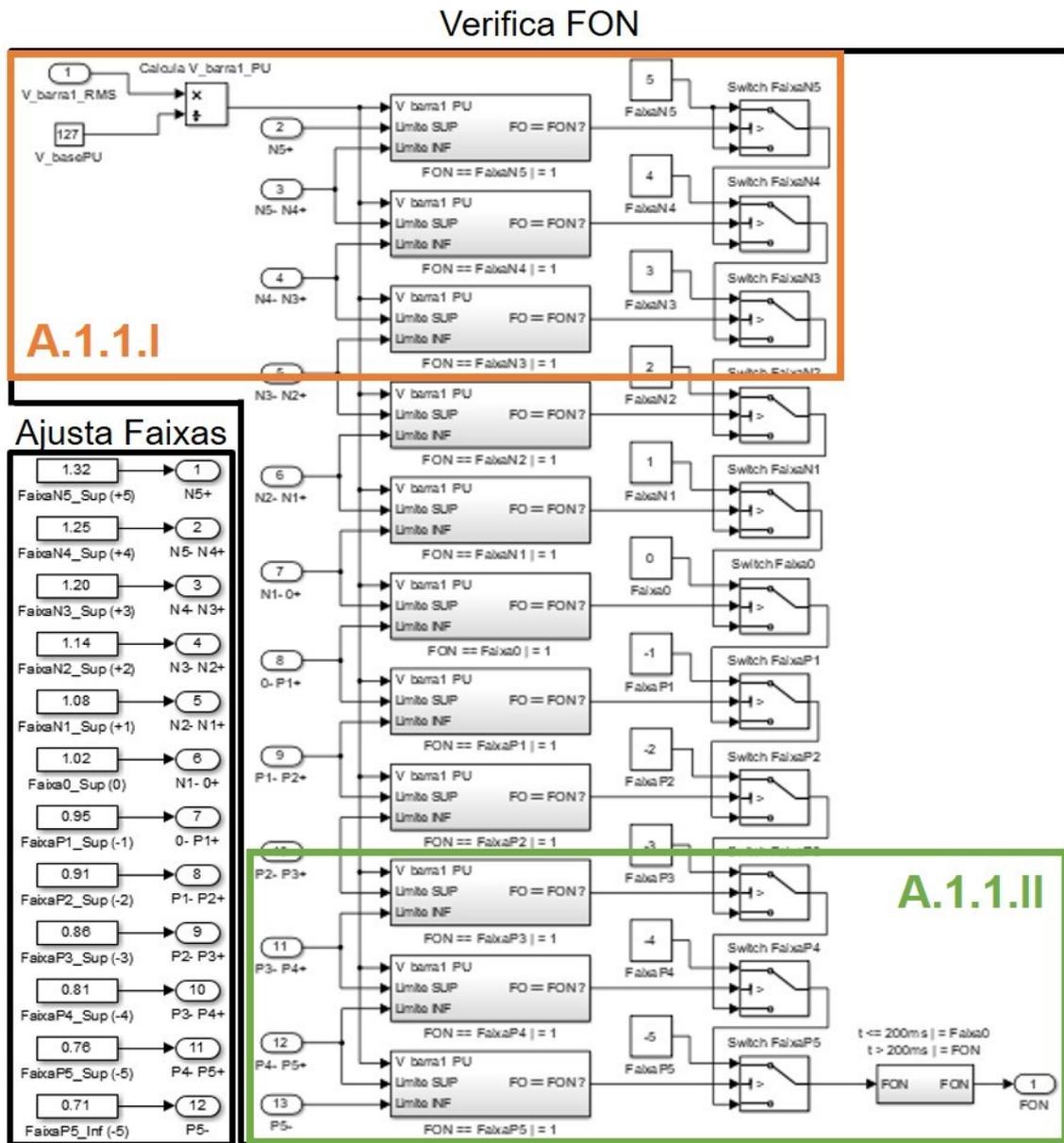
## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. V. Milanovic *et al.*, "International industry practice on power-quality monitoring" *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, nº 2, p. 934-941, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2283143>;
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional", Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. [S.l.]: [s.n.], v. Revisão 12, janeiro 2021;
- [3] OLIVEIRA, J. C. et al. "Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação". VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia –VII CBQEE. Santos -SP: [s.n.]. 2007. p. 1-6;
- [4] KHEDERZADEH, M.; GHORBANI, A. "STATCOM Modeling Impacts on Performance Evaluation of Distance Protection of Transmission Lines". *European Transactions on Electrical Power*, v. 21, p. 2063-2079, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etep.541>;
- [5] Regulador de Tensão Monofásico TB-R1000, Manual do fabricante. Toshiba Leading Innovation. [S.l.]: [s.n.]. Disponível em: <https://www.tseaenergia.com.br/arquivos/pdf/regulador-monofasico/manual-de-instrucoes-reguladores.pdf>;
- [6] Regulador de Tensão Monofásico COOPER VR-32, Manual do fabricante. Cooper Power Systems: [s.n.]. Disponível em: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/voltage-regulators/vr-32-voltage-regulator-with-quick-drive-tap-changer-instructions-mn225008pt.pdf>;
- [7] Regulador de Tensão Monofásico ITB RAV-2, Manual do fabricante. ITB Equipamentos Elétricos: [s.n.]. Disponível <https://itb.ind.br/download/mi005-manual-do-regulador-rav-2-com-ctr-2-rev-2017-06-portugues/>;
- [8] WEINHOLD, M. et al. "Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems". II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica -II SBQEE. São Lourenço – MG. 1997. p. 1-6;
- [9] MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems". IEEE Press and Wiley Interscience, New York, USA, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/9780470546680>;
- [10] SANTILIO, F. P. Proposta, Modelagem e Validação de uma Nova Concepção de Regulador Eletromagnético através do Reforço Série de Tensão. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2013;

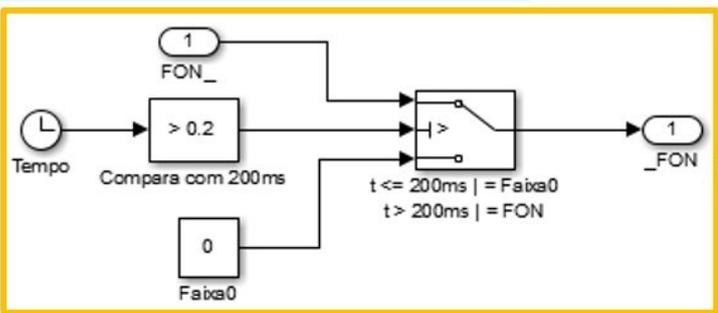
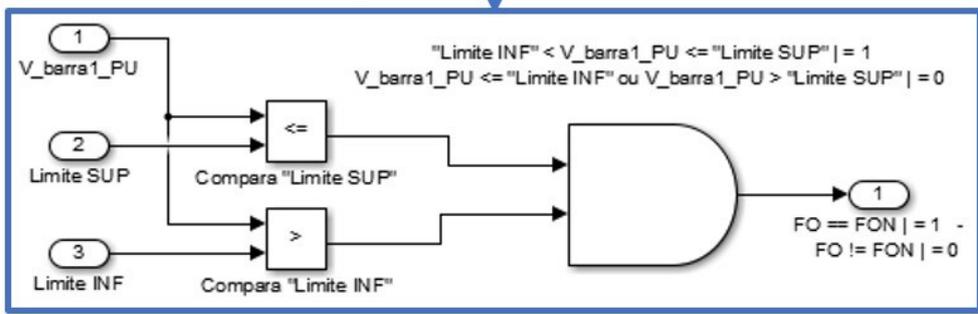
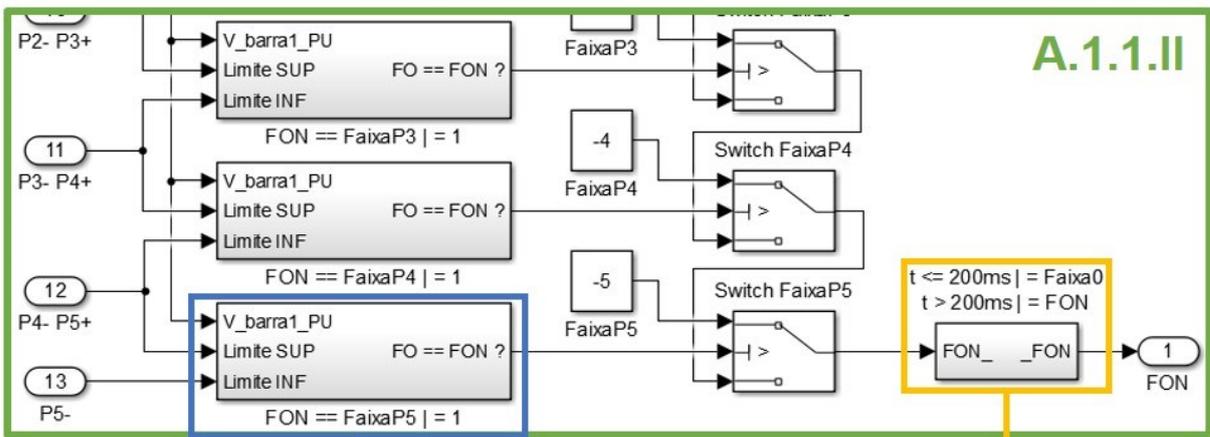
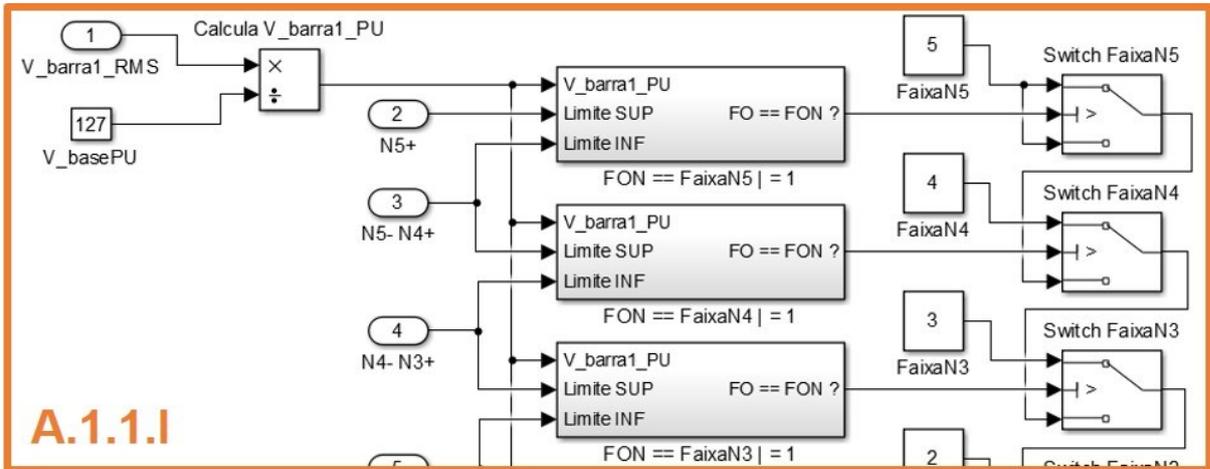
- [11] SILVA, T. V. D. Uma Proposta para o Controle Eletrônico de Reguladores Eletromagnéticos através do Reforço Série de Tensão. Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. Uberlândia. 2012;
- [12] VASCONCELOS, L. E. Modelagem no Domínio da Frequência de um Regulador Eletromagnético de Tensão Baseado na Compensação Série. Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. Uberlândia. 2014;
- [13] BRITO, V. H. F. Proposta de uma Topologia Alternativa para um Regulador Eletromagnético de Tensão. Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. Uberlândia 2020;
- [14] Documentação de suporte do Simulink: Multi-Winding Transformer. Acesso em: 25/11/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/multiwindingtransformer.html>;
- [15] Documentação de suporte do Simulink: Saturable Transformer. Acesso em 27/11/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/saturabletransformer.html>;
- [16] Documentação de suporte do Simulink: Breaker. Acesso em 30/11/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/breaker.html>;
- [17] Documentação de suporte do Simulink: Series RLC Branch. Acesso em 30/11/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/seriesrlcbranch.html>;
- [18] Documentação de suporte do Simulink: Voltage Measurement. Acesso em 30/11/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/voltagemasurement.html>;
- [19] Documentação de suporte do Simulink: Current Measurement. Acesso em 30/11/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/currentmeasurement.html>;
- [20] Documentação de suporte do Simulink: RMS. Acesso em 30/11/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/rms.html>.

# APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS SUBSISTEMAS DO PROCESSO DE CONTROLE DO RET

## A.1 – Subsistema “Ajusta Faixas” e “Verifica FON”

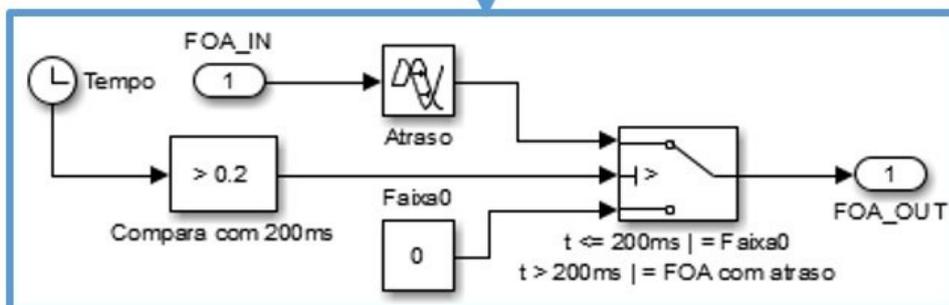
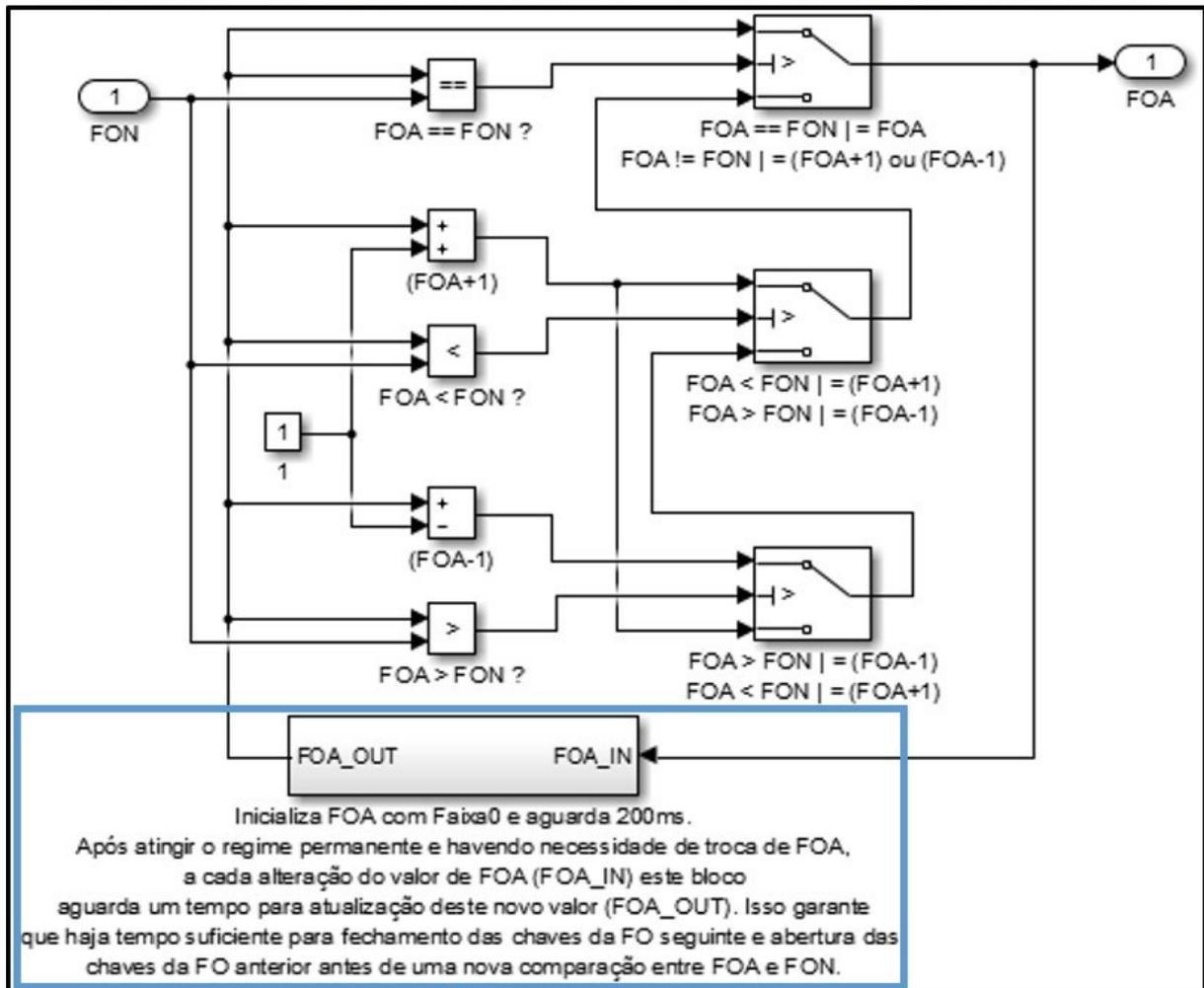


**A.1.1 – Detalhamento das regiões A.1.1.I e A.1.1.II**



**A.2 – Subsistema “Compara FON com FOA. Incrementa ou decrementa FOA”**

**Compara FON com FOA. Incrementa ou decrementa FOA**



### A.3 – Subsistema “Gera sinais de trigger das chaves”

Gera sinais de trigger das chaves

