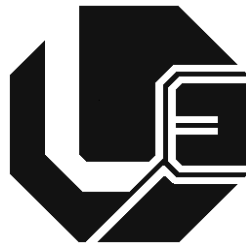


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO
DE REATORES A NÚCLEO SATURADO NA
ATENUAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO**

Márcio Arvelos Moraes

Uberlândia
2016

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

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
REATORES A NÚCLEO SATURADO NA ATENUAÇÃO
DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO**

Dissertação apresentada por Márcio Arvelos Moraes à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

José Rubens Macedo Jr. (Orientador), Dr. – UFU
José Carlos de Oliveira, PhD – UFU
José Wilson Resende, PhD – UFU
Juliane Cristina de Oliveira Fandi, Dra. – UFTM

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

M827m Moraes, Márcio Arvelos, 1989-
2016 Modelagem e análise de desempenho de reatores a núcleo saturado
na atenuação das flutuações de tensão / Márcio Arvelos Moraes. - 2016.
86 f. : il.

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

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Controle de
qualidade - Teses. 3. Equipamentos elétricos - Teses. I. Macedo Júnior,
José Rubens. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REATORES A NÚCLEO SATURADO NA ATENUAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Márcio Arvelos Moraes

Dissertação apresentada por Márcio Arvelos Moraes à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Rubens Macedo Jr.
Orientador

Prof. Darizon Alves Andrade
Coordenador da Pós-graduação

Dedico este trabalho aos meus pais, José Machado e Maria Aparecida, pelo amor incondicional, à minha irmã, Cíntia, e à minha querida esposa, Angélica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, por ter me concedido uma família maravilhosa, pelos amigos, pela saúde e pela oportunidade de estudar.

Agradeço especialmente aos meus pais, Maria Aparecida Nunes de Arvelos e José Machado de Moraes, pelo amor incondicional, pelo carinho, pelo cuidado e por todo suporte empregado a mim nos momentos difíceis que enfrentei. Sou grato à minha irmã, Cíntia Arvelos Moraes, pelo seu amor, pela amizade e pelo convívio. Agradeço também à minha amada esposa e companheira de jornada, Angélica Alves Garcez, pelo seu amor, carinho, cuidado e pela confiança, por suportar e fortalecer-me durante a elaboração deste trabalho.

Ao professor José Rubens Macedo Jr., meu orientador, sou muito grato pela confiança, pela paciência, pelos ensinamentos, por toda a orientação e pelas contribuições determinantes para a realização desta dissertação de mestrado e para minha formação profissional.

Estendo meus agradecimentos ao professor José Carlos de Oliveira, pela presteza e pelo apoio despendido, pelo otimismo e por contribuir de forma ativa e concisa para a produção deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e familiares pelo apoio e pelo carinho. Em especial, ao meu amigo Thelêmaco e ao meu primo Denis, por estarem presentes nos momentos felizes e tristes da minha vida, amparando-me com as suas sinceras amizades. Aos colegas de laboratório, sou grato pelo apoio e por tornarem esta caminhada mais leve, especialmente à Camilla Sousa, que colaborou de forma ativa com seus conhecimentos sobre reatores saturados para elaboração deste trabalho.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade e a todos professores do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica pelos ensinamentos e pela contribuição para minha formação. Agradeço à Cinara Fagundes pela presteza e prontidão na execução dos assuntos relacionados à secretaria do programa, e à CAPES pelo incentivo financeiro.

E, no fim, percebo que toda conquista individual na verdade é conquista coletiva.

RESUMO

A qualidade da energia elétrica é um tema de grande interesse, tanto por parte das concessionárias quanto por parte dos consumidores e órgãos regulamentadores. Assim, torna-se imprescindível conhecer as causas e os efeitos relacionados aos distúrbios presentes na rede, como também as soluções mitigadoras. Nesse cenário, reconhece-se a importância de estudar todos os fenômenos que provocam perturbações na energia elétrica. Todavia, destaca-se a relevância de conhecer as causas e os efeitos pertinentes à flutuação de tensão, bem como as medidas preventivas ou corretivas que podem ser adotadas para solucionar a ocorrência de tal distúrbio, pois ainda há lacunas relacionadas ao desempenho de equipamentos elétricos a serem usados para solucionar tais problemas. Dessa maneira, o presente trabalho tem como objetivo avaliar computacionalmente o desempenho do equipamento elétrico compensador a reator a núcleo saturado *Twin-Tripler* na atenuação da flutuação de tensão. Para isso, foi desenvolvida a modelagem do compensador no programa Simulink, como alternativa ao tradicional uso da plataforma ATP, até então utilizada nas mais diversas publicações e em estudos de desempenho dos compensadores em foco.

Palavras-chave: Compensador a reator a núcleo saturado *Twin-Tripler*. Flutuação de tensão. Modelagem. Simulink.

ABSTRACT

Currently the electric power quality is a theme of great interest for electric utilities, consumers, and regulatory organizations; therefore, the causes and effects related to disturbances in the network and the mitigation solutions must be known. In this scenario, we recognize the importance of studying all phenomena that can disturb the electric power; however, knowing the causes and effects of the voltage fluctuation phenomenon as well as preventive or corrective measures to solve disturbances stands out, because there are still gaps related to the performance of electrical equipment to be used in this situation. This study aims to evaluate computationally the performance of a Twin-Tripler saturated core reactor compensator to attenuate voltage fluctuation. The modeling of the compensator was developed in the program Simulink as an alternative to the Alternative Transient Program (ATP), which has been used in many publications and compensator performance studies.

Keywords: Twin-Tripler saturated core reactor compensator. Voltage fluctuation. Modeling. Simulink.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL 18

1.1 – Considerações iniciais 18

1.2 – Estado da arte..... 22

1.2.1 – Compensador estático tipo reator a núcleo saturado 22

1.3 – Contribuições desta dissertação 26

1.4 – Estrutura da dissertação 26

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 29

2.1 – Considerações iniciais 29

2.2 – Inter-harmônicas 29

2.3 – Flutuação de tensão..... 31

2.3.1 – Causas das flutuações de tensão nos sistemas elétricos..... 35

2.3.2 – Estratégias para a atenuação da flutuação de tensão 38

2.4 – Reator a núcleo saturado..... 39

2.4.1 – Compensador estático a núcleo saturado 43

2.5 – Conclusão 44

CAPÍTULO III

MODELAGEM DO REATOR A NÚCLEO SATURADO NO SIMULINK E VALIDAÇÃO 45

3.1 – Considerações iniciais	45
3.2 – Modelagem do reator no programa Simulink	45
3.3 – Caracterização do sistema elétrico.....	49
3.4 – Estudo de desempenho do sistema com o reator saturado no Simulink	51
3.4.1 – Sistema sem a presença do regulador de tensão	51
3.4.2 – Sistema com a presença do regulador de tensão.....	52
3.5 – Desempenho comparativo entre os modelos de reator saturado no Simulink e no ATP.....	56
3.6 – Conclusão	61

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO COMPENSADOR SATURADO FRENTE À FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	62
4.1 – Considerações iniciais	62
4.2 – Caracterização do sistema elétrico.....	63
4.3 – Análise do sistema frente à flutuação de tensão	65
4.4 – Análise de desempenho do compensador estático saturado frente à flutuação de tensão	70
4.5 – Conclusão	79

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Formas de ondas típicas relacionadas às componentes fundamental, inter-harmônica, sub-harmônica e contínua.....	30
Figura 2.2. Flutuação de tensão com variação senoidal do envelope	32
Figura 2.3. Tipos de flutuação de tensão: (a) tipo A, (b) tipo B, (c) tipo C e (d) tipo D [20]	33
Figura 2.4. Sistema elétrico: (a) circuito simplificado e (b) diagrama fasorial	36
Figura 2.5. Sinal de frequência fundamental com a presença de componentes inter-harmônicas	38
Figura 2.6. Curva de operação de equipamentos eletromagnéticos	40
Figura 2.7. Reator Twin-Tripler trifásico com núcleos separados [15]	41
Figura 2.8. Curva V versus I do reator saturado	42
Figura 2.9. Compensador saturado: (a) Diagrama unifilar e (b) Curva V versus I.....	43
Figura 3.1. Circuito equivalente do transformador monofásico	46
Figura 3.2. Estratégia para modelagem do reator saturado no Simulink: (a) Bloco do transformador monofásico e (b) Janela para parametrização do transformador/da coluna magnética.....	47
Figura 3.3. Curva de saturação representativa do núcleo magnético	48
Figura 3.4. Modelo computacional do RNS Twin-Tripler no Simulink.....	49
Figura 3.5. Diagrama equivalente do sistema elétrico utilizado para os estudos de desempenho do reator saturado	50
Figura 3.6. Tensão na barra 1 sem o RNS – Simulink.....	51
Figura 3.7. Diagrama de blocos do sistema elétrico no Simulink.....	52
Figura 3.8. Tensão na barra 1 com o RNS – Simulink	53

Figura 3.9. Corrente do reator ao longo do processo dinâmico – Simulink.....	54
Figura 3.10. Espectro harmônico da corrente do reator saturado durante o processo de regulação – Simulink.....	55
Figura 3.11. Potência reativa consumida pelo reator saturado ao longo do período de operação proposto – Simulink.....	55
Figura 3.12. Sistema elétrico representado no ATP.....	56
Figura 3.13. Tensão na barra 1 com o RNS – ATP	57
Figura 3.14. Comparação entre as tensões na barra 1 obtidas nos programas Simulink e ATP	57
Figura 3.15. Corrente solicitada pelo reator saturado – ATP	58
Figura 3.16. Espectro harmônico da corrente do reator saturado na atuação para o processo da regulação – ATP.....	59
Figura 3.17. Comparação entre as correntes drenadas pelo RNS no Simulink e no ATP	59
Figura 3.18. Potência reativa consumida pelo reator saturado ao longo do período de operação proposto – ATP.....	60
Figura 3.19. Comparação entre a potência absorvida pelo RNS no Simulink e no ATP	60
Figura 4.1. Diagrama unifilar do sistema analisado	63
Figura 4.2. Sistema implementado no Simulink	65
Figura 4.3. Perfil de carregamento da tensão e corrente na barra 2	66
Figura 4.4. Número de operação do laminador por minuto.....	66
Figura 4.5. Curva do comportamento do indicador Sf para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%	68
Figura 4.6. Curva do comportamento do indicador Sf para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10%	68
Figura 4.7. Curva do comportamento do indicador Pst para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%.....	69

Figura 4.8. Curva do comportamento do indicador Pst para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10%.....	70
Figura 4.9. Diagrama unifilar do sistema com a inserção do compensador saturado.	71
Figura 4.10. Diagrama de bloco no Simulink com a inserção do compensador saturado	72
Figura 4.11. Forma de onda da corrente no RNS	74
Figura 4.12. Curva de comportamento do indicador Sf com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%.....	75
Figura 4.13. Curva de comportamento do indicador Sf com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10%.....	76
Figura 4.14. Curva de comportamento do indicador Pst com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%.....	77
Figura 4.15. Curva de comportamento do indicador Pst com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10 %.....	77
Figura 4.16. Redução percentual do indicador Sf promovida pelo compensador saturado	78
Figura 4.17. Redução percentual média do indicador Sf promovida pelo compensador saturado	78
Figura 4.18. Redução percentual do indicador Pst promovida pelo compensador saturado	79
Figura 4.19. Redução percentual média do indicador Pst promovida pelo compensador saturado	79

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1. Definição matemática de inter-harmônicas e harmônicas</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4.1. Dados elétricos do sistema.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 4.2. Dados elétricos da linha de distribuição</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 4.3. Dados elétricos da carga</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 4.4. Condições de carregamento do laminador de aço.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 4.5. Operação por minuto do laminador.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 4.6. Resultados de tensão e corrente aferidos na barra 2 (tensões expressas em (pu))</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 4.7. Resultados obtidos para o indicador Sf.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 4.8. Resultados obtidos para o indicador Pst</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 4.9. Paramentos do compensador saturado</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 4.10. Resultados do sistema com a inserção do compensador</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4.11. Valores de DTI do RNS e DTT na barra 2.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 4.12. Resultados obtidos para o indicador Sf com a inserção do compensador saturado.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 4.13. Resultados obtidos para o indicador Pst com a inserção do compensador saturado.....</i>	<i>76</i>

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
BC	Banco de capacitores
CERNS	Compensador estático a reator a núcleo saturado
C _{sh}	Capacitor <i>shunt</i>
DICOM	Dimensionamento de compensadores
DTI	Distorção harmônica total de corrente
DTT	Distorção harmônica total de tensão
DV/V%	Variação de tensão percentual
E	Tensão da fonte
f	Frequência
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i>
h	É um número inteiro maior que zero
I	Corrente
$i(t)$	Corrente do compensador saturado
I_C	Corrente da carga
$I_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{i}n}$	Corrente máxima e mínima na barra 2, respectivamente
I_a , I_b e I_c	Correntes nas fases a, b e c do reator a núcleo saturado, respectivamente
I_0 e I_f	Corrente mínima e corrente máxima, respectivamente
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I_{pk}	Corrente de pico
L_1 e L_2	Indutâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário
LED	Diodo emissor de luz
LFC	Lâmpada fluorescente compacta

L_{sat}	Indutância do ramo de magnetização
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P e Q	Potências ativa e reativa da carga
PAC	Ponto de acoplamento comum
Plt	<i>Probability long term</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PRORE 2.0	Projeto de Reatores Saturados e Determinação dos Parâmetros Elétricos Equivalentes
Pst	<i>Probability short term</i>
R_1 e R_2	Resistências dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente
R_m	Resistência do ramo de magnetização
R_s e X_s	Resistência de reatância equivalente do sistema
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNS	Reator a núcleo saturado
SABER	<i>Design and Analysis of Mixed-Technology and Mixed-Signal Systems</i>
S_f	Sensação instantânea de <i>flicker</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
S_0 e S_f	Potência mínima e potência máxima, respectivamente
S_{cc}	Potência de curto-circuito nos terminais da carga
V_c	Tensão nos terminais da carga
$v(t)$	Tensão no barramento
$v_{RNS}(t)$, $v_{RNS}(i_{RNS})$ e $i_{RNS}(t)$	Tensão e corrente no RNS
$v_c(t)$, $v_c(i_{Csh})$ e $i_{Csh}(t)$	Tensão e corrente no capacitor <i>shunt</i>
V_0 e V_f	Tensão mínima e tensão máxima, respectivamente
$V_{máx}$ e $V_{mín}$	Tensão máxima e mínima na barra 2, respectivamente
V	Tensão

var/min	Variações por minuto
X/R	Relação da reatância pela resistência do sistema
Z_{cc}	Impedância de curto-circuito
Z_{dist}	Impedância da linha de distribuição
λ	Fluxo concatenado
ΔI	Variação de corrente
$\Delta I/I(\%)$	Variação de corrente percentual
ΔV	Variação de tensão
$\Delta V/V(\%)$	Variação de tensão percentual
θ	Ângulo de defasagem entre a tensão e corrente

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – Considerações iniciais

Ao longo dos anos, foram identificados alguns fenômenos causadores de distúrbios na energia elétrica. De modo consequente, buscou-se classificá-los, mitigá-los e definir níveis aceitáveis de sua presença na rede elétrica. Dentre esses fenômenos causadores de distúrbios na energia elétrica, destacam-se:

- distorções harmônicas;
- variações de tensão de curta e longa duração;
- interrupções do fornecimento;
- flutuações de tensão;
- desequilíbrios de tensão; e
- variações de frequência.

Devido à crescente preocupação com a qualidade da energia elétrica, tanto por parte das concessionárias de energia elétrica, quanto por parte dos órgãos regulamentadores e dos consumidores, busca-se aprimorar os conhecimentos a respeito dos distúrbios. Apesar de reconhecer-se a importância de estudar todos esses fenômenos, pode-se destacar a relevância de conhecer as causas e os efeitos pertinentes à flutuação de tensão, bem como as medidas preventivas ou corretivas que podem ser adotadas para solucionar a ocorrência de tal distúrbio, pois ainda há lacunas relacionadas ao desempenho de equipamentos elétricos utilizados para mitigar tais problemas.

A flutuação de tensão pode ser caracterizada como uma variação aleatória ou repetitiva do envoltório da tensão, devido às mudanças bruscas e imprevisíveis da potência ativa e reativa solicitada por uma carga. A cintilação luminosa é o efeito mais lembrado quando se trata de flutuação de tensão, uma vez que a variação de luminosidade em lâmpadas pode gerar desconforto e irritação aos observadores, provocando em cada indivíduo uma sensação particular. Além desse, pode-se ressaltar oscilações de velocidade e torque; aumento das perdas, vibrações e; redução da vida útil de motores elétricos; redução da eficiência em equipamentos eletrotérmicos, como estufas e fornos; falha na operação em relé e contadores; e instabilidade em equipamentos elétricos, podendo causar até a interrupção de processos industriais e, conseqüentemente, prejuízos financeiros.

Atualmente, o fenômeno de flutuação de tensão passou a ser investigado sob nova perspectiva, pois há constatações de que, em sistemas onde há a circulação de corrente ou a presença de tensão inter-harmônica, também ocorre a flutuação de tensão, antes atribuída somente a variações bruscas e repentinas na demanda reativa da carga [1]. Para mitigação da flutuação de tensão, destacam-se os seguintes métodos: o aumento do nível de curto-circuito do sistema, obtido pela construção de nova linha de transmissão em paralelo; o aumento da bitola dos condutores e/ou a utilização de condutores múltiplos; o aumento do nível de tensão; e a instalação de novas fontes geradoras de energia elétrica. Além disso, pode-se realizar a instalação de compensadores estáticos controlados por tiristores, de compensadores síncronos e de compensadores a reator saturado, seja na forma autossaturável ou na controlada.

Desse modo, o grupo de trabalho da *International Union for Electricity Applications* (UIE) propôs, em 1982, uma metodologia para a quantificação da flutuação de tensão baseada nos principais métodos adotados em diferentes países, identificando as

vantagens e desvantagens de cada um deles. Após várias análises comparativas e avaliativas realizadas em vários países, foi possível endossar a eficácia do método proposto. Assim, a *International Electrotechnical Commission* (IEC), em 1986, adotou oficialmente essa metodologia, que mais tarde se transformou na conhecida norma IEC 61000-4-15[2].

A norma IEC 61000-4-15 [2] propõe o modelo de um equipamento visando uniformizar a medição dos níveis de percepção de cintilação luminosa decorrentes do fenômeno das flutuações de tensão. Além disso, são definidos índices quantitativos que atestam a intensidade da cintilação luminosa e a severidade presenciada durante curto e longo intervalo de tempo (10 minutos e 2 horas, respectivamente), permitindo, assim, avaliar o nível de flutuação de tensão presente no sistema elétrico.

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) elabora os documentos conhecidos como Procedimentos de Rede, que possuem caráter normativo e definem os procedimentos e requisitos necessários à realização das atividades de planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece os procedimentos referentes à qualidade do produto e do serviço, definindo as terminologias, os parâmetros e os valores de referência relativos à conformidade da energia elétrica comercializada.

A respeito da flutuação de tensão, ambos os órgãos estatais definem e classificam os indicadores de severidade de *flicker*, determinando que, caso haja perturbações fora dos níveis considerados aceitáveis, medidas mitigatórias sejam tomadas por parte dos agentes responsáveis: o ONS, por meio do Submódulo 2.8 [3], e a ANEEL, por meio do documento normativo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [4]. Vale ressaltar que ambas as normas

brasileiras adotam os procedimentos de medição e cálculo estabelecidos pela norma IEC 61000-4-15 para a determinação dos indicadores de severidade da cintilação luminosa.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise computacional do desempenho do compensador estático a reator a núcleo saturado tipo *Twin-Tripler* (CERNS) para a atenuação do fenômeno da flutuação de tensão. A motivação para este estudo baseia-se no fato de que praticamente nenhuma publicação foi documentada acerca dos resultados do referido compensador na atenuação da flutuação de tensão.

Vale ressaltar que o emprego de compensadores saturados para o propósito exposto já foi realizado por outros autores, utilizando o processo de saturação controlada, por meio de mecanismos externos que promovem a injeção de corrente contínua nos enrolamentos de controle do reator, ou utilizando a tecnologia de reatores autossaturados com *tap* variável. Todavia, as tecnologias empregadas nesses compensadores diferem-se da proposta deste trabalho no que se refere à forma de saturação do núcleo e ao arranjo elétrico.

Para atingir o objetivo proposto, foi realizada a modelagem do reator a núcleo saturado (RNS), utilizando-se o programa computacional Simulink em substituição ao modelo já existente na plataforma *Alternative Transient Program* (ATP), para a realização de estudos de desempenho do sistema sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente. O programa computacional Matlab/Simulink apresenta-se como uma ferramenta robusta, versátil e com ampla difusão no meio acadêmico, haja vista as facilidades encontradas para o desenvolvimento de modelos específicos de dispositivos e complexos elétricos. Adicionalmente, existe uma expressiva diversidade de recursos pré-disponibilizados em sua biblioteca de aplicativos específicos para a área de sistemas de

energia elétrica, a exemplo de unidades de geração renováveis, sistema de transmissão em corrente contínua, dentre outras.

1.2 – Estado da arte

Uma vez elucidados os problemas enfrentados com os distúrbios presentes nas tensões e correntes do sistema elétrico que afetam a qualidade da energia elétrica, destacando-se os efeitos do fenômeno da flutuação de tensão e as normas nacionais e internacionais que conceituam, definem e quantificam os níveis de tal fenômeno, a presente seção destina-se a expor algumas publicações a respeito desse assunto, bem como apresentar as publicações que tratam do reator a núcleo saturado, seja de forma isolada ou no arranjo conhecido como compensador a reator a núcleo saturado.

1.2.1 – Compensador estático tipo reator a núcleo saturado

Na década de 1940, verificou-se o desenvolvimento da tecnologia de reatores saturados por meio das pesquisas do Dr. Erich Siegfried Friedlander. Com os trabalhos e estudos realizados nessa área, o referido pesquisador buscava o uso dessa tecnologia em multiplicadores de frequências e geradores de trens de pulsos para alimentação e controle de retificadores à válvula de mercúrio [5], [6] e [7].

Após o desenvolvimento inicial da tecnologia dos reatores a núcleo saturado, foram obtidas melhorias significativas no material do núcleo magnético utilizado nesses equipamentos, proporcionando a redução do ciclo de histerese e possibilitando a construção de equipamentos de alta eficiência, confiabilidade e vida útil. Em decorrência dos avanços obtidos, essa nova tecnologia foi aplicada em indústrias siderúrgicas possuidoras de grandes fornos a arco, com o objetivo de atenuar as amplitudes do efeito *flicker* associado ao fenômeno das flutuações de tensão, uma vez que essas cargas

provocam consideráveis perturbações nas formas de onda das tensões e correntes do sistema, devido à sua forma de operação não linear [8], [9] e [10].

Nessa conjuntura, pode-se citar o caso de uma siderúrgica na Etiópia, na qual, durante o funcionamento de um forno a arco, eram produzidos altos níveis de flutuação de tensão, prejudicando a qualidade da energia elétrica ao longo de todo o sistema de distribuição local [11]. Dentre as soluções encontradas, a mais viável economicamente e que poderia ser implementada de forma mais rápida foi o emprego do compensador estático a reator saturado com *tap* variável. Tal solução foi desenvolvida e executada pela *General Electric Company* (GEC), o que resultou em uma redução expressiva dos níveis das flutuações de tensão, atenuando seus efeitos (a exemplo do efeito *flicker*) nos consumidores adjacentes. Essa foi a primeira aplicação comercial bem-sucedida de um compensador a reator saturado para atenuação da flutuação de tensão provocada pela operação de fornos a arco.

A referência [12] aborda o emprego de um reator saturável, com controle externo de saturação em série com um forno a arco para atenuação da flutuação de tensão. Assim, destaca-se a vantagem da magnetização forçada para a intervenção imediata nas variações da corrente de carga, devido ao comportamento físico do reator saturado em comparação aos reatores controlados a tiristores (RCTs), os quais têm atrasos de tempo de resposta e limitam a eficiência da atenuação. Com a implementação do referido equipamento, houve a estabilização dos níveis da corrente solicitada pela carga, do consumo de potência reativa e da tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), bem como uma redução considerável do efeito *flicker*. Sob o aspecto da qualidade da energia elétrica, a desvantagem mais significativa do reator saturável é a geração de componentes harmônicas de corrente.

Com o intuito de resgatar a tecnologia dos reatores a núcleo saturado, foram realizados, nos últimos anos, vários estudos relacionados à sua construção, ao dimensionamento e à análise de desempenho frente à regulação de tensão em regime permanente. Contudo, nenhuma publicação sobre o emprego de reatores saturados tipo *Twin-Tripler* a respeito da atenuação da flutuação de tensão foi documentada. Porém, apesar de o tema aqui proposto diferir, no que tange ao tipo de distúrbio a ser atenuado, de estudos acerca de reatores a núcleo saturado, faz-se importante destacá-los e apresentá-los.

Nesse contexto, o trabalho desenvolvido em [7] aborda os tipos de equipamentos utilizados para compensação da tensão e classifica-os de acordo com o tipo de compensação e filosofia de operação empregada. Trata-se também da especificação do compensador estático tipo reator a núcleo saturado, bem como da formulação do arranjo de seis unidades denominado *Twin-Tripler*, que reduz significativamente a geração de componentes harmônicas de corrente e apresenta um espectro harmônico semelhante ao de um retificador trifásico de 12 pulsos. Além disso, foi realizada a implementação computacional do RNS no programa computacional SABER, juntamente com a validação do modelo por meio de protótipos e ensaios laboratoriais. Finalmente, foi realizado um estudo de desempenho com compensador saturado frente à qualidade de energia elétrica a partir de ensaios e simulações para condições não ideais na tensão de fornecimento, permitindo concluir que há dependência entre as condições não ideais de suprimento de tensões e as condições de operação do compensador perante tais distúrbios.

Em [13], desenvolveu-se um aplicativo computacional que dimensiona o compensador estático formado por um capacitor *shunt* e um reator saturado, necessários para adequar uma determinada instalação elétrica aos padrões de qualidade de tensões, segundo as orientações normativas. Concomitantemente, com a metodologia elaborada

para estabelecer as bases do pré-projeto eletromagnético de reatores saturados *Twin-Tripler*, foram realizadas simulações computacionais com os programas SABER e FEMM sob variadas condições de carregamento do sistema. Arelado a isso, foi desenvolvido um protótipo em escala real do reator saturado com potência nominal de 586 kvar, possibilitando validar os procedimentos realizados anteriormente.

O trabalho apresentado em [14] considera a modelagem do RNS por meio da inserção de bancos de capacitores em série para melhoria do estatismo do equipamento, bem como a avaliação computacional de seu desempenho transitório e de regime permanente. Assim, constatou-se que houve ganhos de desempenho na compensação devido à melhoria do estatismo do equipamento com a inserção do banco de capacitores em série.

Foram desenvolvidas, em [15], as bases e os procedimentos para o projeto básico de reatores a núcleo saturado tipo *Twin-Tripler* e a determinação dos parâmetros elétricos equivalentes obtidos a partir das informações construtivas do equipamento. Complementarmente, foi produzido um modelo computacional para o reator a núcleo saturado tipo *Twin-Tripler* no simulador ATP, validando-o mediante comparação de resultados de desempenho teórico com outros obtidos em ensaios laboratoriais. Como resultado, foi possível constatar a eficácia no processo de regulação da tensão e redução de distorções harmônicas causadas no sistema elétrico, quando realizados estudos computacionais de desempenho de um compensador saturado sob condições de regime dinâmico e permanente.

Atualmente, estão sendo realizados estudos de desempenho do reator saturado tipo *Twin-Tripler* substituindo-se o material magnético de seu núcleo, de aço silício, por ligas amorfas. No trabalho [16], foram realizadas análises computacionais no programa ATP de dois reatores frente a seu desempenho na regulação de tensão em regime permanente,

sendo um constituído de aço silício, e outro, de ligas amorfas. Os resultados evidenciam, primordialmente, que o emprego de ligas amorfas em substituição ao aço silício mostra-se bastante atrativo no que tange a aspectos como a eficiência energética do regulador, a redução de perdas joule e as perdas no ferro, sendo as primeiras provocadas pela redução da corrente quando da operação abaixo do ponto de saturação nominal. No tocante à relação entre as perdas no ferro e o montante de material utilizado na construção dos núcleos dos reatores, os que são constituídos de ligas amorfas apresentam volume superior em 20%; entretanto, existe uma estimativa de perdas 90% menor quando este é comparado com a tecnologia convencional.

1.3 – Contribuições desta dissertação

Centrado nos objetivos elucidados anteriormente, o presente trabalho visa contribuir efetivamente nos seguintes aspectos:

- modelar o reator a núcleo saturado tipo *Twin-Tripler* na plataforma computacional Simulink;
- validar o modelo do reator saturado desenvolvido no programa Simulink por meio do modelo já consolidado na plataforma ATP; e
- avaliar computacionalmente o desempenho do compensador estático tipo reator a núcleo saturado, frente à mitigação do distúrbio da flutuação de tensão utilizando o programa Simulink.

1.4 – Estrutura da dissertação

Em conformidade com o exposto, além do presente capítulo introdutório, esta dissertação é composta pelas seguintes seções:

CAPÍTULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesse capítulo, são abordados os fundamentos teóricos sobre flutuação de tensão, as condições causadoras, os efeitos produzidos, bem como as soluções mitigadoras. Além disso, é desenvolvida a fundamentação teórica do funcionamento do reator a núcleo saturado, assim como a do arranjo obtido com a combinação de um banco de capacitores em paralelo com o RNS, formando, assim, o conhecido compensador estático a núcleo saturado.

CAPÍTULO III – MODELAGEM DO REATOR A NÚCLEO SATURADO NO SIMULINK E VALIDAÇÃO

Esse capítulo visa desenvolver a modelagem do RNS utilizando o programa computacional Simulink como alternativa para o modelo já implementado na plataforma ATP, até então utilizada nas mais diversas publicações para realização de estudos de desempenho do sistema sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente.

CAPÍTULO IV – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO COMPENSADOR SATURADO FRENTE À FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Esse capítulo tem como objetivo principal avaliar o desempenho do reator a núcleo saturado tipo *Twin-Tripler* no arranjo do compensador saturado, computacionalmente, frente a um sistema com variados níveis de flutuação de tensão e que tem como carga um laminador.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

Nesse capítulo são exibidas as reflexões conclusivas sobre o trabalho, com o propósito de sintetizar todo o desenvolvimento realizado e sugerir novos pontos de investigação para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ao fim, são apresentados os materiais bibliográficos empregados na elaboração desta dissertação de mestrado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 – Considerações iniciais

O presente capítulo destina-se a apresentar os fundamentos teóricos sobre flutuações de tensão, abordando os agentes causadores, os efeitos percebidos no sistema elétrico e a forma de quantificação e atenuação. Nesse contexto, serão expostas as características operacionais do equipamento elétrico – o reator a núcleo saturado *Twin-Tripler* – que são capazes de atuar na mitigação do referido distúrbio. Não obstante, em função da correlação intrínseca existente entre o fenômeno das flutuações de tensão e as componentes de tensão com frequências inter-harmônicas [1], surgiu inicialmente a necessidade de entendimento dos fundamentos elementares associados a essas componentes.

2.2 – Inter-harmônicas

Atualmente, o estudo das componentes inter-harmônicas tornou-se objeto de várias pesquisas na área de sistemas elétricos de potência, com o propósito de melhor conhecer o que ocasiona seu surgimento e o impacto de seus efeitos no sistema. Assim, a norma IEC 61000-2-2 [17] define e conceitua o termo inter-harmônicas como sendo frequências múltiplas não inteiras da frequência fundamental.

A Tabela 2.1 apresenta as definições matemáticas para inter-harmônicas e harmônicas de forma simples e efetiva.

Tabela 2.1. Definição matemática de inter-harmônicas e harmônicas

Componente	Definição matemática
Componente Contínua (CC)	$f = 0 \text{ Hz}$
Harmônica	$f = h \times f_1$
Inter-harmônica	$f \neq h \times f_1$
Sub-harmônica	$f > 0 \text{ Hz e } f < f_1$

Onde:

f_1 : frequência fundamental; e

h : número inteiro maior que zero.

O termo sub-harmônica, apesar de não ter definição oficial, é utilizado para representar as frequências inter-harmônicas com frequências menores que a fundamental e maiores que zero. Na literatura, tal fenômeno também é referido como frequência subsíncrona.

A Figura 2.1 exemplifica formas de ondas para as componentes fundamental, inter-harmônica, sub-harmônica e contínua.

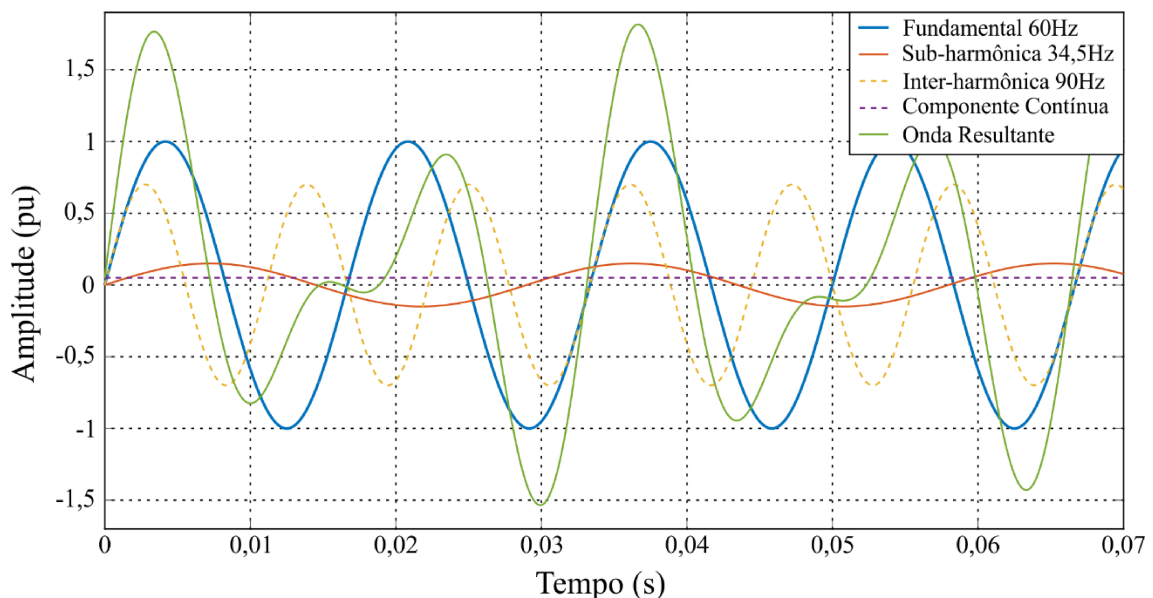


Figura 2.1. Formas de ondas típicas relacionadas às componentes fundamental, inter-harmônica, sub-harmônica e contínua

Ao analisar um sistema elétrico que apresenta componentes inter-harmônicas, seja na tensão e/ou na corrente, é possível determinar, via de regra, que as cargas que produzem esses sinais apresentam características particulares, como as seguintes:

- variações abruptas na amplitude da corrente e/ou tensão ao longo da operação da carga, como constatado em laminadores, máquinas de soldas, fornos a arco, entre outros; e
- chaveamento dos sinais de tensão ou corrente por meio de equipamentos de eletrônica de potência, a uma frequência não sincronizada com a fundamental da rede elétrica, como os cicloconvertidores (que convertem a corrente alternada em uma frequência ajustável), lâmpadas fluorescentes compactas, inversores de frequência (utilizados para controle de velocidade de motores) etc.

2.3 – Flutuação de tensão

O fenômeno da flutuação de tensão pode ser descrito como sendo uma variação aleatória ou repetitiva do envoltório da tensão devido a mudanças bruscas e imprevisíveis da potência ativa e reativa solicitada por uma carga. O tipo de carga, a magnitude da sua potência nominal ou de operação e o nível de curto-circuito do sistema são fatores que influenciam na característica da flutuação de tensão.

A Figura 2.2 ilustra um exemplo de forma de onda de uma tensão que apresenta flutuação em sua amplitude, devido à operação intermitente ou de natureza oscilatória de uma carga. A frequência com a qual a amplitude da tensão ($\Delta V/V\%$) varia, ou seja, a frequência do envelope de tensão, é referida como sendo a frequência da variação de tensão [18]. Aqui, dois parâmetros importantes caracterizam o fenômeno: a frequência e a amplitude de flutuação.

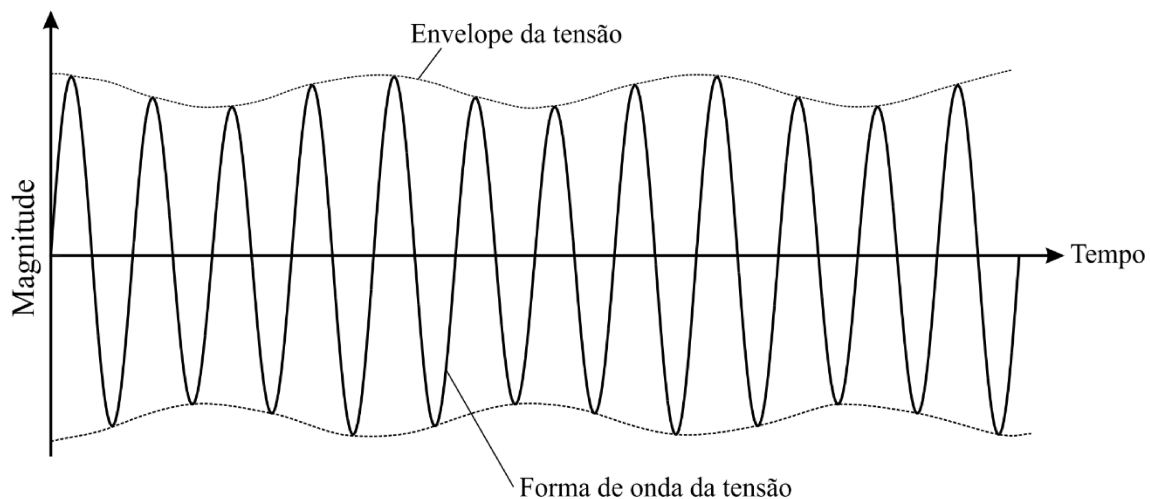


Figura 2.2. Flutuação de tensão com variação senoidal do envelope

A Figura 2.2 apresenta uma variação senoidal do envelope de tensão; todavia, esse envoltório pode apresentar-se de forma retangular ou irregular, dependendo da corrente solicitada pela carga, como mostra a Figura 2.3.

A flutuação de tensão pode ser classificada em quatro tipos diferentes, a fim de facilitar a aplicação das metodologias existentes. Em ensaios laboratoriais de conformidade de equipamentos e dispositivos, são utilizadas estas classificações [1], [19] e [20]:

- tipo A: nesse tipo, estão as flutuações utilizadas na calibragem dos equipamentos *flickermeters*. São caracterizadas por uma série repetitiva de variações retangulares em torno de um nível de tensão de referência, tendo um período composto por duas variações em sentidos opostos. Assim, somente poderá haver variações em sua amplitude e sua frequência, uma vez que sua forma (retangular) está definida;
- tipo B: são flutuações pelas quais não se define um ciclo ou período para as variações, pois são compostas por uma série irregular de variações bruscas. A partir dessas características de degraus sucessivos, decrescentes ou crescentes

de tensão, é possível associá-las à entrada ou à saída de cargas por etapas, como em elevadores, laminadores, prensas etc.

- tipo C: essas flutuações podem ser bruscas (retangular), em rampa (triangular) ou oscilatórias (senoidal), resultando em uma série irregular de variações de formas diversas, ou seja, não se define a forma nem o período da variação. Esse tipo reproduz a combinação de diferentes cargas, tais como motores, prensas, compressores, bombas, elevadores etc.
- tipo D: são flutuações constituídas por variações contínuas e aleatórias, comumente causadas pela operação de equipamentos como fornos a arco e máquinas de solda elétrica. De forma geral, devido à grande capacidade dos fornos a arco (até 120MW), o impacto das flutuações pode alcançar o sistema de transmissão e propagar-se aos sistemas de subtransmissão e de distribuição regional.

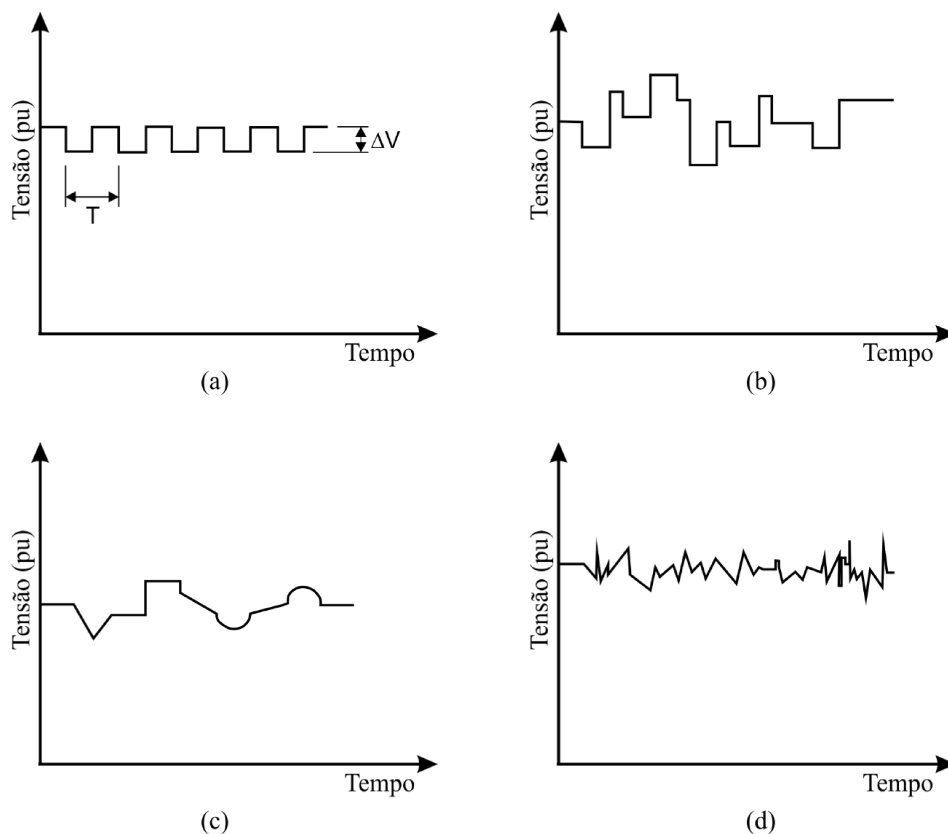


Figura 2.3. Tipos de flutuação de tensão: (a) tipo A, (b) tipo B, (c) tipo C e (d) tipo D [19]

Geralmente, as perturbações na tensão causadas por uma carga não serão percebidas isoladamente por apenas um consumidor, sendo estas propagadas a jusante e a montante de onde se originaram, podendo percorrer todo o sistema de distribuição e afetar vários consumidores. Alguns dos efeitos causados manifestam-se das seguintes formas [1]:

- falha de comutação e geração de componentes de frequências inter-harmônicas em retificadores e inversores;
- redução da eficiência de equipamentos de aquecimento, como estufas e fornos a arco ou indução;
- interferência em sistemas de telecomunicação;
- aquecimento adicional dos condutores e de máquinas elétricas em virtude do incremento das perdas joulicas; e
- saturação de transformadores de corrente.

A flutuação de tensão também pode causar acionamento indevido de relés, interferência em equipamentos de comunicação e desligamento em dispositivos eletrônicos. Quando severas, as flutuações de tensão podem ocasionar a “não partida” de carga devido à baixa tensão. Além disso, os motores de indução que operam em torque máximo podem parar o funcionamento se as flutuações de tensão atingirem magnitudes significativas [18].

O método utilizado para quantificar o fenômeno da flutuação de tensão baseia-se na quantificação da cintilação luminosa, de acordo com as definições da norma IEC 61000-4-15 [2]. Essa norma propõe indicadores como sensação instantânea de *flicker* (S_f), severidade de *flicker* de curta duração (P_{st} – *Probability short term*) e severidade de *flicker* de longa duração (P_{lt} – *Probability long term*) para expressar o grau de intensidade de tal fenômeno.

A sensação instantânea de *flicker* (S_f) está relacionada à variação do fluxo luminoso devido à modulação do valor eficaz da tensão, sendo que um valor unitário (1pu) para S_f expressa o limite de perceptividade da variação do fluxo luminoso para a maioria dos observadores, podendo causar incômodo e irritação quando excede esse valor. A percepção visual da cintilação luminosa ocorre na faixa de modulação de tensão de 0 a 30Hz, sendo a máxima percepção em 8,8 Hz.

Devido à natureza estocástica do Efeito Flicker produzido por algumas cargas, os valores de S_f podem variar ampla e aleatoriamente, tornando necessária a utilização de uma ferramenta estatística, acompanhada de uma função probabilidade capaz de relacionar tais variações aos níveis de sensação de cintilação luminosa e seus correspondentes percentuais de duração sobre o período de observação, resultando nos indicadores Pst e Plt , que representam o comportamento estatístico da S_f [1], [18] e [21].

2.3.1 – Causas das flutuações de tensão nos sistemas elétricos

As causas do fenômeno da flutuação de tensão em sistemas elétricos estão relacionadas a duas situações distintas, a saber:

- operação de cargas que solicitam da rede potências ativa e reativa com alterações bruscas e rápidas; e
- presença de sinais de corrente ou tensão que apresentam componentes inter-harmônicas na sua constituição.

A primeira causa de flutuação de tensão pode ser determinada pela solicitação aleatória e brusca de corrente por cargas conectadas ao sistema elétrico, como ocorre, por exemplo, em fornos a arco, máquinas de solda, laminadores, prensas, entre outros. Com o propósito de elucidar o assunto, a Figura 2.4 expressa a impedância equivalente de um sistema elétrico por meio de um circuito simplificado, ou seja, a impedância de curto-

circuito, a fonte de tensão supridora e uma carga com as características descritas anteriormente.

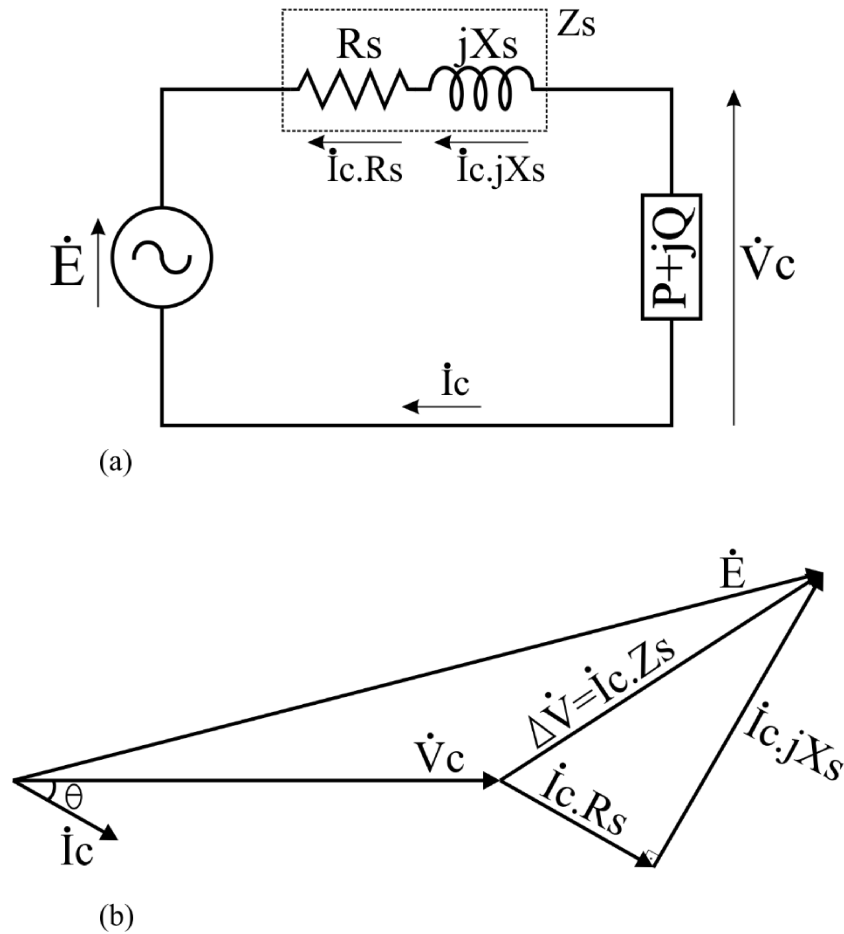


Figura 2.4. Sistema elétrico: (a) circuito simplificado e (b) diagrama fasorial

Onde:

$\Delta \dot{V}$: queda de tensão;

\dot{E} : tensão na fonte;

\dot{V}_c : tensão nos terminais da carga;

θ : ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente;

\dot{I}_c : corrente da carga;

Z_s : impedância equivalente do sistema;

R_s e jX_s : resistência e reatância equivalente do sistema; e

P e Q : potências ativa e reativa da carga, respectivamente.

Analisando o circuito da Figura 2.4(a), é possível extrair as equações (2.1) e (2.2), que expressam matematicamente a queda de tensão percentual frente às variadas

condições de carregamento da carga de comportamento flutuante. A presente queda de tensão percentual está exposta na forma fasorial na Figura 2.4(b).

$$\Delta V = R_S \cdot I_C \cdot \cos \theta + jX_S \cdot I_C \cdot \sin \theta \quad (2.1)$$

$$\frac{\Delta V}{V_C} = R_S \cdot \frac{P}{V_C^2} + jX_S \cdot \frac{Q}{V_C^2} \quad (2.2)$$

A análise de sistemas elétricos de média e alta tensão permite observar que a magnitude da reatância equivalente do sistema é muito maior que a da resistência equivalente, portanto, $X_S \gg R_S$. Além disso, em condições normais de operação, a tensão $V_C \cong E_{(pu)}$. Sendo assim, é possível simplificar a equação (2.2) da seguinte forma:

$$\frac{\Delta V}{E} \cong X_S \cdot \frac{Q}{E^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta V}{E} \cong \frac{Q}{S_{CC}} \quad (2.3)$$

Onde:

S_{CC} : potência de curto-circuito nos terminais da carga

A partir de (2.3), torna-se evidente que as flutuações de tensão estão fortemente relacionadas à variação da potência reativa solicitada pela carga variável.

De acordo com as solicitações de carregamentos impostos pelas cargas, o valor de ΔV pode representar uma queda de tensão constante ao longo do tempo ou, então, pode assumir a forma de uma flutuação de tensão com variações em sua amplitude ao longo do tempo. Esses dois tipos de comportamento de ΔV apresentam efeitos bastante distintos, sendo os associados às flutuações de tensão, de uma forma geral, os mais impactantes para o sistema elétrico. Nessa conjuntura, somente os efeitos e causas associados a flutuações de tensão serão abordados no presente capítulo.

A segunda causa associada ao fenômeno da flutuação de tensão é a presença de componentes inter-harmônicas nos sinais de tensão e corrente no sistema. Essas

componentes estão relacionadas a alguns tipos de cargas, como fornos a arco, máquinas de solda, laminadores etc. A sobreposição de sinais de frequências diferentes, como, por exemplo, um sinal com a frequência fundamental e outros com frequências inter-harmônicas, resulta na modulação da forma de onda, como representado na Figura 2.5. Dessa forma, torna-se evidente que a presença de componentes inter-harmônicas gera o fenômeno da flutuação de tensão no sistema.

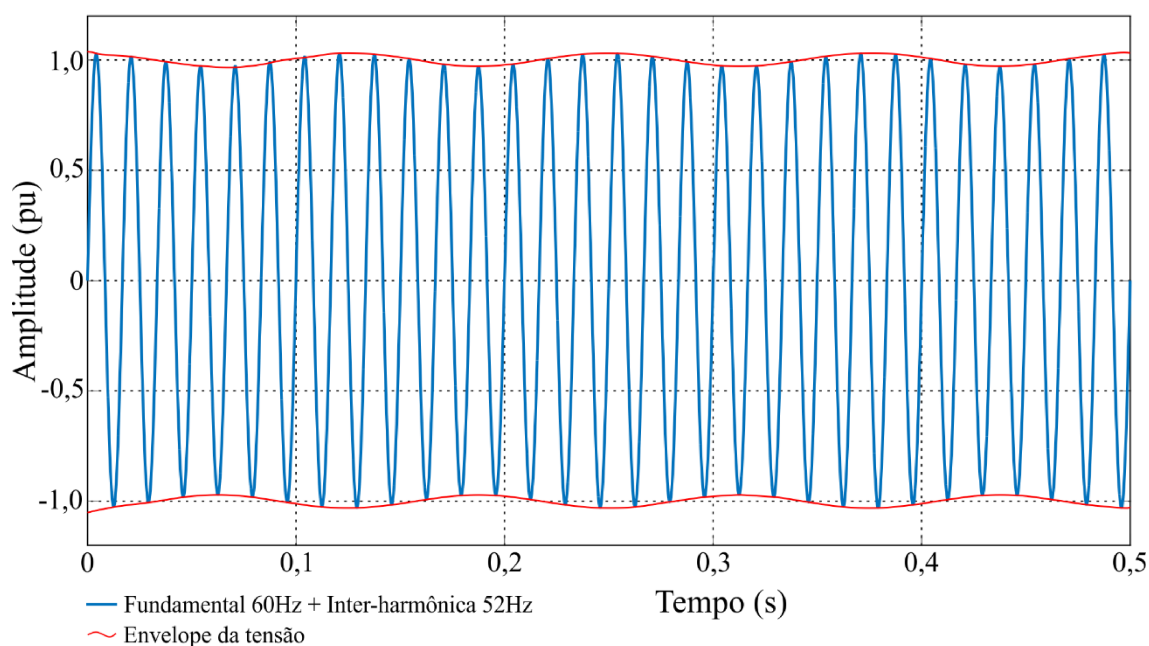


Figura 2.5. Sinal de frequência fundamental com a presença de componentes inter-harmônicas

As referências [1], [22] e [23] apresentam maiores informações sobre os tipos de cargas que produzem componentes inter-harmônicas, assim como informações sobre como identificá-las em um sinal de corrente e/ou tensão real de um sistema elétrico.

2.3.2 – Estratégias para a atenuação da flutuação de tensão

Com o propósito de mitigar os principais distúrbios causados pela flutuação de tensão, é possível lançar mão de variadas soluções existentes. Dentre elas, estão [1] e [20]:

- aumento do nível de curto-circuito;

- instalação de compensadores estáticos e autocomutados; e
- instalação de reatores a núcleo saturado.

Assim, a forma mais adequada para determinada instalação depende dos tipos de efeitos observados, da precisão desejada e, principalmente, do custo financeiro envolvido na implantação da solução.

Como o propósito desta dissertação é a análise de desempenho do reator a núcleo saturado frente à flutuação de tensão, a seguir será exposto seu princípio de funcionamento, destacando seu comportamento na atenuação do referido distúrbio.

2.4 – Reator a núcleo saturado

O dispositivo elétrico conhecido como reator a núcleo saturado (RNS) exhibe grande similaridade com os transformadores de potência no que tange a suas propriedades físicas e seus aspectos construtivos. Porém, os transformadores operam, de um modo geral, na região tida como linear da curva de operação, ao passo que os reatores a núcleo saturado, como o próprio nome sugere, demonstram um comportamento intensamente não linear, trabalhando na região de saturação da sua curva de operação. A Figura 2.6 evidencia as diferenças operacionais impostas pelos dois equipamentos acima referidos quanto às questões atreladas ao nível de magnetização explorado.

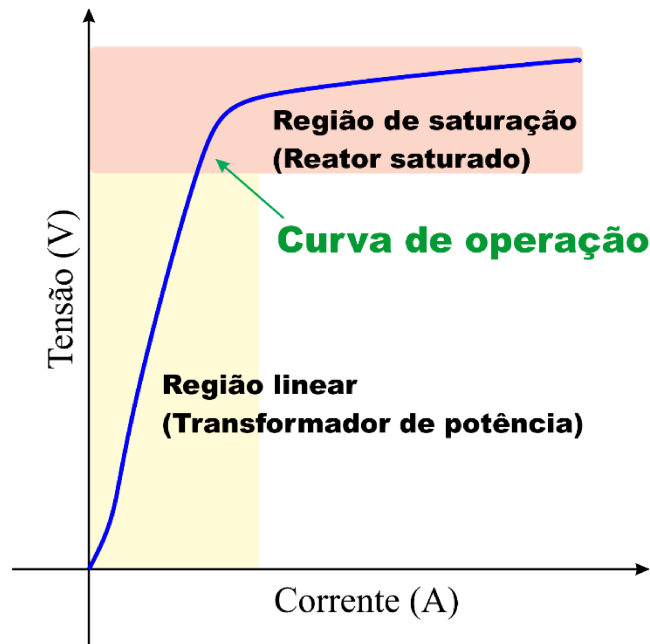


Figura 2.6. Curva de operação de equipamentos eletromagnéticos

O reator saturado é um equipamento eletromagnético amplamente difundido para a regulação de tensão, pois é eficaz e robusto e não requer a construção de cabines elétricas e/ou subestações cobertas ou blindadas para ser alocado, o que demanda um investimento financeiro relativamente baixo se comparado com equipamentos reguladores que utilizam eletrônica de potência. Via de regra, existem dois tipos de tecnologia empregada para regulação de tensão:

- princípio da compensação direta [24] e [25]; e
- princípio da compensação indireta [26] e [27].

Nesta última categoria, estão os equipamentos em que o processo de regulação encontra sustentação no controle da potência reativa, princípio este utilizado pelo regulador RNS.

Além das vantagens descritas anteriormente, o reator saturado apresenta uma característica pouco atrativa de introduzir apreciáveis níveis de correntes harmônicas no sistema ao qual se encontra conectado, por se tratar de uma carga com característica não linear. Objetivando atenuar tais efeitos negativos, foram desenvolvidas várias

configurações de dispositivos trifásicos para reduzir o conteúdo harmônico das correntes. Por esse motivo, a busca por soluções que contribuam para a redução dos níveis de distorções harmônicas produzidas pelo equipamento constitui um tema de extrema relevância para o domínio da tecnologia de construção de reatores saturados.

De fato, reconhecem-se várias topologias construtivas objetivando a solução do problema, utilizando-se, para tanto, das mais variadas combinações de conexão entre enrolamentos e disposição de núcleos possíveis. A mais conhecida delas consiste no emprego dos arranjos de reatores denominados por reatores tipo *Twin-Tripler* (ou 12 pulsos) [14], [26] e [28]. Sua forma física construtiva pode ser vista na Figura 2.7, a qual evidencia uma composição associada com a combinação de 12 bobinas, divididas em bobinas principais e auxiliares, e agrupadas como indicado. O núcleo ferromagnético é composto por duas unidades, cada qual formada por três colunas, de forma semelhante aos transformadores trifásicos.

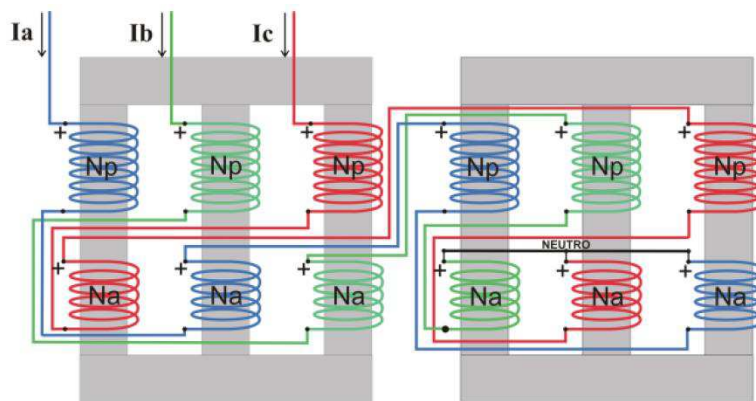


Figura 2.7. Reator *Twin-Tripler* trifásico com núcleos separados [15]

Assim, vale aqui ressaltar que, como amplamente divulgado na literatura, no arranjo em questão, as correntes harmônicas sofrem uma expressiva redução das componentes injetadas na rede de conexão, as quais são definidas pela expressão $(12k \pm 1)$, sendo k um número inteiro positivo. Assim sendo, apenas as ordens harmônicas 11,

13, 23, 25... são, sob condições ideais de operação, inseridas no barramento ao qual se encontra ligado o reator.

Nesse contexto, lançando mão novamente da curva *V versus I* do reator saturado, ilustrada na Figura 2.8, é possível constatar que, na região de saturação, a curva está quase plana, e o reator pode drenar do sistema grandes variações de corrente devido a pequenas variações de tensão.

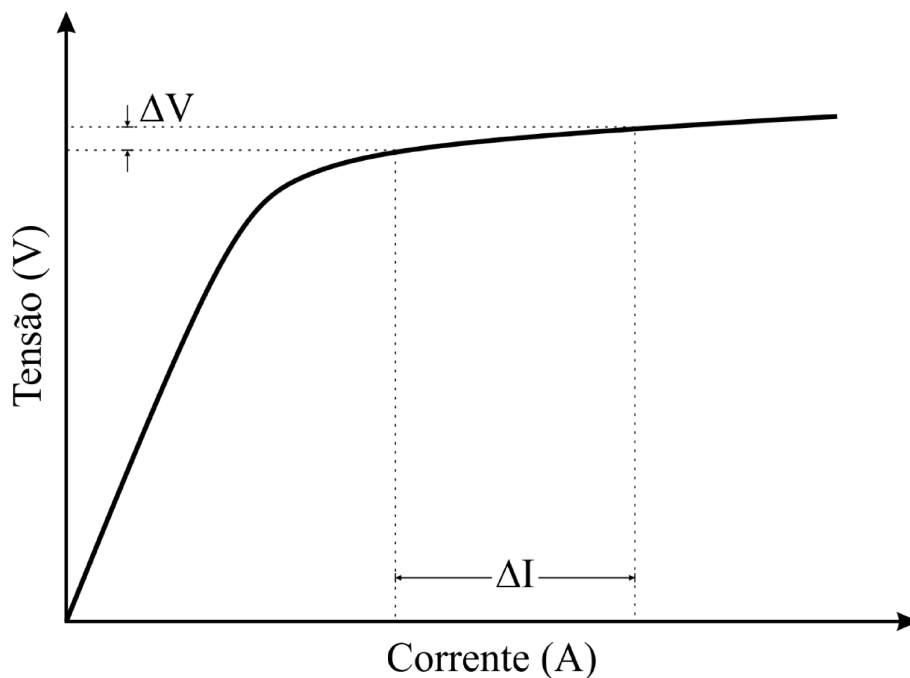


Figura 2.8. Curva *V versus I* do reator saturado

Uma das causas de flutuação de tensão é a variação brusca e repentina da magnitude da potência reativa da carga, o que implica no acréscimo ou no decréscimo da tensão do barramento, como expresso pela equação 2.3. O reator pode facilmente drenar mais ou menos corrente para variar ΔV de forma a manter a tensão no barramento constante, resultando, assim, na atenuação da flutuação de tensão.

2.4.1 – Compensador estático a núcleo saturado

O compensador estático a núcleo saturado é constituído pela combinação de um banco de capacitores em paralelo com um reator a núcleo saturado. Devido à não linearidade da curva de magnetização do material do núcleo do reator, o compensador, quando submetido a uma elevação de tensão, é conduzido a operar em um nível maior de saturação, absorvendo potência reativa do sistema e contribuindo para a redução da tensão no barramento. Em caso contrário, quando há uma redução na tensão supridora, o banco de capacitor fornece ao sistema potência reativa suficiente para reestabelecer a tensão a níveis considerados aceitáveis. O diagrama unifilar do compensador saturado e sua curva V versus I são expressos na Figura 2.9.

Neste trabalho, foi utilizado o arranjo do compensador sem a presença do banco de capacitores em série com o reator, que é responsável por corrigir o estatismo do reator, pois ele apresentou desempenho satisfatório na regulação de tensão durante as simulações mesmo sem a presença do referido equipamento.

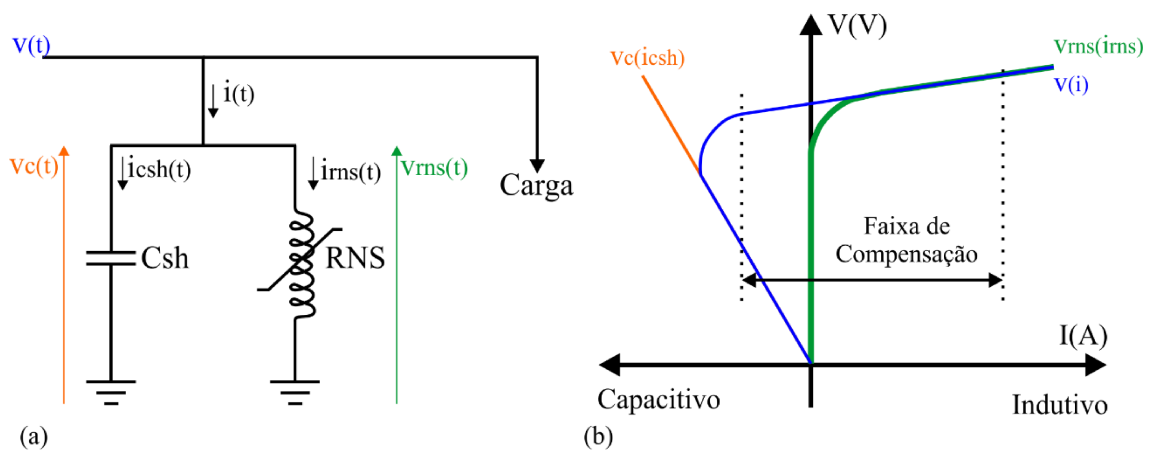


Figura 2.9. Compensador saturado: (a) Diagrama unifilar e (b) Curva V versus I

Onde:

$v(t)$: tensão no barramento;

$i(t)$: corrente do compensador saturado;

$v_c(t)$, $v_c(i_{csh})$ e $i_{csh}(t)$: tensão e corrente no capacitor *shunt*; e

$v_{RNS}(t)$, $v_{RNS}(i_{RNS})$ e $i_{RNS}(t)$: tensão e corrente no RNS.

Enfim, o compensador não necessita da utilização de qualquer controle externo por meio de dispositivos eletrônicos ou mecânicos, pois seu controle é inerente tão somente às características intrínsecas do arranjo ora expostas.

2.5 – Conclusão

Este capítulo apresentou os fundamentos teóricos referentes à flutuação de tensão. Identificaram-se duas causas para ocorrência desse fenômeno: operação de carga que solicita potência ativa e reativa da rede, com alterações bruscas e rápidas, e presença de componentes inter-harmônicas. Dentre os efeitos que podem ocorrer nessas situações estão cintilação luminosa, interferência em sistemas de comunicação, aquecimento, redução da eficiência de equipamentos elétricos, entre outros.

Uma das formas de mitigar os problemas causados pela flutuação de tensão é o uso de um regulador de tensão composto de um banco de capacitores associado a um reator a núcleo saturado, conhecido como compensador estático a núcleo saturado. Este capítulo, então, apresentou um arranjo específico (*Twin-Tripler*) para o RNS com o intuito de reduzir as distorções harmônicas produzidas pelo equipamento.

CAPÍTULO III

MODELAGEM DO REATOR A NÚCLEO SATURADO NO SIMULINK E VALIDAÇÃO

3.1 – Considerações iniciais

O objetivo do presente capítulo está centrado na análise de uma proposta de modelagem do RNS, utilizando o programa computacional Simulink para realização de estudos de desempenho do sistema sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente. Esse recurso computacional apresenta-se como uma ferramenta robusta e versátil para simulação de sistemas elétricos e representa uma alternativa atrativa para a plataforma ATP, até então utilizada em diversas publicações e estudos de desempenho dos compensadores estudados aqui [15] e [29].

3.2 – Modelagem do reator no programa Simulink

O programa Simulink é um aplicativo baseado num ambiente de simulação constituído por diagramas de blocos, funções de transferência e modelos de componentes diversos pré-existent [30], os quais viabilizam a representação da dinâmica do funcionamento de equipamentos e dispositivos eletroeletrônicos. Buscando meios de representar o referido regulador de tensão nessa plataforma, adotou-se a metodologia utilizada nos trabalhos [15] e [29], a qual consiste na caracterização de cada coluna

magnética dos núcleos do RNS por meio de um transformador saturável monofásico de dois enrolamentos e interconexões elétricas entre as bobinas para a configuração do arranjo de 12 pulsos. Assim, utilizou-se, neste trabalho, o modelo de transformador saturável monofásico disponível na biblioteca do programa, baseado no circuito elétrico equivalente típico de transformadores exemplificado na Figura 3.1.

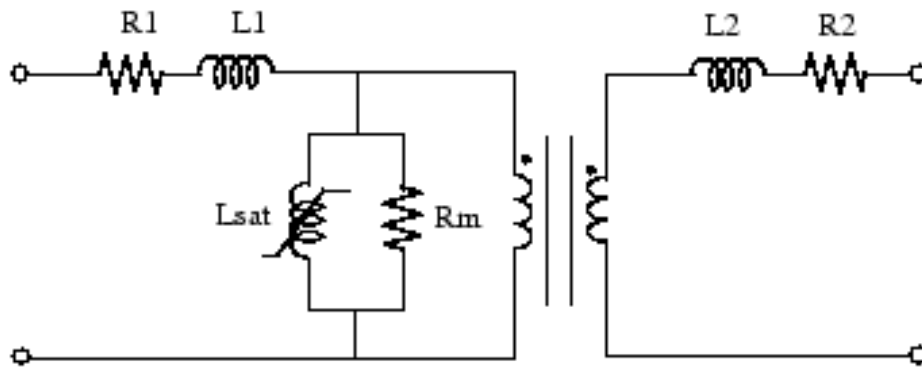


Figura 3.1. Circuito equivalente do transformador monofásico

Onde:

- $R1$ e $R2$: resistências dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente;
- $L1$ e $L2$: indutâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário;
- Rm : resistência do ramo de magnetização, representativa das perdas no ferro;
- $Lsat$: indutância do ramo de magnetização, determinada pela curva de magnetização característica do material magnético do núcleo.

A partir desse recurso pré-existente, a metodologia para representação de uma das colunas do reator baseia-se no conceito contemplado na Figura 3.2 e em sua respectiva tela de parametrização. Por meio da Figura 3.2(b), é possível visualizar os campos onde são inseridos os parâmetros referentes ao reator *Twin-Tripler*. Vale salientar que o modelo do transformador monofásico disponível no Simulink admite a implementação de mais um enrolamento, resultando em um transformador de três enrolamentos, bastando que se

alterem suas configurações. Entretanto, o modelo necessário para o propósito deste trabalho foi o de dois enrolamentos.

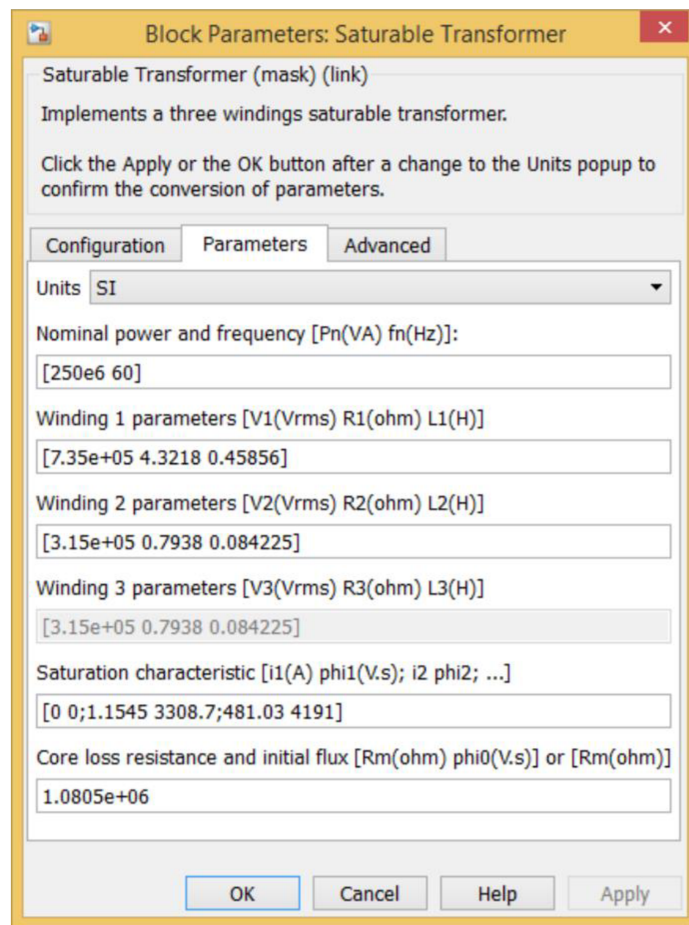
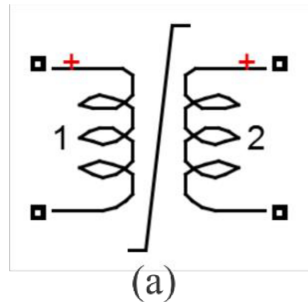


Figura 3.2. Estratégia para modelagem do reator saturado no Simulink: (a) Bloco do transformador monofásico e (b) Janela para parametrização do transformador/da coluna magnética

A curva de magnetização do material do núcleo, por sua vez, é representada pela relação entre a corrente de pico drenada pelo RNS (I_{pk}) e o fluxo concatenado nos enrolamentos (λ), sendo a metodologia para obtenção da curva reportada em [15]. A

inserção dos pontos referentes à relação $I_{pk} \times \lambda$ é feita no campo *Saturation characteristic*, da janela de parametrização do material magnético. A construção da curva de magnetização é realizada pelo programa por meio da interpolação linear entre os referidos pontos, o que resulta em um gráfico similar ao ilustrado na Figura 3.3.

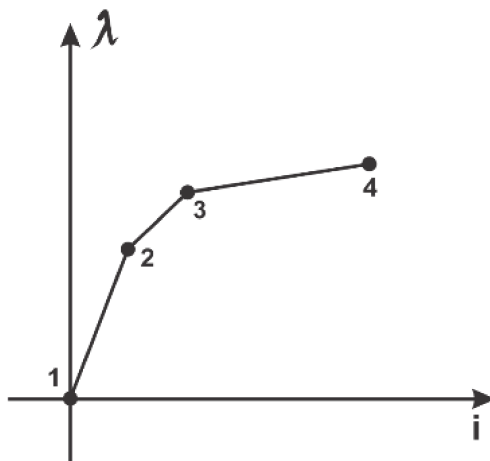


Figura 3.3. Curva de saturação representativa do núcleo magnético

Após a inserção da curva de magnetização e a parametrização dos enrolamentos presentes em uma das colunas do RNS *Twin-Tripler*, o arranjo completo foi obtido por meio da interligação elétrica entre os enrolamentos de cada coluna, como mostra a Figura 3.4.

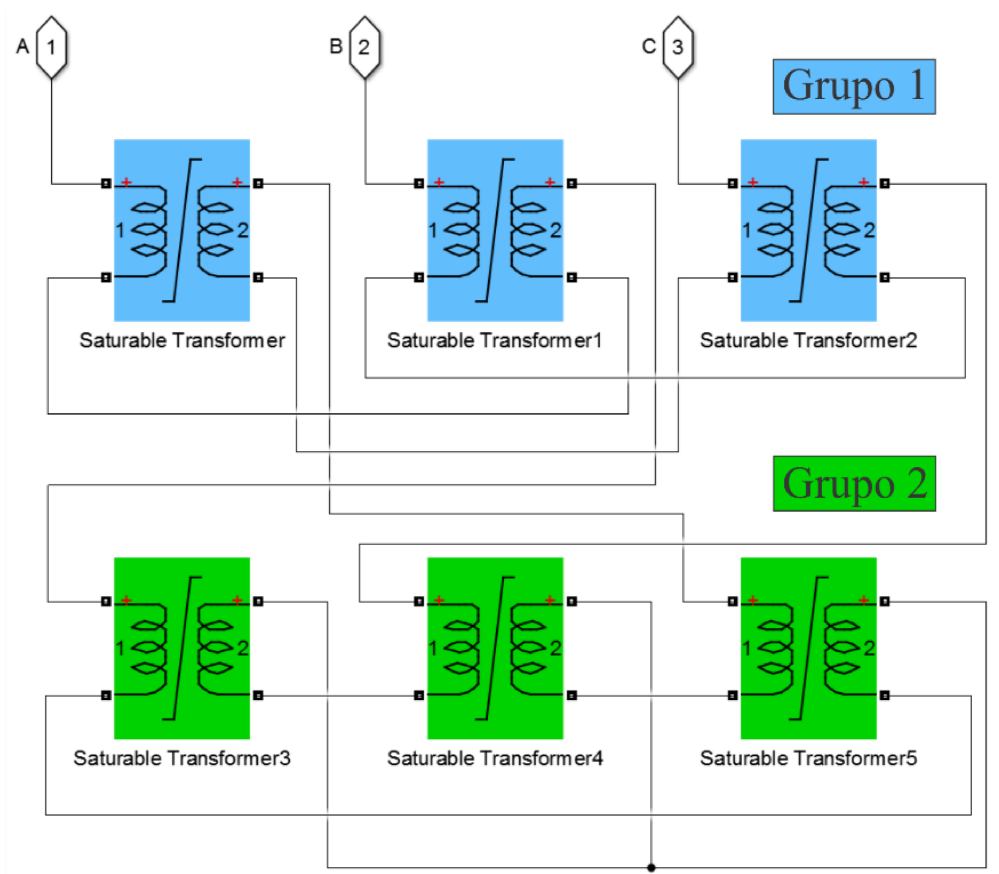


Figura 3.4. Modelo computacional do RNS *Twin-Tripler* no Simulink

O Grupo 1, na Figura 3.4, representa as colunas magnéticas e os enrolamentos do primeiro núcleo, enquanto o Grupo 2 refere-se às colunas e aos enrolamentos do segundo núcleo. Os enrolamentos identificados pelo número 1 na Figura 3.4 correspondem às bobinas principais, enquanto o número 2 está atrelado às espiras auxiliares. Para obtenção dos principais dados requeridos para a representação de um dado reator saturado, como resistências, indutâncias e tensões dos enrolamentos principal e auxiliar, além dos pontos da curva de magnetização, foi utilizado o *software* desenvolvido em [15].

3.3 – Caracterização do sistema elétrico

Com a intenção de avaliar o desempenho operativo do regulador de tensão RNS, adotou-se um circuito equivalente de um sistema elétrico radial de 13,8kV, bastante simplificado em sua composição, como indicado na Figura 3.5.

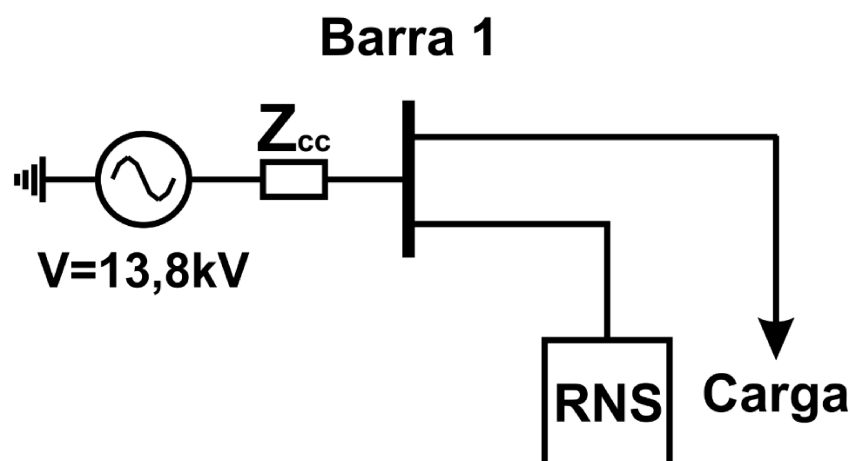


Figura 3.5. Diagrama equivalente do sistema elétrico utilizado para os estudos de desempenho do reator saturado

Nota-se que o arranjo é composto por uma fonte de tensão em série com uma impedância, representando o circuito equivalente de Thévenin de um sistema de 13,8 kV e potência de curto-circuito de 200 MVA. A carga conectada na barra 1 possui uma sazonalidade intrínseca, ou seja, apresenta variações significativas no carregamento durante seu período de funcionamento. Com isso, nos momentos em que o consumo de energia elétrica diminui, o barramento apresenta sobretensão, o que justifica o uso de um RNS nessa barra.

A potência solicitada pela carga apresenta uma variação ao longo do tempo total de estudo, como segue:

- num primeiro intervalo de tempo (de 0 a 0,5 s), tem-se a operação com a carga plena;
- na sequência (de 0,5 a 1 s), ocorre um súbito alívio de 80% do carregamento original; e
- por fim, no terceiro intervalo (a partir de 1 s), a carga retorna ao seu valor inicial.

3.4 – Estudo de desempenho do sistema com o reator saturado no Simulink

No estudo computacional realizado, foram analisadas tensões, correntes, potências e distorções harmônicas do RNS para as diversas etapas da operação do sistema elétrico, considerando-se, num primeiro momento, o funcionamento da rede sem a presença do RNS e, na sequência, estando ele inserido.

3.4.1 – Sistema sem a presença do regulador de tensão

O comportamento do sistema sem a presença do regulador de tensão quanto aos níveis de tensão é apresentado na Figura 3.6.

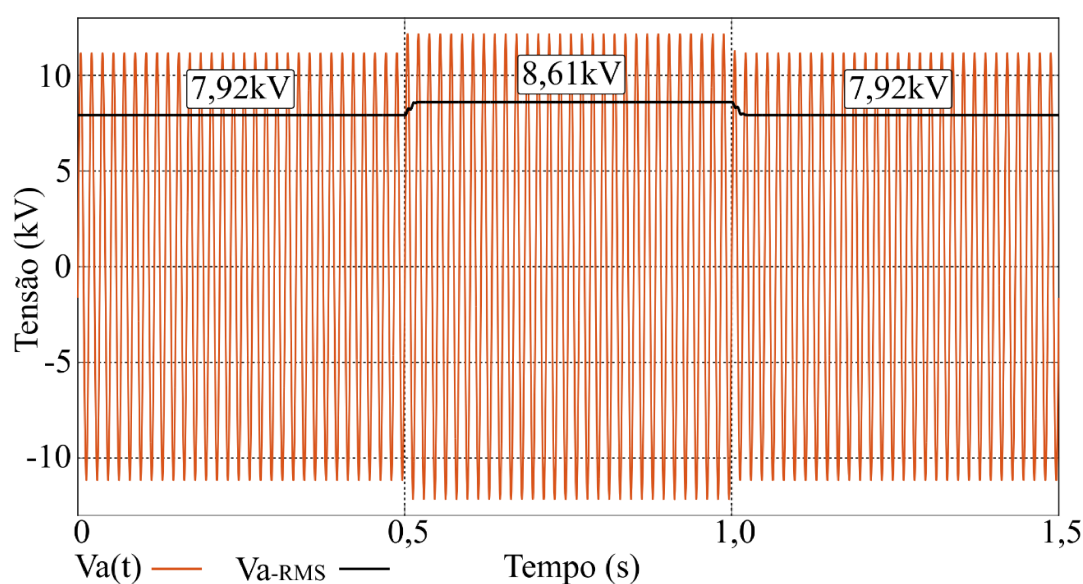


Figura 3.6. Tensão na barra 1 sem o RNS – Simulink

Durante os intervalos de tempo 0,0-0,5 s e 1,0-1,5 s, o sistema experimentou a condição de carga plena. Nessas condições, a tensão da barra 1 foi de 7,92 kV fase-neutro, valor este abaixo do nominal em cerca de menos de 1%. Já no intervalo 0,5-1,0 s, a condição de alívio de carga acarretou uma tensão de 8,61 kV fase-neutro, o que resultou

em um valor eficaz de 8,1% acima do nominal. Nesses termos, constatou-se uma violação dos limites preconizados.

3.4.2 – Sistema com a presença do regulador de tensão

Utilizando o modelo implementado no Simulink, apresentam-se, na sequência, os resultados computacionais obtidos para a operação do sistema descrito na Figura 3.5, acrescido do reator saturado. A Figura 3.7 ilustra o sistema implementado no Simulink com a presença do RNS.

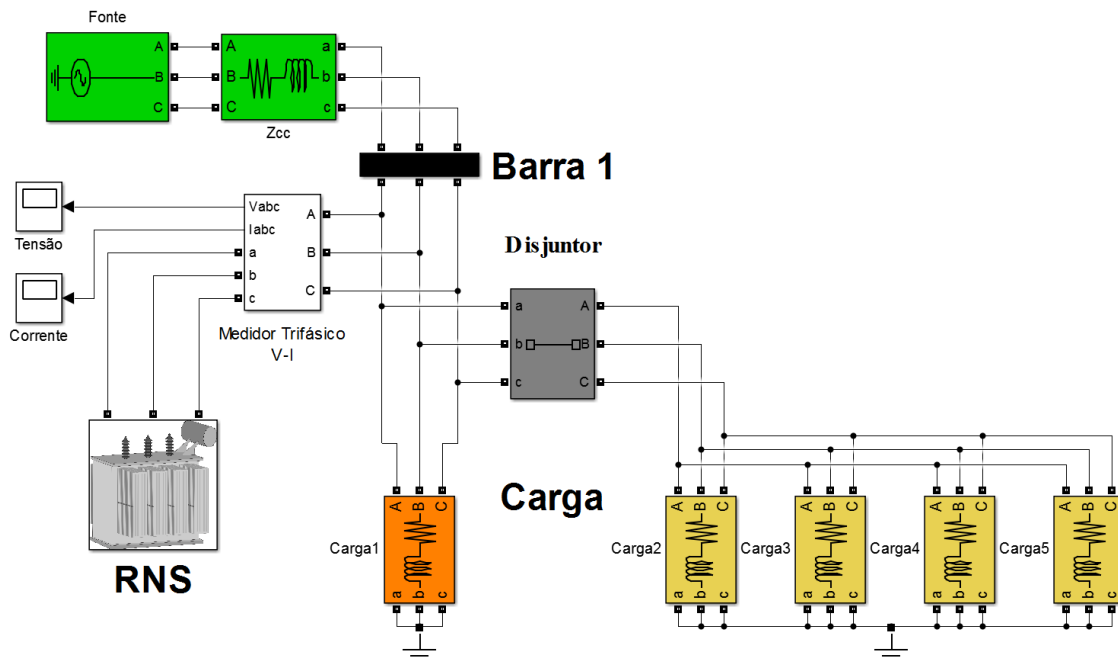


Figura 3.7. Diagrama de blocos do sistema elétrico no Simulink

Os resultados que expressam o funcionamento do conjunto formado pela rede, pela carga e pelo regulador são mostrados na Figura 3.8.

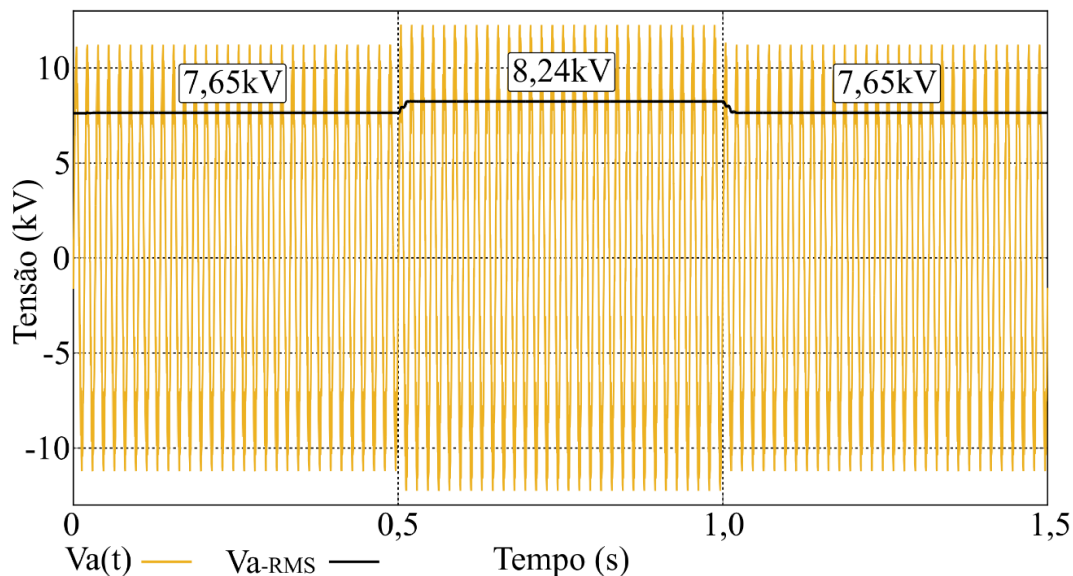


Figura 3.8. Tensão na barra 1 com o RNS – Simulink

Para o caso em questão, a tensão sob condição de carregamento pleno conduziu a um valor de 7,65 kV fase-neutro, portanto, cerca de 4% abaixo da nominal. Para a situação atrelada ao alívio de carga, com a presença do RNS, essa grandeza atingiu 8,24 kV fase-neutro, portanto, 3% acima da tensão nominal. Isso ratifica a eficácia do regulador em cumprir sua função quanto ao processo da compensação, mantendo os valores de tensão dentro dos exigidos pela norma [4].

A corrente consumida pelo reator foi de 56,78 A no intervalo de 0,0-0,5 s; e, no intervalo 0,5-1,0 s, foi de 75,41 A, como mostra a Figura 3.9. De fato, idealmente, o valor de 56,78 A foi relativamente elevado, o que se deve ao projeto físico do reator implementado. Não obstante, vale reconhecer que, sob a ação de uma tensão associada com a perda da carga, essa grandeza foi substancialmente incrementada para o atendimento ao requisito da regulação ora almejada.

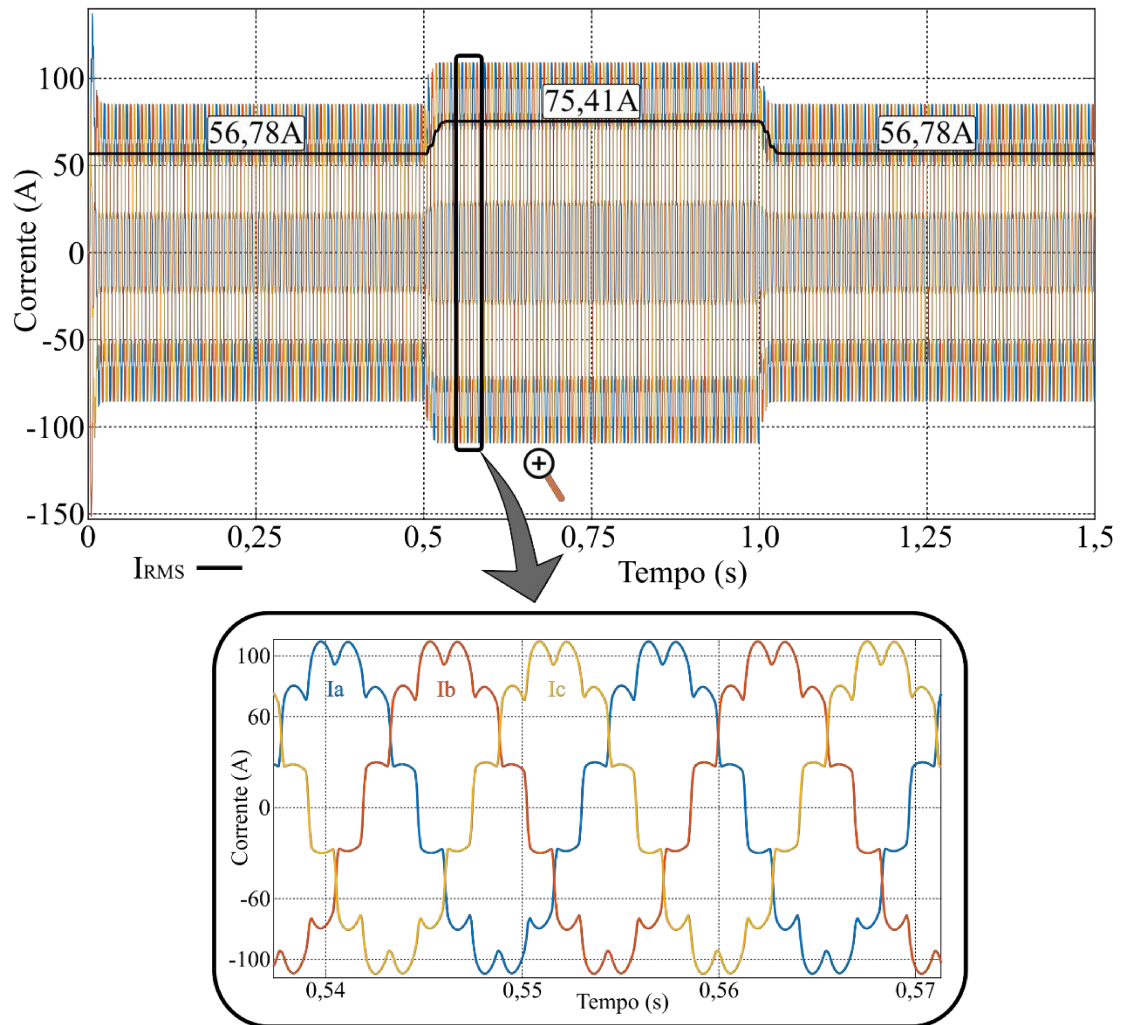


Figura 3.9. Corrente do reator ao longo do processo dinâmico – Simulink

Como já informado, a utilização de um reator com características não lineares apresenta-se como responsável pela geração de correntes harmônicas, as quais são parcialmente compensadas pelo arranjo físico empregado. O resultado encontrado para o espectro de frequências da corrente de operação do reator empregado durante o período de alívio de carga encontra-se indicado na Figura 3.10.

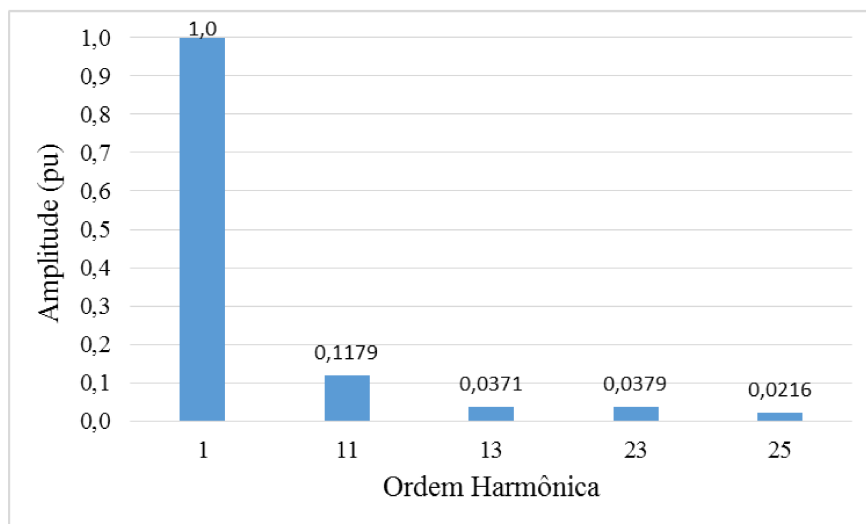


Figura 3.10. Espectro harmônico da corrente do reator saturado durante o processo de regulação –
Simulink

De acordo com a teoria, a tecnologia empregada pelo RNS para regular a tensão utiliza a absorção de potência reativa do sistema. O comportamento dessa grandeza ao longo do processo é mostrado na Figura 3.11.

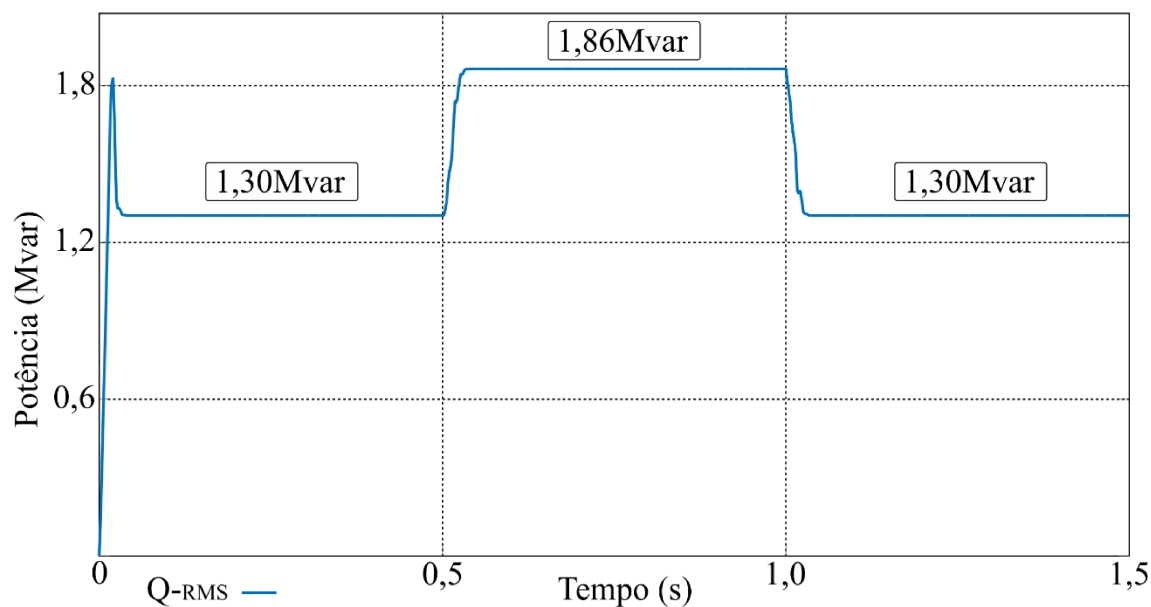


Figura 3.11. Potência reativa consumida pelo reator saturado ao longo do período de operação proposto –
Simulink

3.5 – Desempenho comparativo entre os modelos de reator saturado no Simulink e no ATP

Em consonância com a afirmativa feita no início deste trabalho, vale lembrar que o equipamento em pauta, desenvolvido por [15], já foi objeto de modelagem, simulação e validação na plataforma ATP. Portanto, o confronto comparativo entre a funcionalidade do modelo proposto com aquele já ratificado por experimentos em campo apresentou-se como uma etapa relevante para fins da confiabilidade da nova representação obtida.

Dentro dessa lógica, o mesmo sistema foi avaliado com base nos recursos disponibilizados no programa ATP. Para tanto, utilizou-se o modelo do RNS desenvolvido em [15]. A Figura 3.12 indica a implementação do alimentador, da carga e do reator na plataforma aqui explorada, sendo que a topologia, os parâmetros, as condições operativas e outras características são todas similares às aquelas já utilizadas.

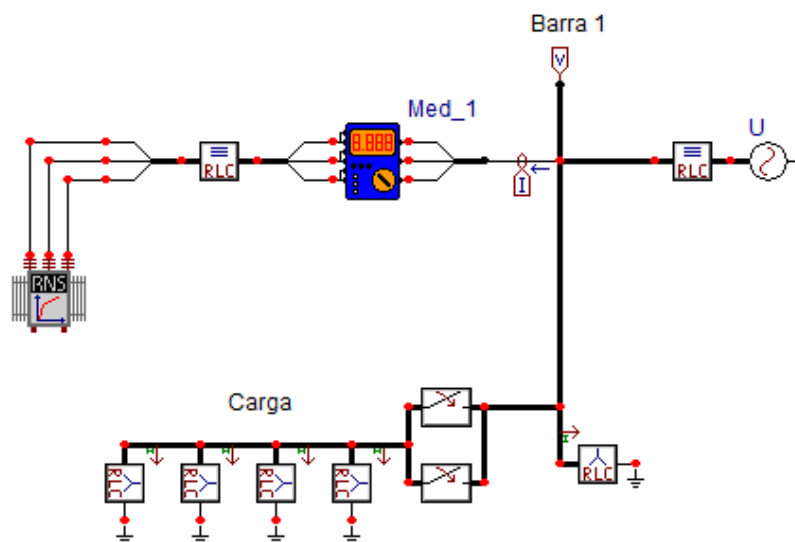


Figura 3.12. Sistema elétrico representado no ATP

Visando o processo comparativo entre as performances dos dois aplicativos, a Figura 3.13 mostra as formas de onda das tensões obtidas no ATP com a presença do reator saturado no circuito.

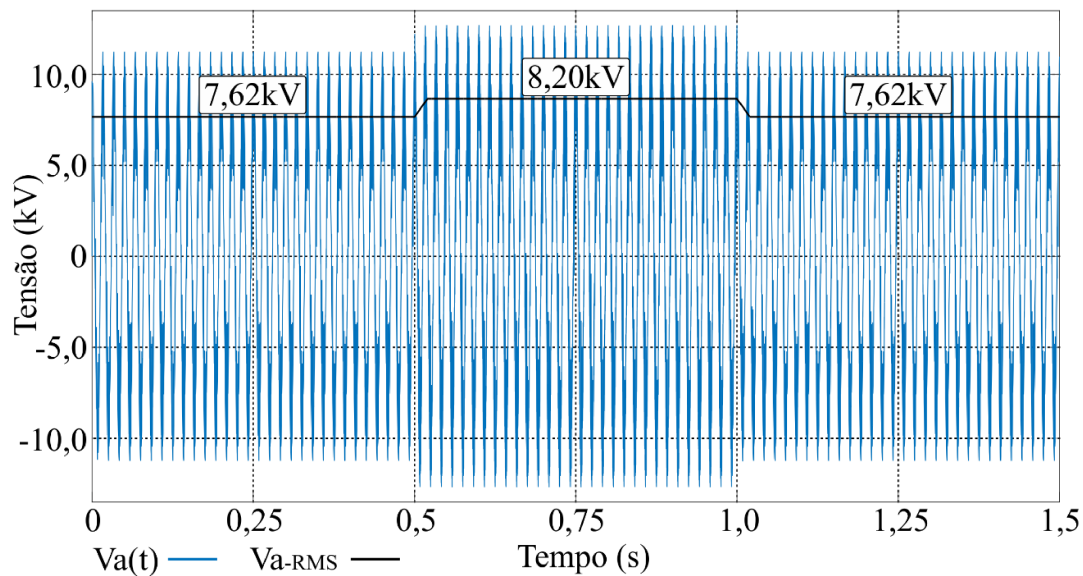


Figura 3.13. Tensão na barra 1 com o RNS – ATP

No intervalo 0,0-0,5 s, o valor eficaz obtido pelo ATP foi de 7,62 kV fase-neutro, representando, pois, um nível 4,4% menor que o nominal. Dessa forma, nota-se que o resultado é extremamente próximo ao fornecido pelo Simulink, que foi de 4%. Quando da redução da carga, a tensão eficaz determinada pelo ATP foi de 8,2 kV fase-neutro, correspondendo a um nível 2,9% acima do nominal. O valor fornecido pelo Simulink indicou uma tensão correspondente de 3% acima do nominal, mostrando mais uma vez que os resultados estão condizentes. A Figura 3.14 contempla tais comparações.

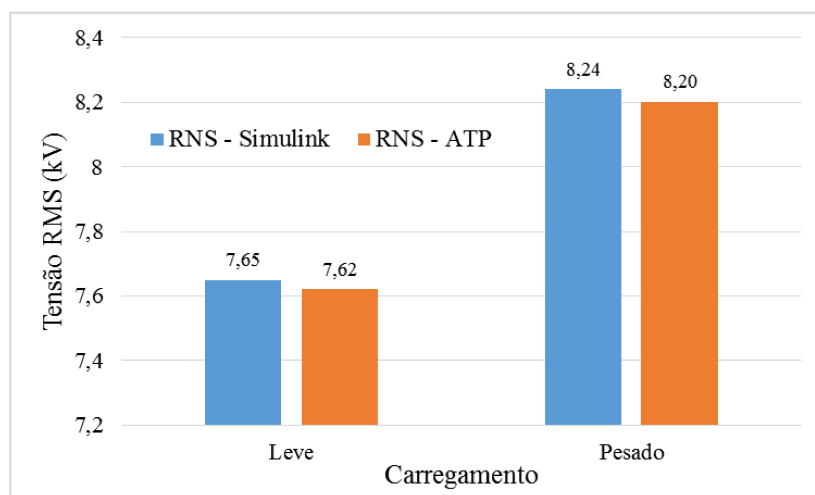


Figura 3.14. Comparação entre as tensões na barra 1 obtidas nos programas Simulink e ATP

A corrente drenada pelo RNS, sua forma de onda e seus valores eficazes, além das distorções harmônicas presentes, estão ilustradas na Figura 3.15. Constata-se, num primeiro momento, que os valores eficazes para as condições de carga nominal e subsequente alívio de 80% são de 59,31 A e 78,09 A, respectivamente.

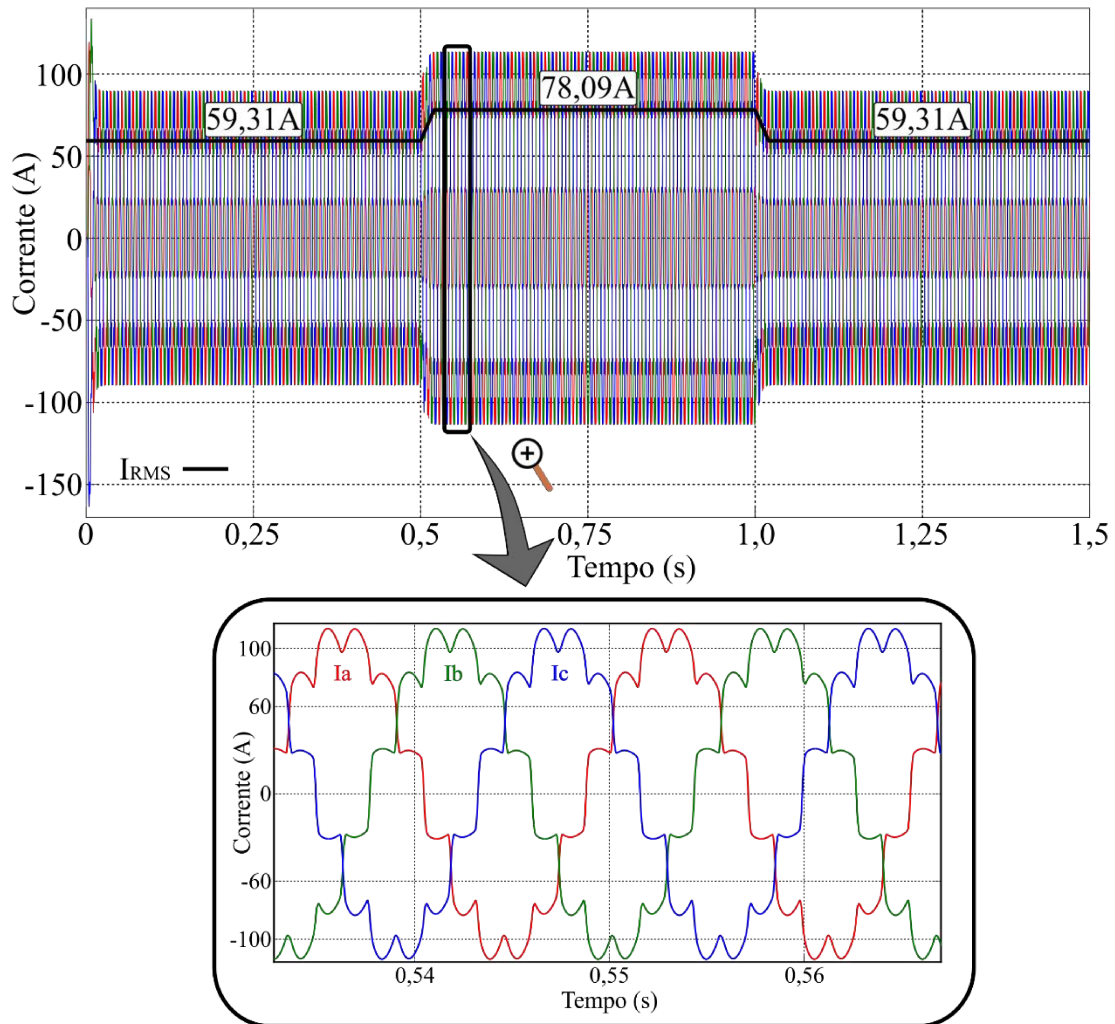


Figura 3.15. Corrente solicitada pelo reator saturado – ATP

No instante da rejeição de carga, o resultado para o espectro de frequências da corrente de operação do reator encontra-se indicado na Figura 3.16.

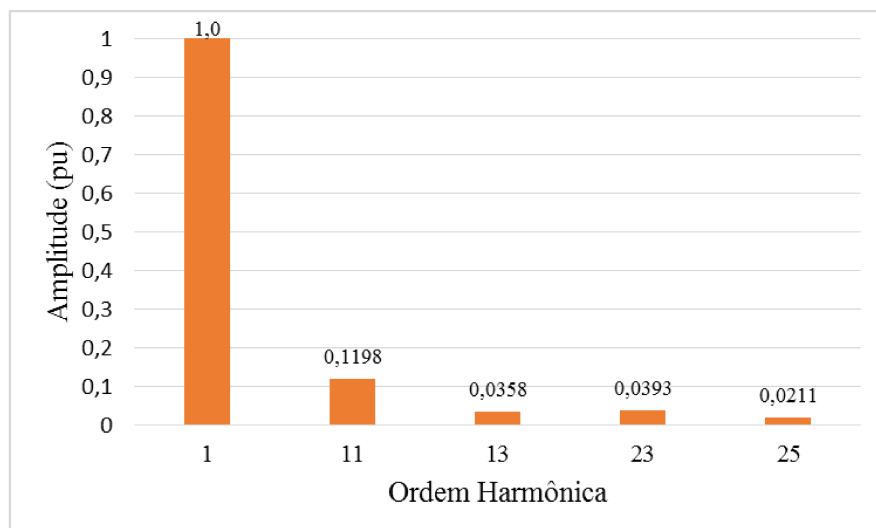


Figura 3.16. Espectro harmônico da corrente do reator saturado na atuação para o processo da regulação – ATP

Comparativamente às grandezas correspondentes fornecidas pelo Simulink, observa-se grande similaridade entre os valores eficazes da corrente, como apresenta a Figura 3.17.

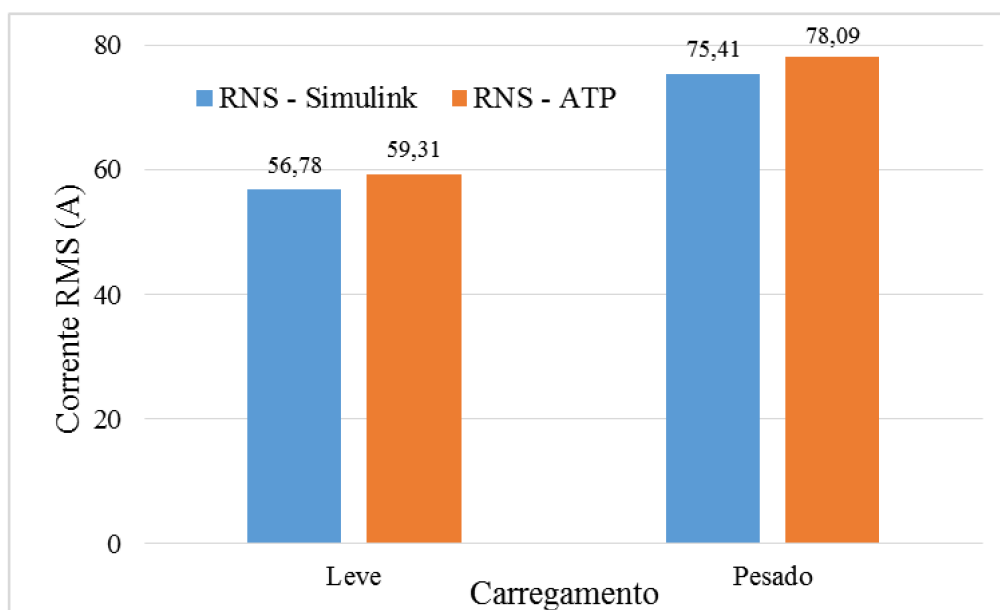


Figura 3.17. Comparação entre as correntes drenadas pelo RNS no Simulink e no ATP

A potência reativa absorvida pelo reator está expressa na Figura 3.18, em que se verifica, na condição inicial, um consumo de potência reativa de 1,37 Mvar, ao passo que, para a situação de alívio de carga, essa grandeza passa para 1,95 Mvar.

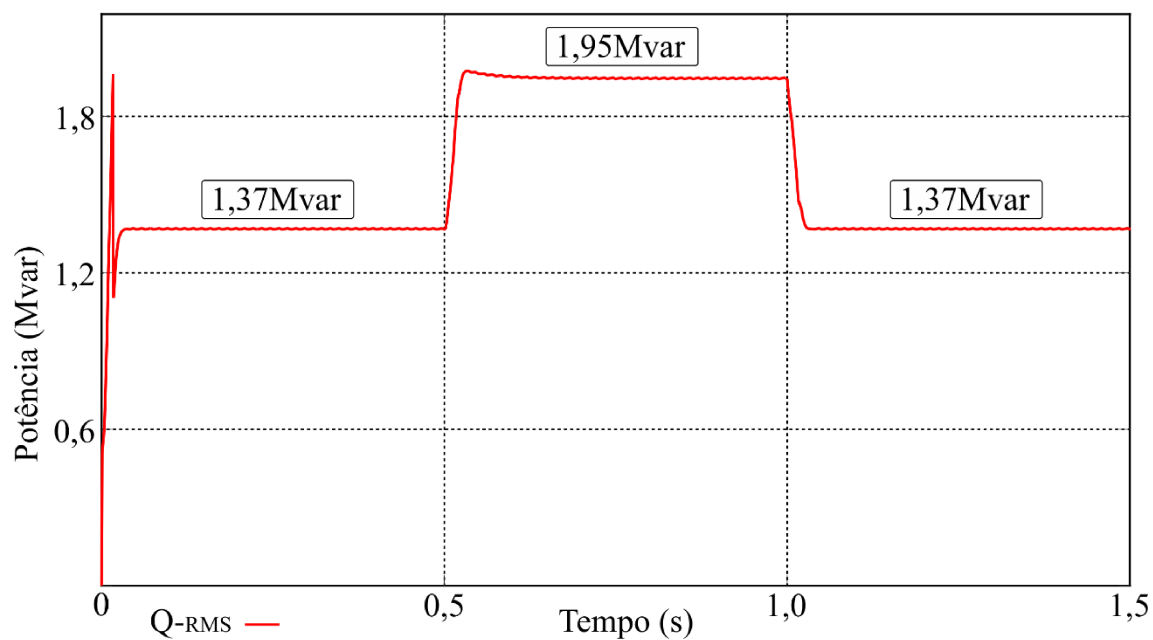


Figura 3.18. Potência reativa consumida pelo reator saturado ao longo do período de operação proposto – ATP

Mais uma vez constata-se uma correlação muito próxima entre os desempenhos advindos dos dois métodos para a simulação do sistema em pauta, como expressa a Figura 3.19.

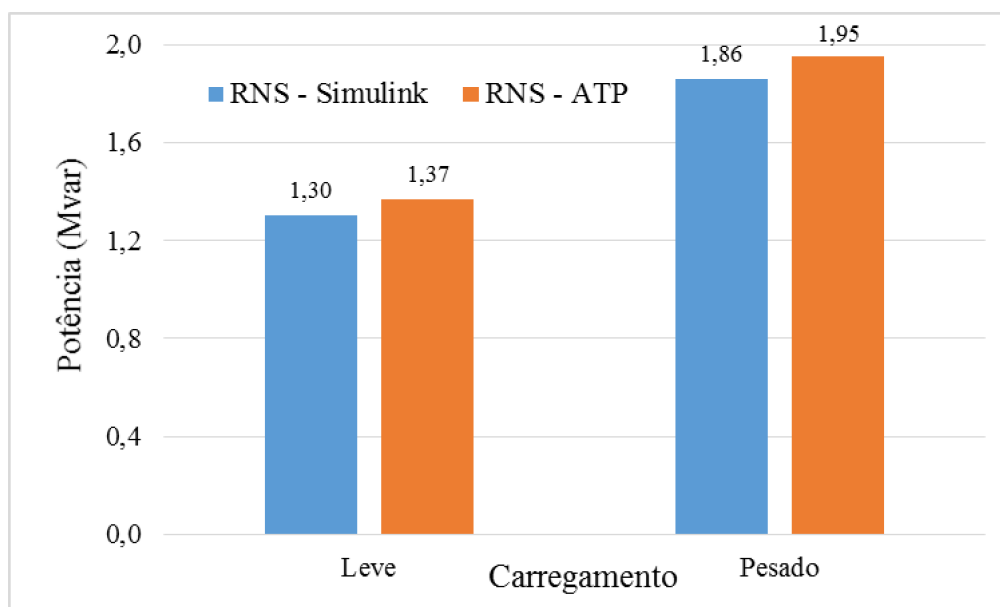


Figura 3.19. Comparação entre a potência absorvida pelo RNS no Simulink e no ATP

3.6 – Conclusão

Este capítulo foi centrado na proposição de uma estratégia alternativa para modelagem e estudo de desempenho dinâmico de sistemas elétricos com a inserção do regulador de tensão conhecido como reator a núcleo saturado do tipo *Twin-tripler*. A proposta foi utilizar o *software* Simulink, cujos atrativos e propriedades foram apontados ao longo do texto. Uma vez apresentadas as bases para a modelagem do RNS nessa plataforma, foram realizados estudos de desempenho utilizando-se um sistema elétrico simplificado, o qual foi submetido a fenômenos responsáveis por alterações e violações das tensões eficazes em relação à regulamentação existente.

A motivação maior para o capítulo apoia-se no fato de que trabalhos anteriores viabilizaram meios computacionais para os estudos focados no simulador ATP, o qual serviu como base comparativa para a verificação da eficácia da proposta feita. Uma pronta correlação entre os resultados das simulações efetuadas nos dois aplicativos evidenciou o sucesso do modelo implementado.

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO COMPENSADOR SATURADO FRENTE À FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

4.1 – Considerações iniciais

Após a elucidação dos conceitos teóricos sobre o distúrbio flutuação de tensão e a realização da modelagem e da validação do reator a núcleo saturado no programa Simulink, esta etapa do trabalho destinou-se à análise computacional de desempenho do compensador saturado, composto pelo arranjo do RNS tipo *Twin-Tripler* e por um banco de capacitores *shunt*, frente à mitigação da flutuação de tensão. Para tanto, selecionou-se um sistema elétrico hipotético simplificado que representa, de forma geral, um típico alimentador de uma concessionária de distribuição, a qual supre uma carga perturbadora.

Diante do exposto, tem-se como objetivo avaliar o sistema por meio dos indicadores de flutuação de tensão, sensação instantânea de *flicker* (S_f), que expressa a perceptividade da variação luminosa, e a severidade de *flicker* de curta duração (P_{st}), que

representa o comportamento estatístico do S_f [2] e [31] para as seguintes condições: sem a presença do compensador estático saturado e com a presença dele.

4.2 – Caracterização do sistema elétrico

Para avaliar o desempenho do compensador estático tipo reator saturado frente à mitigação da flutuação de tensão, utilizou-se um sistema simplificado hipotético que representa um alimentador típico de uma concessionária de distribuição, como apresentado na Figura 4.1.

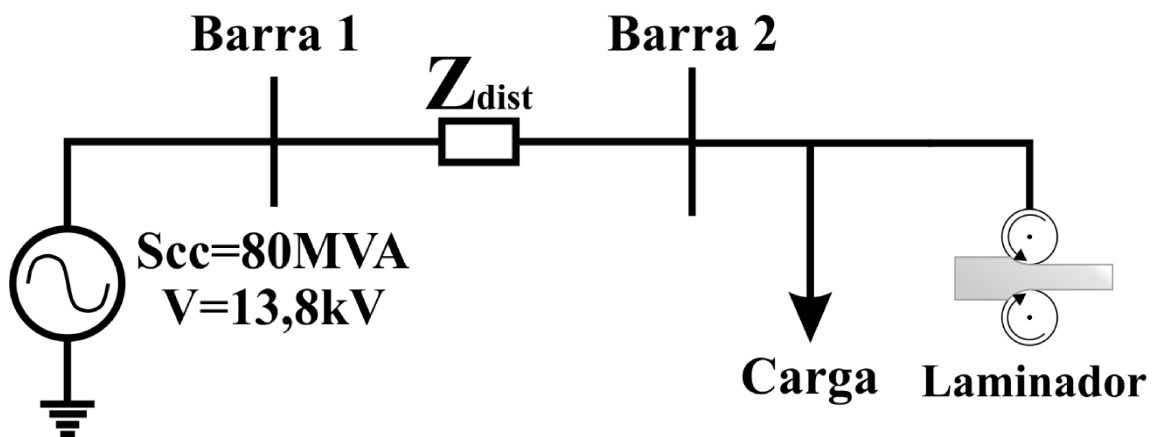


Figura 4.1. Diagrama unifilar do sistema analisado

O arranjo é composto pelo equivalente de um sistema, uma linha de distribuição e uma carga que representa uma indústria de laminação de aço. Os dados elétricos do sistema e da carga estão expostos nas Tabelas 4.1 a 4.3:

Tabela 4.1. Dados elétricos do sistema

Sistema (barra 1)	
Tensão nominal	13,8 kV
Potência de curto-circuito	80 MVA
X/R	10

Tabela 4.2. Dados elétricos da linha de distribuição

Linha de distribuição	
Resistência (Ω)	Reatância indutiva (Ω)
2	4

Tabela 4.3. Dados elétricos da carga

Carga (barra 2)			
	Fixa	Laminador	Total
Tensão (kV)	13,8	13,8	-
Potência nominal (MVA)	5	6,85	11,62
Fator de potência	0,92	1	0,986

Diante dos dados expostos, é possível constatar que a carga da indústria divide-se em duas partes: a primeira corresponde a toda a linha produtiva, tida aqui como fixa, e a segunda, por sua vez, expressa a parcela variável que representa o funcionamento de um laminador de aço em dez condições de carregamento diferentes. A Tabela 4.4 indica essas condições, a potência solicitada em cada etapa e a queda de tensão em percentual vista na barra 2 em relação à tensão aferida sem seu funcionamento. Além disso, definiu-se um conjunto de números a título de avaliação, que representa a quantidade de vezes que o laminador entrou em funcionamento dentro do período de um minuto, segundo a Tabela 4.5.

Tabela 4.4. Condições de carregamento do laminador de aço

Condição	Potência solicitada (MVA)	$\Delta V/V$ (%)
1	0,725	1
2	1,45	2
3	2,16	3
4	2,83	4
5	3,5	5
6	4,15	6
7	4,82	7
8	5,5	8
9	6,15	9
10	6,85	10

Tabela 4.5. Operação por minuto do laminador

Operação por minuto							
1	2	4	8	12	16	20	100

Portanto, devido à operação dessa parcela variável da carga, ocorreram flutuações de tensão na barra 2, as quais foram objeto de estudo para avaliação do compensador estático tipo reator a núcleo saturado.

4.3 – Análise do sistema frente à flutuação de tensão

De acordo com as características do sistema e da carga já descritas, a presente seção destina-se a avaliar os níveis de flutuação de tensão observados na barra 2 devido à operação do laminador. A Figura 4.2 ilustra o sistema adotado e implementado no programa Simulink, destacando o bloco que representa o *flickermeter*, que é uma reprodução do equipamento proposto pela norma europeia IEC-61000-4-15 [2].

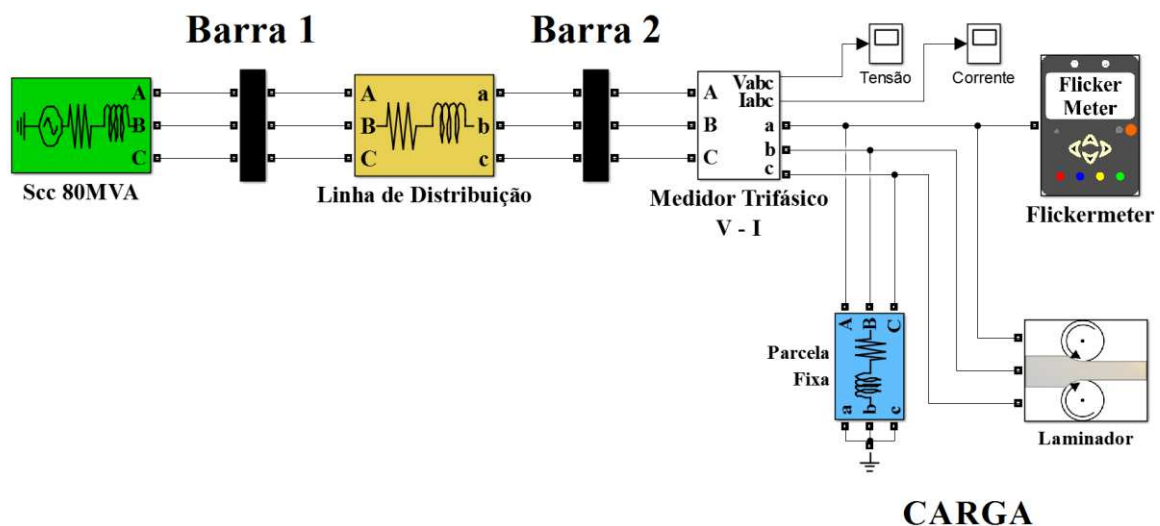


Figura 4.2. Sistema implementado no Simulink

Após a realização das simulações computacionais, foi possível elaborar o perfil da tensão eficaz na barra 2 e da corrente eficaz solicitada pela carga, ambos ilustrados didaticamente na Figura 4.3, que expressa também as variações de comportamento dessas grandezas em todas as condições de carregamentos. Já a Figura 4.4 representa a quantidade de vezes que o laminador opera por minuto.

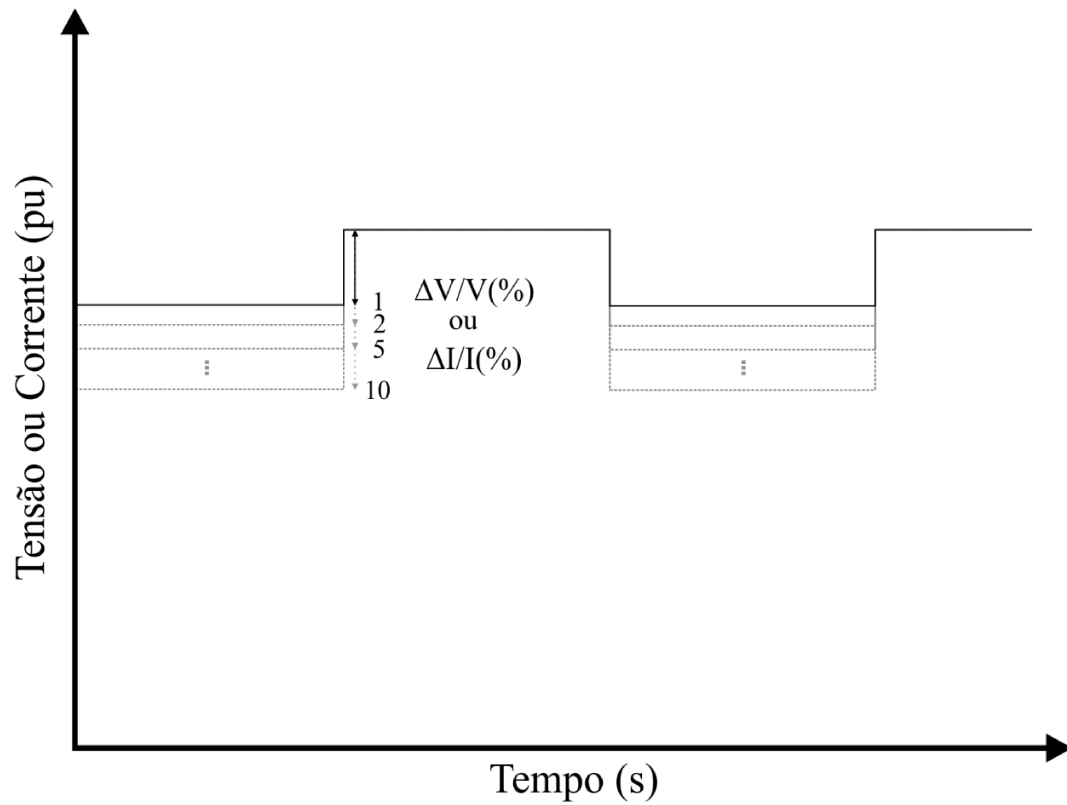


Figura 4.3. Perfil de carregamento da tensão e corrente na barra 2

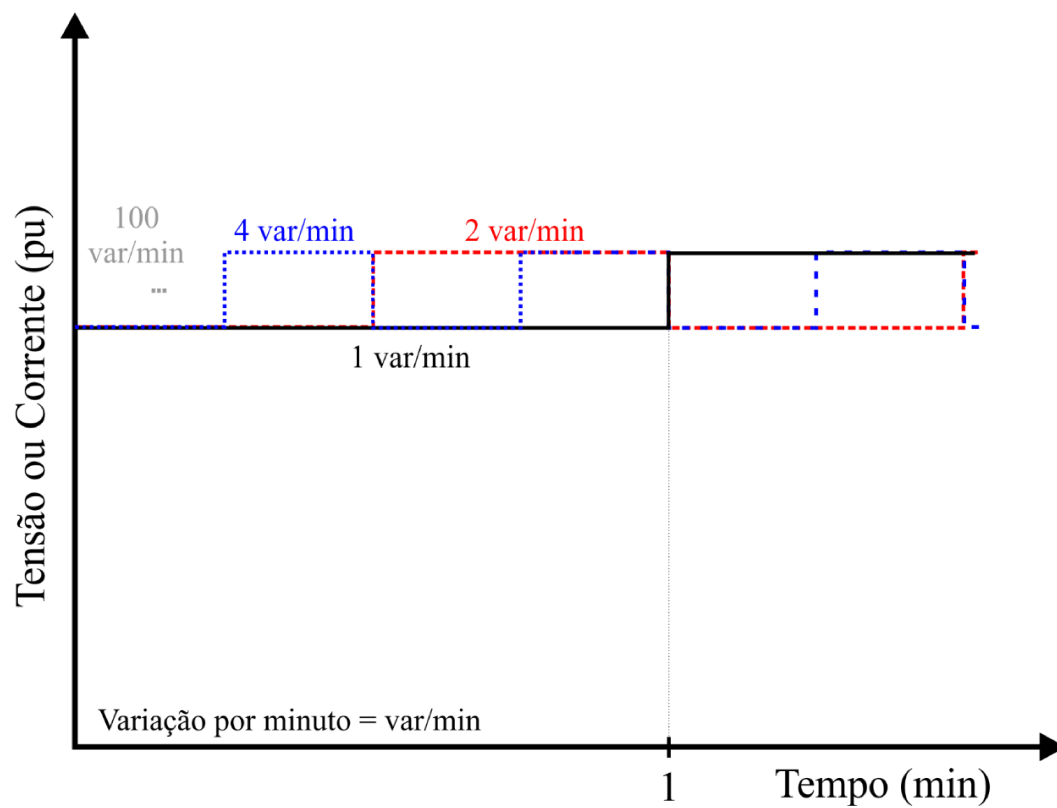


Figura 4.4. Número de operação do laminador por minuto

Diante disso, a Tabela 4.6 sintetiza os resultados obtidos com as simulações para facilitar a análise e a avaliação. Os valores apresentados na cor laranja ultrapassaram o limite máximo de tensão permitido pela ANEEL[4].

Tabela 4.6. Resultados de tensão e corrente aferidos na barra 2 (tensões expressas em (pu))

Condição	V mín. (pu)	V máx. (pu)	I máx. (A)	I mín. (A)	$\Delta I(A)$
1	1,06	1,07	252,57	224,66	27,91
2	1,05	1,07	279,91	224,66	55,25
3	1,04	1,07	306,55	224,66	81,89
4	1,03	1,07	331,3	224,66	106,64
5	1,02	1,07	355,55	224,66	130,89
6	1,01	1,07	378,7	224,66	154,04
7	1,00	1,07	402,04	224,66	177,38
8	0,99	1,07	425,18	224,66	200,52
9	0,98	1,07	446,78	224,66	222,12
10	0,97	1,07	469,48	224,66	244,82

Os valores obtidos pelo *flickermeter* para os indicadores dos níveis de flutuação de tensão, sensação instantânea de cintilação luminosa (*Sf*) e severidade de *flicker* de curta duração (*Pst*) são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8 e ilustrados nas Figuras 4.5 a 4.8:

Tabela 4.7. Resultados obtidos para o indicador *Sf*

$\frac{Var}{min}$	<i>Sf</i>									
	$\Delta V/V(\%)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2,75	11,56	25,71	44,35	68,00	95,65	128,87	166,71	208,34	256,98
2	2,79	11,56	26,00	44,75	68,51	96,27	129,61	167,57	209,32	258,07
4	2,79	11,61	26,02	44,77	68,54	96,32	129,67	167,65	209,42	258,19
8	2,80	11,62	26,14	44,95	68,82	96,70	130,19	168,33	210,26	259,23
12	2,96	11,89	26,28	45,21	69,19	97,21	130,86	169,19	211,32	260,52
16	2,87	11,95	26,34	45,33	69,39	97,50	131,25	169,69	211,96	261,32
20	2,85	11,85	26,40	45,43	69,54	97,72	131,55	170,09	212,46	261,94
100	3,41	13,98	30,91	53,18	81,42	114,42	154,04	199,17	248,79	306,74

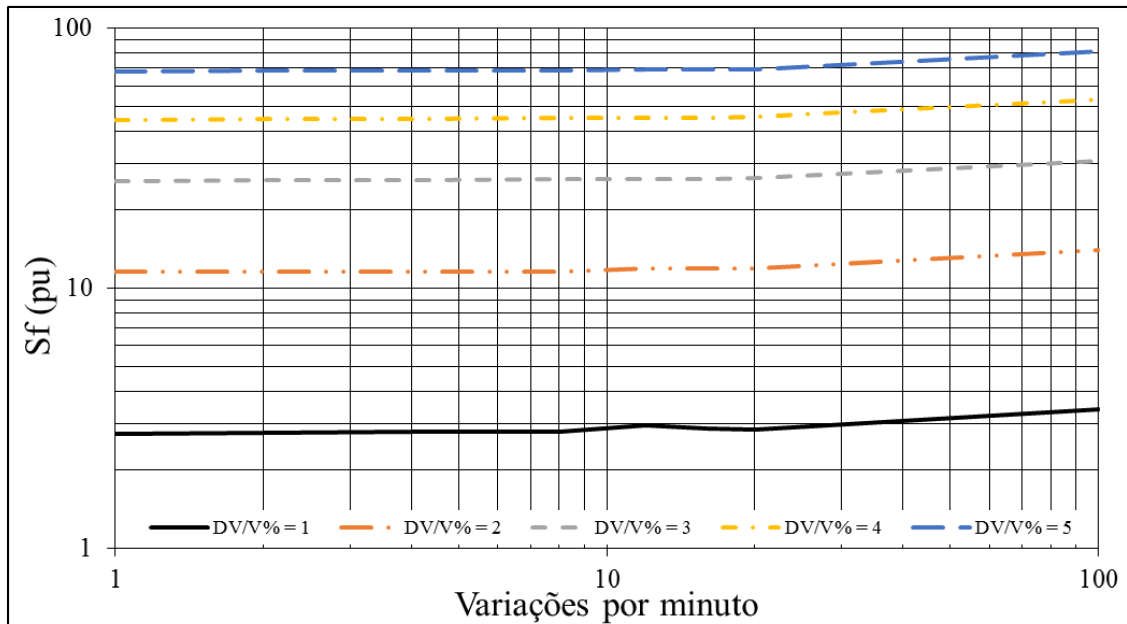


Figura 4.5. Curva do comportamento do indicador Sf para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%

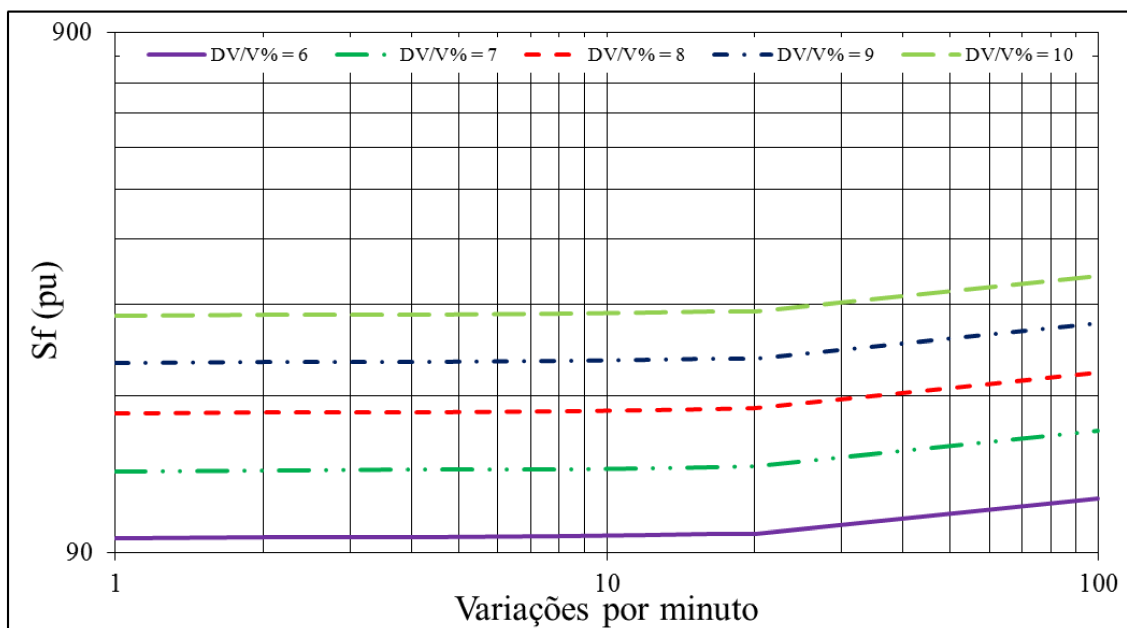


Figura 4.6. Curva do comportamento do indicador Sf para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10%

Tabela 4.8. Resultados obtidos para o indicador Pst

$\frac{Var}{min}$	Pst									
	$\Delta V/V(\%)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,32	0,66	0,98	1,29	1,60	1,90	2,20	2,51	2,80	3,11
2	0,44	0,82	1,22	1,60	1,98	2,35	2,73	3,11	3,47	3,86
4	0,50	1,02	1,53	2,00	2,48	2,94	3,41	3,88	4,34	4,82
8	0,63	1,29	1,94	2,55	3,15	3,74	4,34	4,93	5,52	6,12
12	0,73	1,49	2,23	2,93	3,62	4,30	4,99	5,67	6,34	7,04
16	0,80	1,62	2,44	3,20	3,96	4,70	5,45	6,20	6,93	7,70
20	0,85	1,73	2,60	3,41	4,22	5,00	5,80	6,60	7,37	8,19
100	1,18	2,41	3,63	4,77	5,90	7,00	8,12	9,24	10,32	11,46

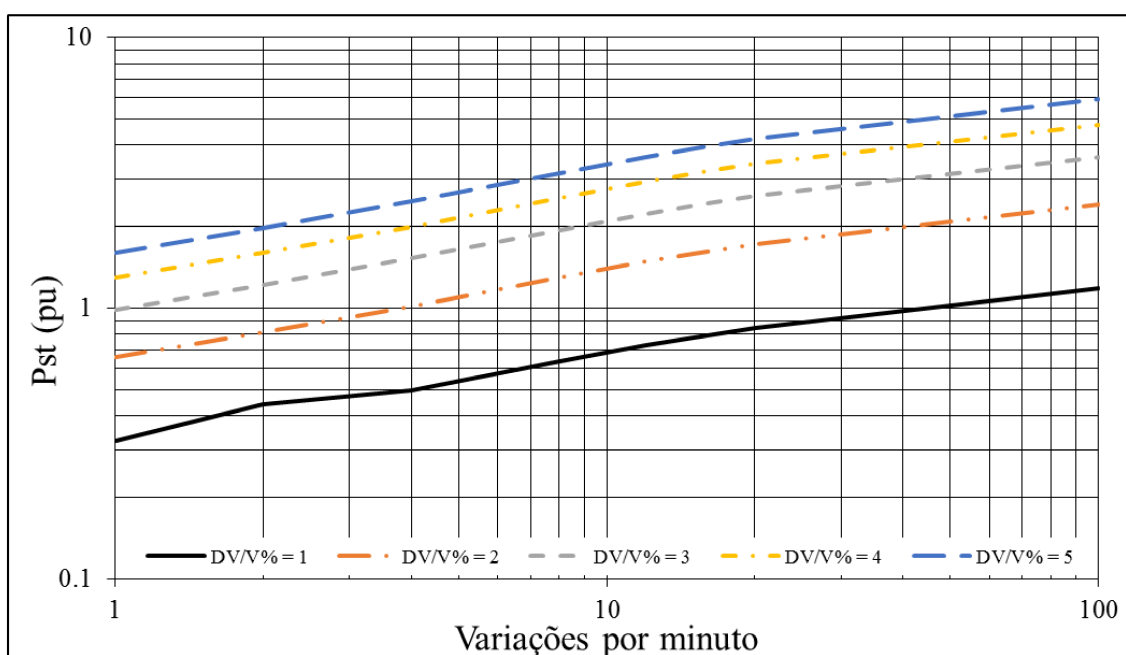


Figura 4.7. Curva do comportamento do indicador Pst para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%

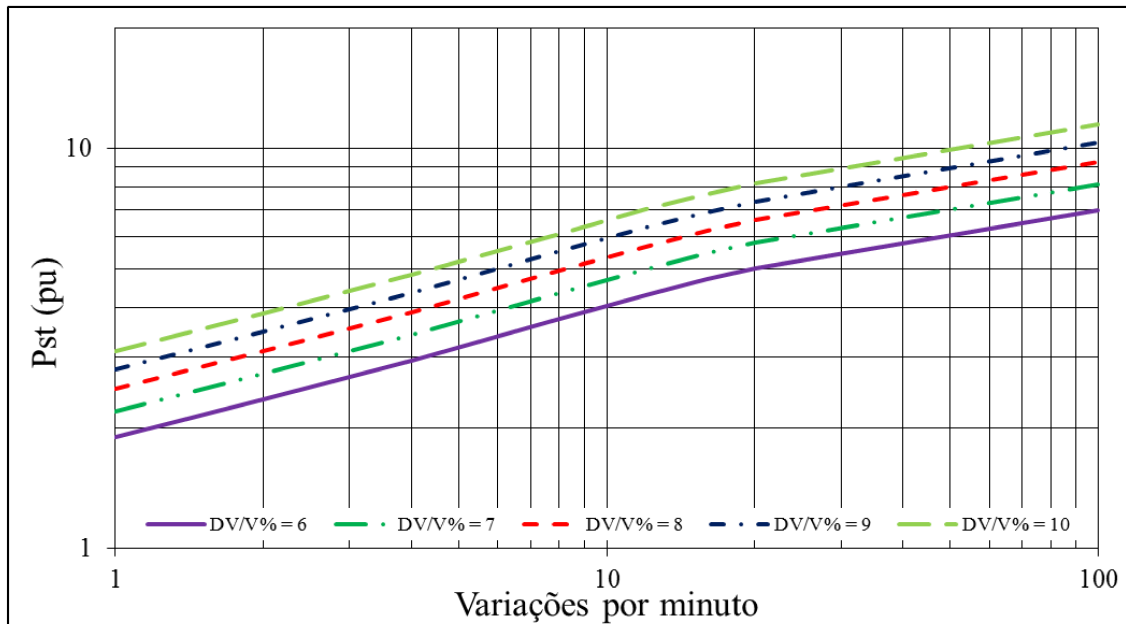


Figura 4.8. Curva do comportamento do indicador Pst para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10%

Ao analisar os níveis de tensão na barra 2, observou-se um valor cerca de 7% acima do nominal quando o laminador não estava em funcionamento, violando o valor máximo permitido pela norma vigente [4], que é de 5% de sobretensão. Além disso, o barramento apresentou flutuação de tensão.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, surgiu a necessidade de mitigar a flutuação de tensão e corrigir o nível de tensão para enquadrá-los nos patamares permitidos pela norma [4]. Nesse cenário, o compensador estático saturado mostra-se como uma opção bastante interessante, pois, devido às suas características intrínsecas, pode ser capaz de corrigir ambos os distúrbios presentes na tensão, sem a necessidade de acrescentar novos equipamentos ao arranjo ou alterar sua constituição física.

4.4 – Análise de desempenho do compensador estático saturado frente à flutuação de tensão

Perante os resultados obtidos com as simulações do sistema nas condições indicadas anteriormente, o compensador estático tipo reator a núcleo saturado será

dimensionado na sequência, de forma a adequar as flutuações e o nível de tensão no barramento. Assim, a Figura 4.9 mostra o diagrama unifilar do sistema com a inserção do compensador saturado.

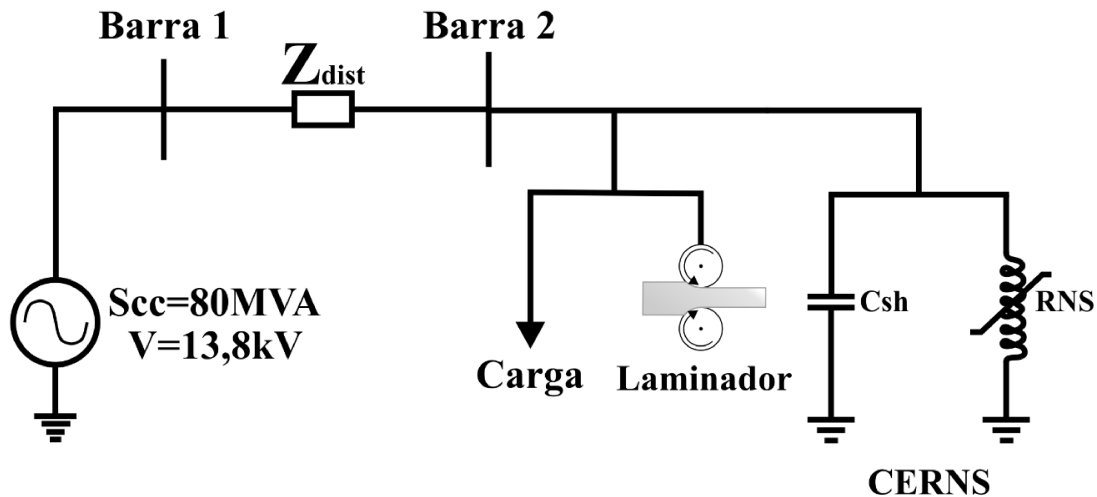


Figura 4.9. Diagrama unifilar do sistema com a inserção do compensador saturado

Nesse sentido, o *software* desenvolvido em [13], denominado DICOM (dimensionamento de compensadores) foi utilizado para obter os valores das potências nominais do banco de capacitores e do reator saturado *Twin-Tripler*. Para isso, foi necessário inserir os seguintes parâmetros no programa: nível de curto-circuito do sistema, relação X/R, tensão nominal, tensão sem carga, potência solicitada pela carga em diferentes carregamentos e os limites máximos e mínimos desejados para o enquadramento da tensão. Assim, ao fim desse processo, foram obtidos os valores de potência para ambos os equipamentos que compõem o compensador saturado.

O dimensionamento do compensador foi realizado para a condição de carregamento mais severa vista do prisma da flutuação de tensão produzida no barramento, ou seja, a que apresenta um $\Delta V/V(\%)$ de 10%. De posse dos dados obtidos com o DICOM, foi utilizado um segundo programa, denominado PRORE 2.0 (Projeto de Reatores Saturados e Determinação dos Parâmetros Elétricos Equivalentes),

desenvolvido em [15], que fornece as principais informações construtivas do RNS utilizadas em sua modelagem.

Contudo, salienta-se que, apesar de ter utilizado o programa DICOM para determinar os valores das potências nominais dos elementos do compensador, realizou-se adicionalmente um ajuste fino, por meio de tentativas e erros, até se obter resposta satisfatória do equipamento, tendo, como parâmetro de ajuste, a redução da amplitude da flutuação de tensão, ou seja, reduzindo-se o $\Delta V/V(\%)$. Dessa maneira, a Tabela 4.9 sumariza os parâmetros finais do compensador saturado.

Tabela 4.9. Paramentos do compensador saturado

	RNS	Banco de capacitores
Tensão nominal	13,8 kV	13,8 kV
Potência nominal	7,15 Mvar	4,5 Mvar

A Figura 4.10 ilustra o diagrama de bloco que representa o sistema com a presença do compensador saturado no programa Simulink.

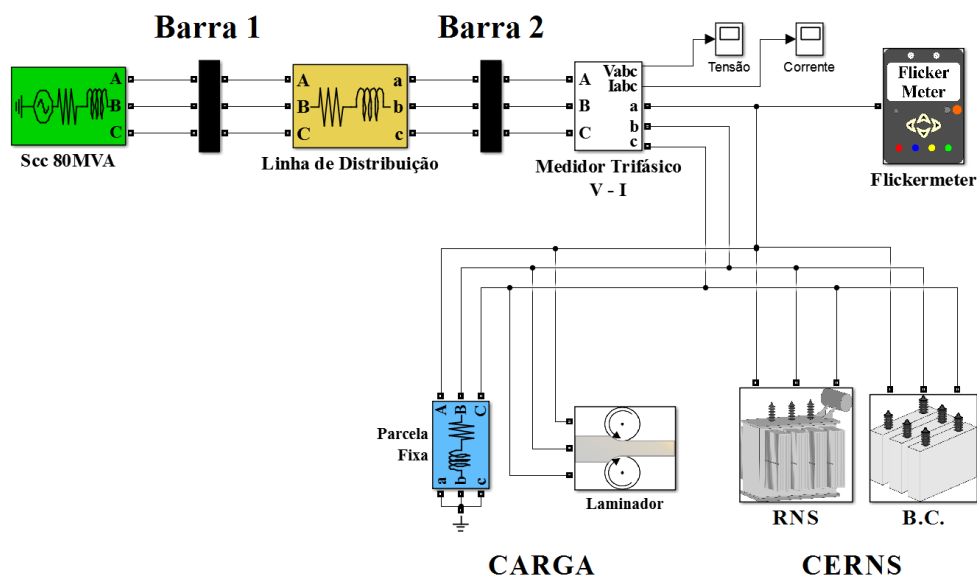


Figura 4.10. Diagrama de bloco no Simulink com a inserção do compensador saturado

Os resultados obtidos após o término das simulações com a presença do compensador saturado no sistema estão dispostos na Tabela 4.10. As grandezas aferidas

nessa etapa foram a tensão eficaz na barra 2, a corrente eficaz solicitada pela carga e pelo compensador e a corrente eficaz e a potência solicitadas pelo RNS. Vale salientar que a similaridade no comportamento das formas de onda de tensão, correntes e potência com aquelas apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4 determinou a indicação apenas dos valores eficazes correspondentes.

Tabela 4.10. Resultados do sistema com a inserção do compensador

Condição	Barra 2				RNS			
	$V_0(\text{pu})$	$V_f(\text{pu})$	$I_0(\text{A})$	$I_f(\text{A})$	$I_0(\text{A})$	$I_f(\text{A})$	$S_0(\text{Mvar})$	$S_f(\text{Mvar})$
1	1,00	1,00	273,2	289,2	286,7	298,1	6,86	7,15
2	1,00	1,00	273,2	307,2	274,9	298,1	6,56	7,15
3	1,00	1,00	273,2	326,2	263,0	298,1	6,26	7,15
4	0,99	1,00	273,2	345,5	251,1	298,1	5,97	7,15
5	0,99	1,00	273,2	365,5	239,0	298,1	5,66	7,15
6	0,99	1,00	273,2	385,8	226,9	298,1	5,36	7,15
7	0,98	1,00	273,2	407,3	214,1	298,1	5,04	7,15
8	0,98	1,00	273,2	429,3	201,0	298,1	4,72	7,15
9	0,98	1,00	273,2	451,4	187,8	298,1	4,39	7,15
10	0,97	1,00	273,2	475,2	173,5	298,1	4,04	7,15

Na Tabela 4.10, tem-se:

- V_0 e V_f : tensão mínima e tensão máxima, respectivamente;
- I_0 e I_f : corrente mínima e corrente máxima, respectivamente; e
- S_0 e S_f : potência mínima e potência máxima, respectivamente.

A forma de onda da corrente do reator para a condição de carregamento $\Delta V/V(\%)=10\%$ está representada na Figura 4.11. Na análise empírica, constatou-se que a forma de onda dos demais carregamentos não sofreu notórias variações aparentes, de modo que se optou por adotar tal curva como forma de onda geral para a corrente do RNS. O objetivo desta proposta é sumariar as características da corrente do RNS, apresentando,

na Tabela 4.11, seus níveis de distorções harmônicas por meio do índice DTI (distorção total de corrente), calculado para cada uma das condições de carregamento.

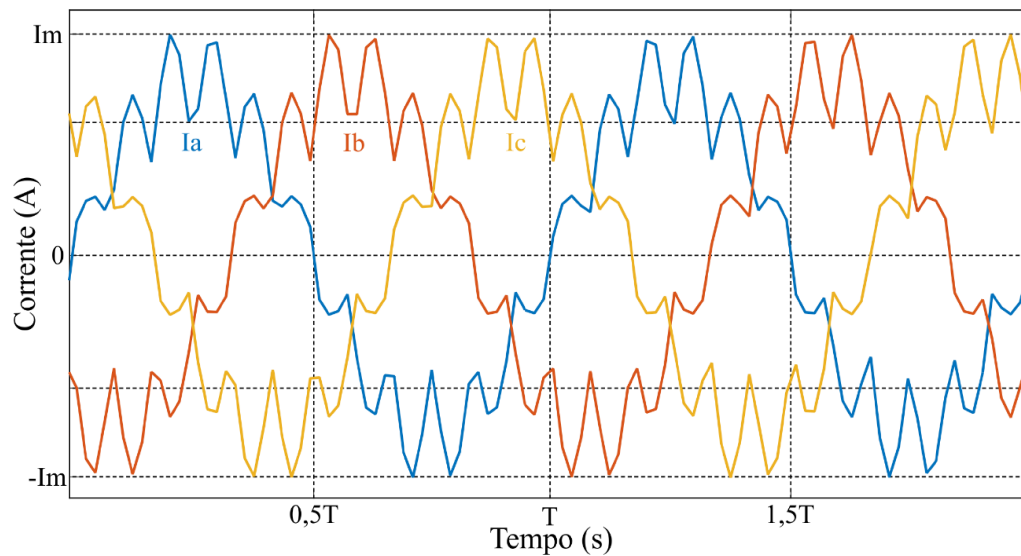


Figura 4.11. Forma de onda da corrente no RNS

Além de apresentar os valores de DTI do RNS, a Tabela 4.11 expressa os valores de DTT (distorção total de tensão) referentes à barra 2.

Tabela 4.11. Valores de DTI do RNS e DTT na barra 2

	DTI₀ (%)	DTI_f (%)	DTT₀ (%)	DTT_f (%)
1	24,12	24,01	3,35	3,46
2	24,24	24,01	3,23	3,46
3	24,36	24,01	3,11	3,46
4	24,43	24,01	2,98	3,46
5	24,5	24,01	2,85	3,46
6	24,62	24,01	2,72	3,46
7	24,74	24,01	2,59	3,46
8	24,78	24,01	2,44	3,46
9	24,81	24,01	2,28	3,46
10	24,74	24,01	2,11	3,46

Onde:

- DTI₀ e DTT₀: indicadores de distorção harmônica total de corrente e de tensão, respectivamente, para o período em que o laminador está em funcionamento;

- DTI_f e DTT_f : indicadores de distorção harmônica total de corrente e de tensão, respectivamente, para o período em que o laminador está desligado.

Os valores de Sf e Pst registrados com a inserção do compensador saturado no sistema estão expressos nas Tabelas 4.12 e 4.13 e nas Figuras 4.12 a 4.15.

Tabela 4.12. Resultados obtidos para o indicador Sf com a inserção do compensador saturado

$\frac{Var}{min}$	Sf									
	$\Delta V/V(\%)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,34	1,48	3,45	6,26	10,10	14,96	21,27	29,00	38,15	49,63
2	0,34	1,48	3,45	6,26	10,10	14,96	21,27	29,01	38,16	49,64
4	0,34	1,48	3,45	6,26	10,11	14,97	21,28	29,01	38,17	49,65
8	0,34	1,48	3,46	6,27	10,13	15,00	21,32	29,07	38,24	49,75
12	0,34	1,48	3,47	6,29	10,15	15,03	21,37	29,14	38,33	49,86
16	0,35	1,49	3,47	6,30	10,16	15,05	21,40	29,18	38,39	49,95
20	0,35	1,49	3,48	6,30	10,18	15,07	21,43	29,22	38,44	50,01
100	0,37	1,60	3,76	6,82	11,02	16,34	23,25	31,74	41,80	54,47

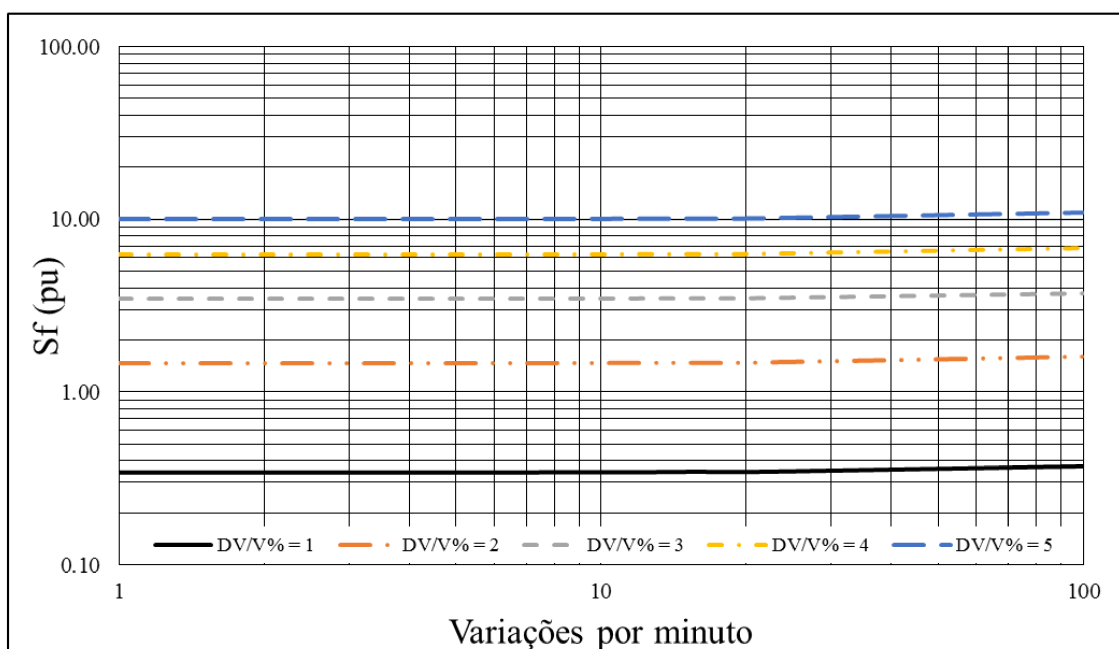


Figura 4.12. Curva de comportamento do indicador Sf com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%

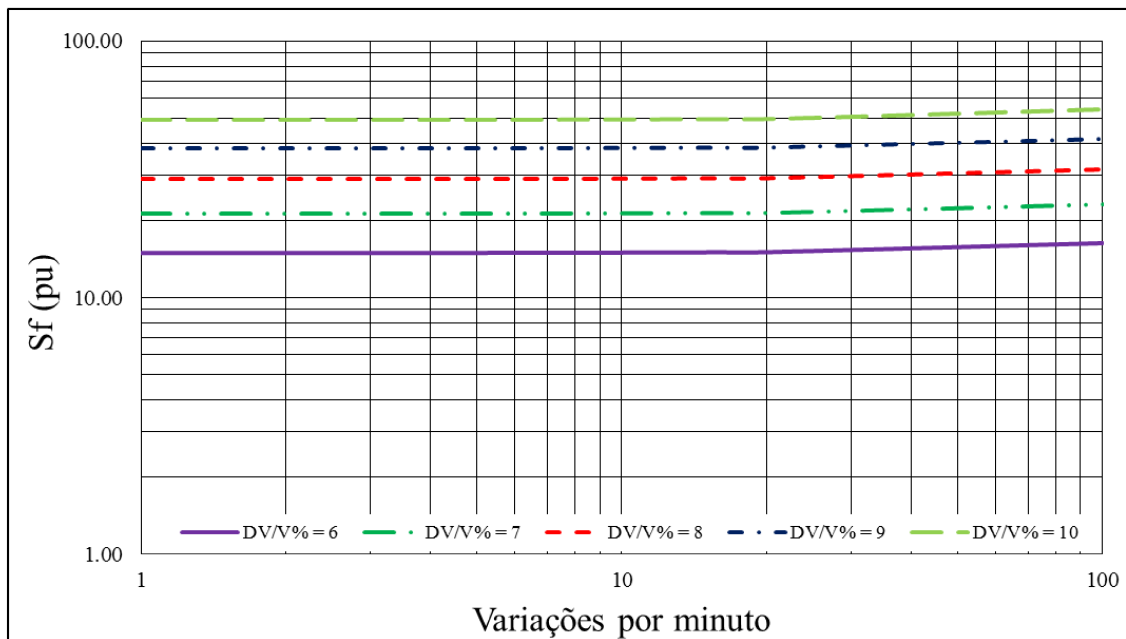


Figura 4.13. Curva de comportamento do indicador S_f com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10%

Tabela 4.13. Resultados obtidos para o indicador P_{st} com a inserção do compensador saturado

$\frac{Var}{min}$	P_{st}									
	$\Delta V/V(\%)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,11	0,24	0,36	0,49	0,62	0,75	0,90	1,05	1,20	1,37
2	0,12	0,26	0,39	0,53	0,68	0,82	0,98	1,15	1,32	1,51
4	0,15	0,31	0,48	0,65	0,83	1,01	1,20	1,41	1,61	1,85
8	0,19	0,40	0,61	0,82	1,05	1,28	1,53	1,79	2,06	2,35
12	0,22	0,46	0,70	0,95	1,21	1,47	1,75	2,05	2,36	2,70
16	0,24	0,50	0,77	1,04	1,32	1,61	1,92	2,24	2,58	2,95
20	0,26	0,53	0,82	1,10	1,40	1,71	2,04	2,39	2,75	3,14
100	0,37	0,78	1,19	1,60	2,04	2,48	2,96	3,46	3,97	4,53

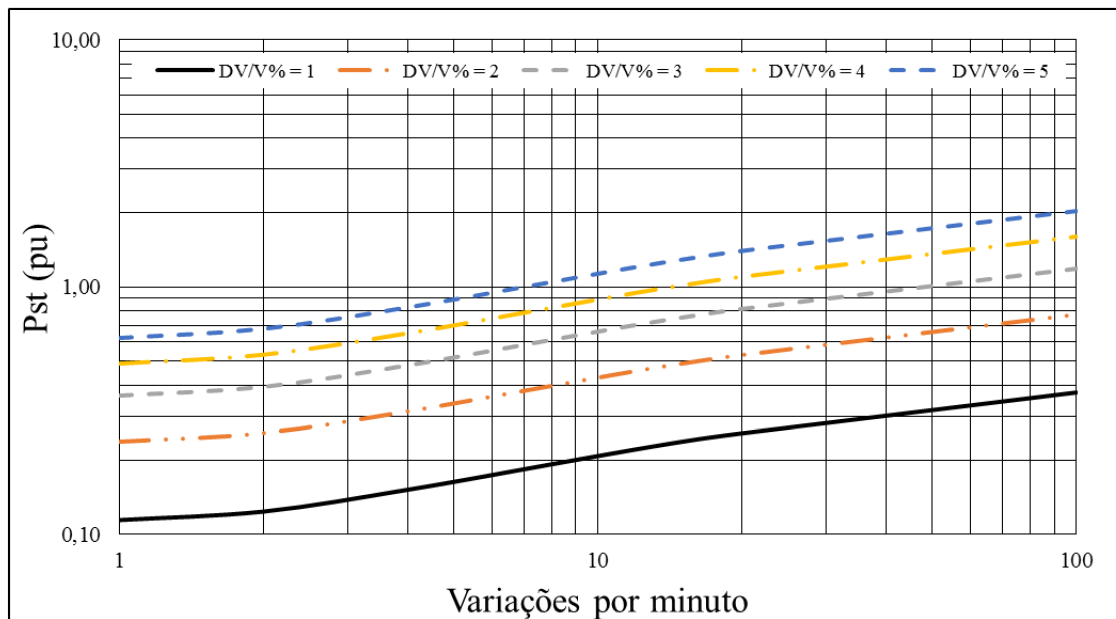


Figura 4.14. Curva de comportamento do indicador Pst com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 1 a 5%

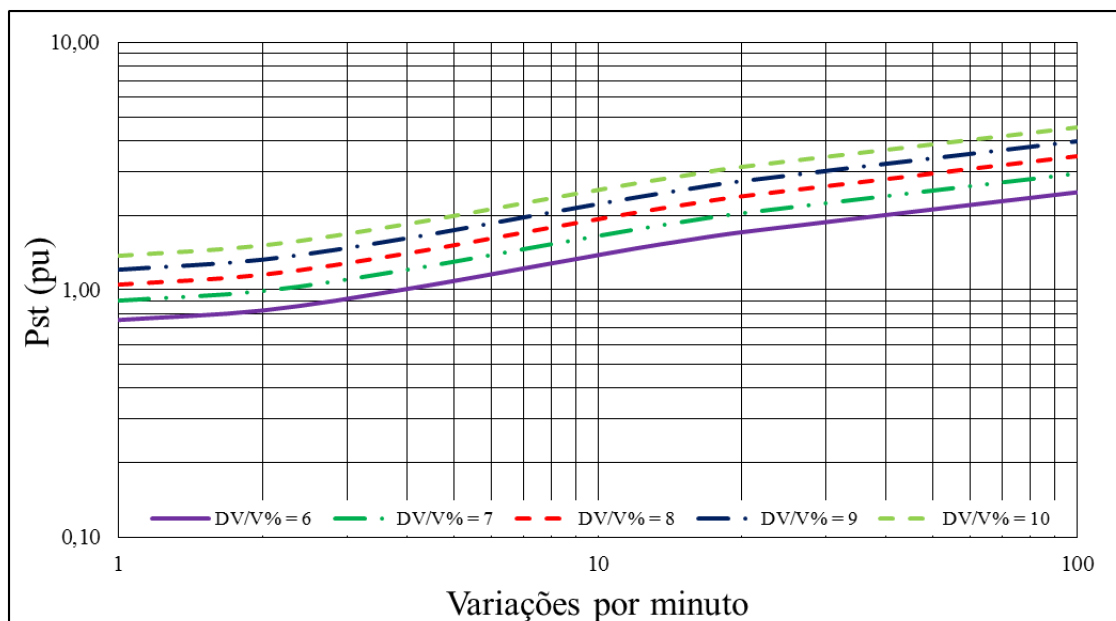


Figura 4.15. Curva de comportamento do indicador Pst com a inserção do compensador saturado para $\Delta V/V\%$ de 6 a 10 %

Na análise dos resultados obtidos com a inserção do compensador saturado, é possível constatar que houve uma redução expressiva da flutuação de tensão na barra 2, fato que pode ser comprovado pelos indicadores Sf e Pst . Além disso, a sobretensão

também foi corrigida. A seguir, ilustra-se, na forma de gráficos, a redução percentual dos efeitos da flutuação de tensão, por meio das Figuras 4.16 a 4.19.

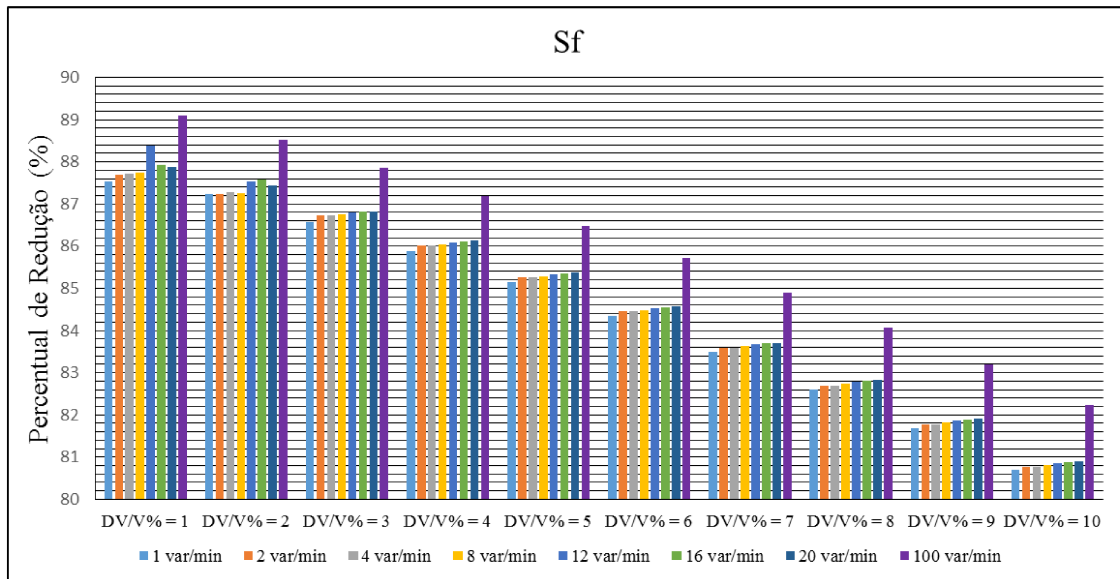


Figura 4.16. Redução percentual do indicador S_f promovida pelo compensador saturado

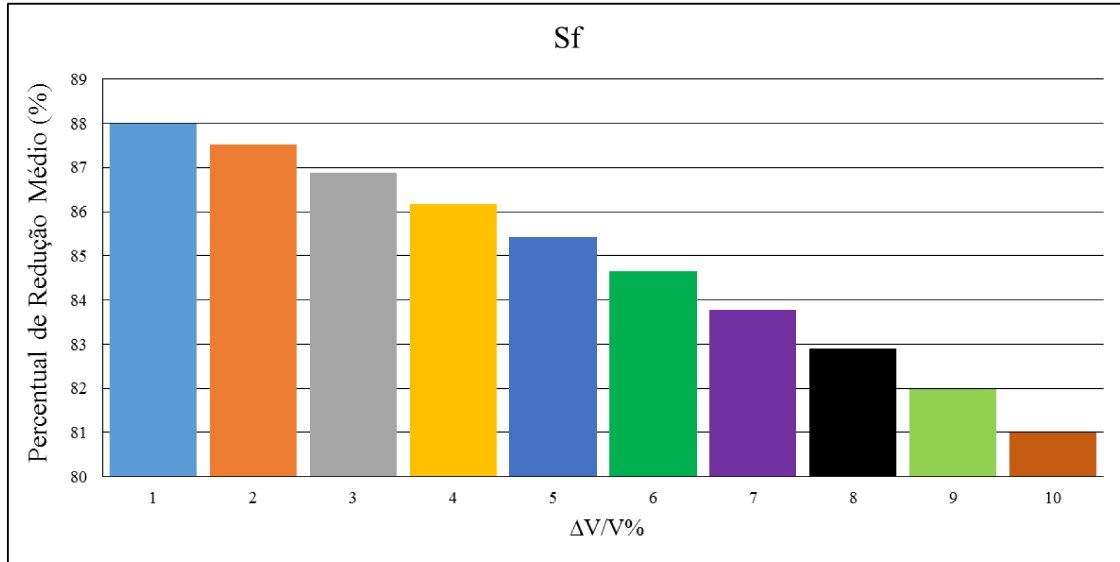


Figura 4.17. Redução percentual média do indicador S_f promovida pelo compensador saturado

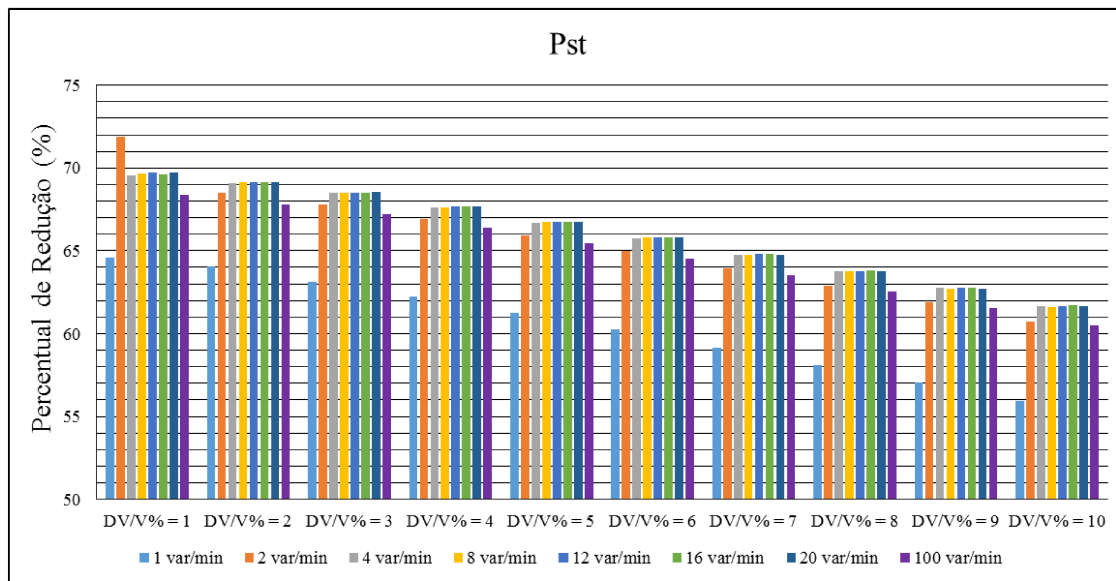


Figura 4.18. Redução percentual do indicador Pst promovida pelo compensador saturado

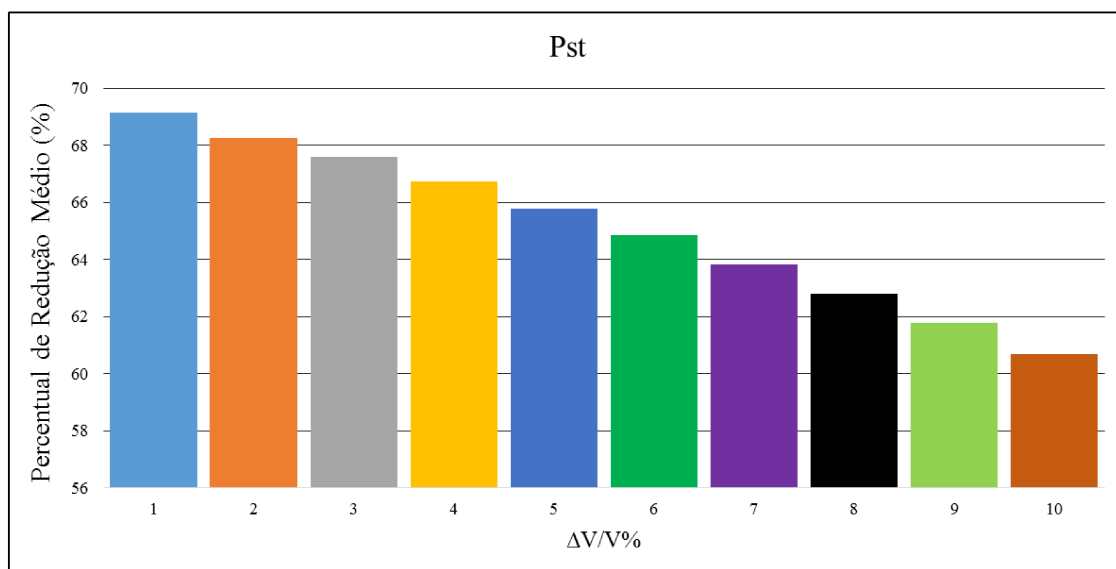


Figura 4.19. Redução percentual média do indicador Pst promovida pelo compensador saturado

4.5 – Conclusão

Para avaliar o compensador estático tipo reator saturado *Twin-Tripler* frente à mitigação de flutuação de tensão, implementou-se um sistema hipotético com uma carga perturbadora sob diferentes condições de carregamento. Dessa forma, avaliou-se o sistema sem a presença do compensador saturado, por meio da aferição dos níveis de

tensão e corrente no PAC (ponto de acoplamento comum), bem como os indicadores de S_f e P_{st} .

Após essa etapa, foi realizado o dimensionamento do referido equipamento, levando-se em consideração a pior condição de flutuação de tensão. Assim, com a inserção do compensador no sistema, foi possível obter resultados extremamente satisfatórios, tendo a redução dos indicadores S_f e P_{st} ficado em torno de 80% e 60%, respectivamente. Notou-se também que, ao dimensionar-se a solução para o caso mais severo de flutuação de tensão, o compensador teve um desempenho superior nas condições mais amenas de ocorrência de tal distúrbio.

Por fim, concluiu-se que o compensador saturado mostrou-se um equipamento eficiente na mitigação de variados níveis de flutuação de tensão.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A presente dissertação de mestrado almejou avaliar o desempenho do reator a núcleo saturado *Twin-Tripler* para a mitigação do distúrbio flutuação de tensão, por meio do compensador estático a reator saturado. Mesmo que cada capítulo tenha sumarizado os aspectos desenvolvidos, faz-se necessário sintetizar de forma geral e conclusiva todo o desenvolvimento realizado durante o trabalho.

O capítulo introdutório destinou-se a apresentar o escopo do problema em questão e as obras bibliográficas que elucidam o tema. O segundo capítulo fundamentou os aspectos teóricos sobre flutuação de tensão e abrangeu as condições causadoras, os efeitos produzidos e as soluções mitigadoras. Adicionalmente, apresentou o princípio de funcionamento do reator a núcleo saturado *Twin-Tripler*, contemplando sua forma de atuação na regulação de tensão, a região de operação na curva de magnetização e os níveis de distorção harmônica por ele produzidos. Além disso, o capítulo buscou apresentar o funcionamento do arranjo obtido com a combinação de um banco de capacitores em paralelo com o RNS, o qual resultou no equipamento elétrico conhecido como compensador estático a núcleo saturado.

O terceiro capítulo centrou-se na análise de modelagem do RNS, utilizando o programa computacional Simulink em substituição à plataforma ATP, até então utilizada nas mais diversas publicações e tida como base para estudos de desempenho dos compensadores em foco. Essa escolha fundamentou-se no fato de que o programa Simulink consiste em uma ferramenta robusta, versátil e com ampla difusão no meio

acadêmico, haja vista a facilidade para o desenvolvimento de modelos específicos de dispositivos e complexos elétricos. Somada a isso, há uma expressiva diversidade de recursos pré-disponibilizados em sua biblioteca de aplicativos específicos para a área de sistemas de energia, a exemplo de unidades de geração renováveis, sistema de transmissão em corrente contínua, dentre outras.

Uma vez apresentadas as bases para a modelagem do RNS nessa plataforma, realizaram-se estudos de desempenho com um sistema elétrico simplificado, o qual foi submetido a fenômenos responsáveis por alterações e violações das tensões eficazes em relação à regulamentação vigente. Por fim, implementou-se no ATP o mesmo sistema, o qual serviu de base comparativa para a verificação da eficácia da proposta feita. Uma pronta correlação entre os resultados das simulações efetuadas nos dois aplicativos evidenciou o sucesso do modelo implementado.

Após a elucidação de conceitos teóricos sobre o fenômeno da flutuação de tensão e o equipamento compensador saturado, realizou-se a modelagem do reator a núcleo saturado no programa Simulink e sua validação. Assim, o quarto capítulo objetivou analisar o desempenho do compensador saturado para a mitigação da flutuação de tensão, por meio da aferição dos níveis de tensão e de corrente no PAC e dos indicadores de S_f e P_{st} .

Para tanto, selecionou-se um sistema elétrico hipotético simplificado que representou, de forma geral, um típico alimentador de uma concessionária de distribuição, suprimindo uma carga perturbadora com diferentes condições de carregamento. Dessa maneira, primeiramente se avaliou o sistema sem a presença do compensador saturado por meio dos indicadores ora citados. Após, realizou-se o dimensionamento do compensador, levando em consideração a pior condição de flutuação de tensão.

A inserção do compensador resultou em dados satisfatórios, uma vez que houve a redução dos indicadores S_f e P_{st} em torno de 80% e 60%, respectivamente. Constatou-se também que, ao dimensionar-se o equipamento para o caso que apresentou maiores níveis de flutuação de tensão, houve uma melhoria mais acentuada dos indicadores analisados para os casos de menor severidade do distúrbio. Portanto, concluiu-se que o compensador saturado mostrou-se um equipamento eficiente na mitigação de variados níveis de flutuação de tensão.

Os resultados obtidos com o presente trabalho mostraram-se promissores e satisfatórios, despertando maiores investigações e estudo. Nessa conjuntura, destacam-se alguns tópicos para serem abordados em trabalhos futuros:

- realizar estudos de desempenho laboratoriais por meio de um protótipo do compensador estático saturado em escala reduzida para mitigar a flutuação de tensão em um sistema elétrico equivalente;
- analisar matematicamente a operação do compensador saturado frente à flutuação de tensão;
- estudar as perdas joulicas e por histerese envolvidas no processo de mitigação da flutuação de tensão; e
- realizar uma análise comparativa de desempenho do compensador saturado quando da substituição do material ferromagnético do núcleo de aço silício pelas conhecidas ligas amorfas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. R. Macedo Jr., “Uma Contribuição à Análise das Componentes Inter-Harmônicas e seus Efeitos nos Indicadores de Flutuação de Tensão,” Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória, 2009.
- [2] IEC 61000-4-15:2010, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications,” 2010.
- [3] ONS, “Procedimentos de Rede, Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de seus Componentes,” Nov-2011.
- [4] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica,” Jan-2016.
- [5] W. D. J. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, 4th ed. New York: McGraw Hill Higher Education, 1982.
- [6] S. Santoso, M. F. McGranaghan, R. C. Dugan, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. McGraw-Hill Professional Publishing, 2012.
- [7] A. B. de Vasconcellos, “Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos Tipo Reator à Núcleo Saturado para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e Validação Experimental,” Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [8] E. S. Friedlander, “Principle and Analysis of a Stabilized Phase Multiplier Type of Magnetic Frequency Converter,” *Electrical Energy*, 1956.
- [9] Fisher, F.J., E. S. Friedlander, “DC Controlled 100 MVA Reactor,” *GEC Journal*, England, pp. 93–104, 1955.
- [10] T. J. E. Miller, *Reactive Power Control In Electric Systems*, 1st ed. Wiley-Interscience, 1982.
- [11] E. S. Friedlander, A. Telahun, D. J. Young, “Arc-furnace Flicker Compensation in Ethiopia,” *GEC J.*, vol. 32, pp. 1–52, 1965.
- [12] V. Bolgov, J. Jarvik, “Suppression of Voltage Flicker by Saturable Reactor Operating under Forced Magnetization,” *EUROCON, 2007. The International Conference on “Computer as a Tool.”* pp. 1417–1422, 2007.
- [13] J. M. Pacheco, “Determinação dos Parâmetros de Compensadores Estáticos de Reativos e Estratégia para o Projeto Otimizado de Reatores Saturados,” Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [14] J. A. F. Barbosa Jr., “Modelagem e Análise de Desempenho Transitório e

- Dinâmico de Compensadores Estáticos de Reativos Utilizando Reatores Saturados,” Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- [15] J. A. F. Barbosa Jr., “Uma Contribuição Para a Modelagem, Construção e Análise de Desempenho de Compensadores de Tensão a Reator Saturado,” Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
 - [16] C. S. Chaves et al., “Avaliação Comparativa do Emprego de Aço Silício versus Ligas Amorfas em Reatores a Núcleo Saturado,” *V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, Foz do Iguaçu - PR, 2014.
 - [17] IEC 61000-2-2:2002, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems,” 2002.
 - [18] D. Robinson et al., “Voltage Fluctuations In The Electric Supply System,” *Integral Energy Power Quality Centre*, Wollongong, 2003.
 - [19] IEC 60555-3:1982, “Disturbances in supply systems caused by household appliances and similar electrical equipment - Part 3: Voltage fluctuations,” 1982.
 - [20] S. M. Deckmann, “ANEEL - Estudos Sobre Qualidade De Energia Elétrica - Flutuações de Tensão na Rede Elétrica - Parte 1,” 1999.
 - [21] J. P. S. Rocha, “Sistema Digital para Medição e Análise de Cintilação Luminosa,” Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
 - [22] IEC 61000-4-7:2002, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto,” 2002.
 - [23] J. R. Macedo Jr., D. S. L. Simonetti, “Análise de Desempenho do Flickermeter na Presença de Componentes Inter-Harmônicas,” *Revista Controle & Automação*, vol. 23, no. 4, pp. 508–516, 2012.
 - [24] Y. H. Chung, “Neural Network Controlled Voltage Disturbance Detector and Output Voltage Regulator for Dynamic Voltage Restorer,” *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2007.
 - [25] R. S. Vedam, M. S. Sarma, *Power Quality – VAR Compensation in Power Systems*, 1st ed. CRC Press, 2008.
 - [26] A. B. de Vasconcellos et al., “Análise Operacional de Compensadores Estáticos com Reator a Núcleo Saturado Quanto a Produção e Compensação de Correntes Harmônicas,” *VIII - Induscon*, Poços de Caldas, 2008.
 - [27] A. M. Bryantsev, *Magnetically Controlled Electrical Reactors*, 2nd ed. Moscow: Znack, 2011.
 - [28] J. A. F. Barbosa Jr. et al., “Avaliação Técnica e Econômica para o Uso de Reatores

Saturados em Substituição aos Lineares em um Sistema de Transmissão em AT,” *IX CLAGTEE - Electricity Generation and transmission*, Mar del Plata, 2011.

- [29] C. S. Chaves et al., “Estudo Comparativo Entre o Emprego de Ligas Amorfas em Relação ao Aço Silício na Construção de Reatores Saturados,” *XI CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, Uberlândia, 2013.
- [30] MathWorks, “Matlab Help,” 2016. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/index.html>.
- [31] S. M. Deckmann, “ANEEL - Estudos Sobre Qualidade De Energia Elétrica - Flutuações de Tensão na Rede Elétrica - Parte 2,” 1999.