

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



UMA PROPOSTA PARA O CONTROLE
ELETRÔNICO DE REGULADORES
ELETROMAGNÉTICOS ATRAVÉS DO
REFORÇO SÉRIE DE TENSÃO

Thiago Vieira da Silva

Uberlândia
Agosto de 2012

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

**UMA PROPOSTA PARA O CONTROLE
ELETRÔNICO DE REGULADORES
ELETROMAGNÉTICOS ATRAVÉS DO
REFORÇO SÉRIE DE TENSÃO**

Dissertação apresentada por Thiago
Vieira da Silva à Universidade Federal
de Uberlândia, para a obtenção do
título de Mestre em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD. (Orientador) - UFU
José Rubens Macedo Junior, Dr. - UFU
José Wilson Resende, PhD. - UFU
Olívio Carlos Nascimento Souto, Dr. - IFG

UMA PROPOSTA PARA O CONTROLE ELETRÔNICO DE REGULADORES ELETROMAGNÉTICOS ATRAVÉS DO REFORÇO SÉRIE DE TENSÃO

Thiago Vieira da Silva

Dissertação apresentada por Thiago Vieira da Silva à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso
Coordenador do Curso de Pós- Graduação em
Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô - Antônio Francisco Machado (In Memoriam), pelas sempre sábias palavras, mesmo quando o silêncio era tudo o que eu precisava ouvir.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **DEUS** pelo milagre da vida e as bênçãos que Ele tem derramado sobre minha família.

Ao professor orientador **José Carlos de Oliveira** pelo incentivo, confiança, orientação, paciência, amizade e compreensão durante todas as etapas deste trabalho.

Ao meu pai **Gilberto Vieira da Silva** e minha mãe **Marisa Francisca da Silva**, pelos conselhos, “puxões de orelha”, por me ensinar a ter valores de família, por me dar a oportunidade de mostrar o que eu sou capaz, sem me julgar ou me induzir, enfim, por ser **MEU PAI E MINHA MÃE**.

A meu irmão **Guilherme**, minha **Vó Maria** e **demais familiares** por sempre torcerem por mim e me incentivarem em todos os momentos de minha vida, desde a infância até os dias de hoje.

A **Mayra**, por ter me segurado a mão e me dado força quando eu mais precisei (jamais esquecerei), e também, por me conceder à honra de poder caminhar ao teu lado, sendo minha fiel e companheira esposa.

Aos **colegas de pós-graduação**, Alex Reis, Arnaldo, Carlos Eduardo “Cadu”, Fernanda Hein, Guilherme Cunha, Guilherme Xavier, Ivan Nunes, Isaque Gondim, João Areis e Paulo Henrique, em especial aos **amigos** Fabricio Parra e Lucas Vasconcelos, que fizeram parte de meu convívio durante esses meses de mestrado, e que tiveram papel imprescindível para a realização dessa obra.

Aos **demais amigos**, que apesar de não terem sido citados aqui, também estão presentes nos agradecimentos que faço em meu coração, por todo carinho e apoio, ao longo de minha vida e para realização desse trabalho.

Aos **professores e funcionários** dessa instituição.

À **CAPES** (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a **FAPEMIG** (Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais) pelo subsídio financeiro.

RESUMO

A busca por soluções para os distintos problemas da qualidade da energia elétrica, com destaque às variações das tensões de suprimento, conta, na atualidade, com uma extensa gama de produtos visando, sobretudo, a regulação dinâmica da tensão de suprimento. Não obstante tal reconhecimento, os desafios por estratégias alternativas por compensadores com propriedades operacionais e econômicas mais atrativas continuam motivando pesquisas em todo o mundo. Neste contexto, a presente dissertação encontra-se focada numa proposta de controle de um dispositivo regulador de tensão, aqui denominado por CET (Compensador Eletromagnético de Tensão), que se apresenta com uma concepção inovadora no que tange ao processo da regulação da tensão. A ideia central apoia-se na injeção série de reforços de tensão, aditiva ou subtrativa, através de um arranjo físico totalmente eletromagnético quanto às suas unidades de potência. Objetivando propriedades operativas dinâmicas, a proposta em pauta, no que tange a sua concepção operativa, fundamenta-se em chaveamentos eletrônicos controlados. À luz destes fatos, o trabalho vai de encontro a esta filosofia e ressalta a estrutura física do dispositivo, a composição da unidade de controle e avalia o desempenho do dispositivo sob condições associadas com a ocorrência de desvios de tensão. Quanto aos estudos feitos e discutidos, estes se encontram alicerçados em investigações computacionais conduzidas através da plataforma ATP e recursos oferecidos pela linguagem MODELS.

Palavras-Chave: ATPDraw, Compensador Eletromagnético, Controle de Tensão, Dispositivos Semicondutores, Qualidade de Energia, Sistemas de Distribuição.

ABSTRACT

The search for solutions to the different power quality problems, in special the ones related to the voltage level compliance to the standard values has produced, up to now, an extensive range of commercial products using different techniques. Despite this recognition, the challenge for alternative strategies, presenting low cost and low maintenance properties, are very attractive and this subject is still motivating research worldwide. In this context, this dissertation is focused on the proposal of a voltage regulating device, here referred as CET (Electromagnetic Voltage Compensator), which presents an innovative design to obtain the process of voltage regulation. The main idea is based on the voltage injection, been as an additive or subtractive way, through a physical arrangement, presenting as a full electromagnetic power device. Aiming operative dynamic properties, the proposal in question, as far as their operational design concerns, is based on electronic switching and control device. The proposal outlined here will encounter emphasizes to the CET physical structure, the control unit composition and the evaluation of the electric complex performance under different voltage deviations occurrences. The studies are presented and then discussed, using the results provided by the computational simulation carried out in the time domain simulator ATP throughout its classical feature – the MODELS language.

Words-Key: ATPDraw, Distribution Systems, Electromagnetic Voltage Compensator, Power Quality, Semiconductor devices, Voltage Control.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	2
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	3
1.3	CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO	5
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6

CAPÍTULO II

2	ESTADO DA ARTE SOBRE AS FILOSOFIAS DE COMPENSAÇÃO DA TENSÃO	9
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
2.2	MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE TENSÃO	10
2.2.1	MÉTODOS INDIRETOS [6]	10
2.2.2	MÉTODOS DIRETOS [6]	15
2.3	DISPOSITIVOS PARA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS VIA MÉTODOS INDIRETOS	20
2.3.1	COMPENSADORES COM CHAVEAMENTO MECÂNICO [6]	20
2.3.2	COMPENSADOR SÍNCRONO [6]	22
2.3.3	REATOR À NÚCLEO SATURADO [4]	23
2.3.4	REATOR CONTROLADO A TIRISTORES– RCT [3]	25
2.3.5	CAPACITOR CHAVEADO A TIRISTORES– CCT [3]	27
2.3.6	STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR– STATCOM [7] E [9]	28
2.3.7	SIEMENS SIPCON-P [9]	30
2.4	DISPOSITIVOS PARA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS VIA MÉTODOS DIRETOS	31
2.4.1	TOSHIBA TB-R1000 [11]	31
2.4.2	COOPER VR-32 [12]	32
2.4.3	ITB RAV-2 [13]	33
2.4.4	DYNAMIC VOLTAGE RESTORER - DVR [14]	33
2.4.5	SIEMENS SIPCON-S [9]	35
2.4.6	SOFTSWITCHING DYSC [17] E [18]	36

2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
-----	----------------------------	----

CAPÍTULO III

3	NOVA PROPOSIÇÃO DE COMPENSADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO - ESTRUTURA FÍSICA, CONTROLE E MODELAGEM.....	40
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAS	40
3.2	O COMPENSADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO – CET	41
3.3	A CONCEPÇÃO INICIAL PARA O CONTROLE DO CET [23] e [27].....	44
3.4	A NOVA PROPOSTA DE CONTROLE DO CET [27] e [28]	47
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

CAPÍTULO IV

4	ESTUDOS DE CASOS	55
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
4.2	ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS AVALIATIVOS.	56
4.3	CASO 01: CONDIÇÕES DE AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES EQUILIBRADAS DE MOMENTÂNEOS DE TENSÃO	57
4.4	CASO 02: CONDIÇÕES DE VARIAÇÕES MOMENTÂNEAS DESEQUILIBRADAS DE TENSÃO	68
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75

CAPÍTULO V

5	CONCLUSÕES GERAIS.....	77
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
7	APÊNDICE 1	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Circuito equivalente do alimentador e diagramas fasoriais – sem e com compensação. (a) – Circuito equivalente da carga e sistema de alimentação, (b) – Diagrama fasorial da figura 2.1(a) (sem compensação) e (c) – Diagrama fasorial da figura 2.1(a) (com compensação)	12
Figura 2.2 – Característica tensão versus potência reativa	15
Figura 2.3 – Ilustração dos arranjos físicos utilizados para transformadores com mudança de tapes: (a) equipamento para operação vazio e (b) equipamento para operação sob carga.	16
Figura 2.4- Ilustração de uma estratégia de regulação de tensão através de 2 transformadores com mudança de tape em uma linha radial	18
Figura 2.5 - A concepção de um regulador de tensão da tecnologia UPFC.	18
Figura 2.6 – Conceituação básica da operação do UPFC: (a) variação de tensão na forma geral; (b) variação apenas em módulo da tensão (compensação em derivação); (c) variação da queda de tensão na linha (compensação série); (d) variação do ângulo de tensão; (e) Operação simultânea das compensações em derivação, série e defasamento angular.	19
Figura 2.7- Arranjo físico de um banco de capacitor e um reator linear conectado a uma barra.	21
Figura 2.8 – Módulo de um banco de capacitores para subestação da empresa Shreem Americana.....	21
Figura 2.9 – Reator Linear de uma subestação da Eletronorte em Cuiabá – MT.....	22
Figura 2.10 – Arranjo físico do Compensador Síncrono.....	23
Figura 2.11 – Foto de um compensador síncrono instalado em uma subestação no estado do Maranhão.	23
Figura 2.12 – Arranjo físico de um reator a núcleo saturado	24
Figura 2.13 –Reator a Núcleo Saturado de 3MVAR e 34,5 kV.	25
Figura 2.14 – Arranjo físico de um Reator Controlado a Tiristores – RCT.....	26
Figura 2.15 - Ilustração de um Reator Controlado a Tiristores – RCT.	26
Figura 2.16 – Arranjo físico de um compensador tipo Capacitor Chaveado a Tiristores – CCT.	27
Figura 2.17 - Ilustração do Capacitor Chaveado a Tiristor – CCT.....	28
Figura 2.18 – Arranjo físico do STATCOM.	29
Figura 2.19 – Container contendo a estrutura do STATCOM	29
Figura 2.20 - Unidades que compõem o STATCOM.....	30
Figura 2.21 – Arranjo Físico do Siemens Sipcon-P.	30
Figura 2.22 – Foto do regulador de tensão Toshiba TB-R1000	32
Figura 2.23 – Foto do equipamento Cooper VR-32	32

Figura 2.24– Foto do regulador de tensão ITB RAV-2.....	33
Figura 2.25 – Arranjo físico dos elementos clássicos que compõem o restaurador dinâmico de tensão – DVR	34
Figura 2.26 – Arranjo físico da topologia com realimentação a jusante do transformador série.	34
Figura 2.27 – Ilustração de um DVR.....	35
Figura 2.28 - Arranjo físico do Condicionador de Potência conectado em série – SIPCON S	35
Figura 2.29 – Arranjo físico básico do MINIDySC.	37
Figura 2.30 – Foto do MINIDySC.	37
Figura 3.1- Estrutura do compensador eletromagnético de tensão.....	42
Figura 3.2 - Diagrama fasorial do desempenho do compensador no que tange a variações de tensão e respectivas compensações.	43
Figura 3.3 - Estrutura física do compensador eletromagnético de tensão com mudança de tapes discretos.....	45
Figura 3.4 – Diagrama de ligação do CET para realização de estudos laboratoriais.	45
Figura 3.5 - Diagrama de blocos para o chaveamento controlado – filosofia de tapes discretos.	46
Figura 3.6 - Estrutura do compensador eletromagnético de tensão de chaveamento contínuo.	48
Figura 3.7 – Ilustração da plataforma utilizada no ATPDraw para simulação dos casos estudados.	48
Figura 3.8 - Forma de onda da tensão complementar para a restauração dos níveis desejados para o suprimento da carga – efeito dos ângulos de disparo das chaves principais.	50
Figura 3.9 - Relação $\alpha=f(V)$ para: (a) Afundamentos de tensão e (b) Elevações de tensão....	51
Figura 3.10 - Diagrama de blocos para a determinação dos ângulos de controle do CET.....	52
Figura 4.1 – Diagrama unifilar adotado para os estudos de casos.....	56
Figura 4.2 - Tensão na Barra 1 – variações adotadas ao longo do período de investigação - intervalos de variação da tensão de suprimento	58
Figura 4.3 – Ângulos α e β para obtenção dos valores de tensão injetada – Caso 01.	59
Figura 4.4 – Pulsos das chaves principais para afundamentos e elevações de tensão – Caso 01.	60
Figura 4.5 – Pulsos das chaves principais e complementares para um afundamento de 0,1 pu – Caso 01.	60
Figura 4.6 – Tensões e correntes injetadas no primário do transformador série – Caso 01.	61
Figura 4.7 - Tensões nos barramentos 1 e 2.	62

Figura 4.8 – Formas de onda da tensão da fase A - barra 2 – após o processo da compensação – Caso 01.	63
Figura 4.9 – Zoom da forma de onda de tensão da fase A no instante do afundamento momentâneo de tensão com tensão residual 80% – Caso – 01.	63
Figura 4.10 – Zoom da forma de onda de tensão da fase A no instante da elevação momentânea de tensão de 1,2pu – Caso 01.	64
Figura 4.11 – Exemplificação do nível de distorção harmônica total de tensão para as duas condições ilustradas anteriormente – Caso 01.	64
Figura 4.12 - Potências aparentes nos diversos intervalos citados – Caso 01.	65
Figura 4.13 - Potências ativas nos diversos intervalos citados – Caso 01.	66
Figura 4.14 - Potências reativas nos diversos intervalos citados – Caso 01.	67
Figura 4.15 – Tensão eficaz das fases A, B e C na Barra 1 e seus intervalos de variação – Caso 02.	68
Figura 4.16 – Ângulos α e β para adequação da tensão – fase A – Caso 02.	69
Figura 4.17 – Ângulos α e β da fase B para adequação da tensão – Fase B – Caso 02.	70
Figura 4.18 – Ângulos α e β da fase C para adequação da tensão – Fase C – Caso 02.	71
Figura 4.19 – Tensões e correntes da fase A injetadas no primário do transformador série – Caso 02.	72
Figura 4.20 – Tensões e correntes da fase B injetadas no primário do transformador série – Caso 02.	73
Figura 4.21 – Tensões e correntes da fase C injetadas no primário do transformador série – Caso 02.	74
Figura 4.22 – Tensões das fases A, B e C corrigidas no barramento 2 – Caso 02.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de equipamentos de compensação para sistemas de distribuição	38
Tabela 4.1 - Parâmetros do Compensador Eletromagnético de tensão - CET	56
Tabela 4.2 - Tensões de Operação Adotadas para o Barramento 1 – Caso 01.....	58
Tabela 4.3 - Cálculo dos ângulos Alfa e beta – Caso 01	59
Tabela 4.4 - Tensões e correntes de injeção no transformador série – Caso 01.....	61
Tabela 4.5 - Tensões de da Barra 1 e Barra 3 – Caso 01.....	62
Tabela 4.6 - Potências Aparentes em kVA entre os barramentos citados – Caso 01	65
Tabela 4.7 - Potências Ativas em kW entre os barramentos citados – Caso 01.....	66
Tabela 4.8 - Potências Reativas em kVAr entre os barramentos citados – Caso 01	67
Tabela 4.9 - Tensões de Operação Adotadas para a Fase A, B e C da Barra 1 – Caso 02	69
Tabela 4.10 - Ângulos Alfa e Beta para a fase A – Caso 02	70
Tabela 4.11 - Ângulos Alfa e Beta da fase B – Caso 02	70
Tabela 4.12 - Ângulos Alfa e Beta da fase C – Caso 02	71
Tabela 4.13 - Tensões e correntes de injeção da fase A no transformador série – Caso 02.....	72
Tabela 4.14 - Tensões e correntes de injeção da fase B no transformador série – Caso 02.....	73
Tabela 4.15 - Tensões e correntes de injeção da fase C no transformador série – Caso 02.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ATP	Alternative Transients Program
CCT	Capacitores chaveados a Tiristores
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CET	Compensador Eletromagnético de Tensão
DVR	Dynamic Voltage Regulator
RCT	Reatores controlados a Tiristores
EPRI	Electrical Power Research Institute
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
PWM	Pulse Width Modulation
RNS	Reator à Núcleo Saturado
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SIPCON P	Siemens Power Conditioner - Parallel
SIPCON S	Siemens Power Conditioner - Series
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
VSI	Voltage Source Inverter
VMT	Variações Momentâneas de Tensão
UPFC	Unified Power Flow Controller

LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{V}_1$	Tensão na barra supridora
$\dot{V}_2$	Tensão na barra consumidora
V	Tensão na carga
$\Delta\dot{V}$	Queda de tensão entre a Barra $\dot{V}_1$ e a barra $\dot{V}_2$
$\dot{I}_L$	Corrente de carga
Z_S	Impedância do circuito equivalente de Thevenin
R_S	Resistência do circuito equivalente de Thevenin
X_S	Reatância do circuito equivalente de Thevenin
P_L	Potência ativa desenvolvida pela carga
Q_L	Potência reativa desenvolvida pela carga
ΔV_R	Queda de tensão imposta pela resistência R_S
ΔV_X	Queda de tensão imposta pela reatância X_S
S_{cc}	Potência aparente de curto circuito da barra $\dot{V}_1$
P_{cc}	Potência ativa de curto circuito da barra $\dot{V}_1$
Q_{cc}	Potência reativa de curto circuito da barra $\dot{V}_1$
I_{cc}	Corrente de curto circuito da barra $\dot{V}_1$
Z_{cc}	Impedância de curto circuito da barra $\dot{V}_1$
Φ_{cc}	Ângulo de defasagem da impedância do circuito equivalente de Thevenin

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A melhoria da qualidade do fornecimento de energia elétrica é um processo que vem se aperfeiçoando com o transcorrer do tempo, não somente por parte das empresas concessionárias de energia elétrica, como também motivada pelos consumidores e agentes reguladores como a ANEEL [1] e [2]. Neste cenário, dentre outros indicadores, quando da violação dos níveis preconizados, medidas corretivas devem ser utilizadas para a restauração do suprimento aos padrões exigidos e, neste campo, as questões associadas com a regulação das tensões constituem-se em tema de grande relevância nos contextos nacional e internacional. Neste contexto, muito embora o reconhecimento de uma extensa gama de produtos destinados à regulação de tensão disponíveis no mercado, o tema ainda tem motivado pesquisadores para a elaboração de novas concepções de tecnologias, em que pesem desafios como: simplicidade operacional, robustez, custos de investimentos competitivos, instalações físicas com menores níveis de exigências, custos de manutenção reduzidos, maior índice de nacionalização, propriedades operativas compatíveis com os requisitos impostos, dentre outras questões almejadas para qualquer outro seguimento da engenharia.

À luz destes fatos e, ainda, não obstante a existência de uma série de produtos baseados em tecnologias diversas (potências reativas ou compensação direta de tensão), o

presente trabalho destina-se a apresentação dos avanços associados com uma nova concepção de dispositivo, totalmente eletromagnético, e que utiliza o princípio da compensação via injeção série da parcela de tensão necessária ao atendimento aos propósitos da regulação dinâmica desta grandeza empregando-se, para tanto, meios eletrônicos para o controle e compensação almejada.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

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

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

Focando a estratégia da potência reativa, surge a técnica clássica do emprego de bancos de capacitores e/ou reatores, fixos ou variáveis. No que tange aos mecanismos que proporcionam alterações das respectivas potências, fornecidas ou consumidas, há ainda de se reconhecer o emprego de recursos mecânicos, eletromagnéticos e eletrônicos. O tema, de modo geral, é bastante clássico e os dispositivos comercialmente em uso dispensam comentários adicionais, a não ser pela menção que os arranjos mecânicos se caracterizam pelo emprego de contadores, chaves ou disjuntores; os eletromagnéticos se baseiam na não linearidade dos materiais utilizados e os eletrônicos nos recursos tecnológicos amplamente

difundidos. Não obstante tal reconhecimento vale ressaltar que, em se tratando dos equipamentos com controle eletrônico, uma das tecnologias mais comumente difundidas na atualidade se apresenta na forma dos conhecidos RCTs (reatores controlados a tiristores) e CCTs (capacitores chaveados a tiristores), já em uso há décadas e com eficácia comprovada [3]. Quanto aos dispositivos provenientes do controle do nível de saturação, estes foram largamente utilizados no passado e, atualmente, tal tecnologia tem sido alvo de investigações a exemplo de [4] e [5], visto que a estratégia pode se mostrar atrativa para algumas aplicações particulares.

Ainda no contexto da filosofia de compensação da tensão fundamentada no fornecimento ou consumo de potências reativas, não se pode deixar de mencionar os conhecidos compensadores síncronos, em uso há longa data e ainda, oferecendo, para aplicações específicas, uma alternativa bastante atrativa [6].

Por fim e ainda inserido nos mesmos princípios supramencionados, na atualidade, através dos recursos disponibilizados pela eletrônica de potência, surgiu um novo conceito, já materializado na forma de produtos comerciais. Nesta categoria incluem-se dispositivos diversos, com as denominações distintas, conforme seus fabricantes, os quais atuam no sentido de propiciar injeções ou consumos de potências reativas através de equipamentos eletrônicos que se apresentam fisicamente constituídos por arranjos conversores capazes de atuar como dispositivos que oferecem meios para a adequação dos níveis de tensão utilizando, para tanto, o princípio do controle da magnitude da tensão e respectivo ângulo de fase através de disparos programados para as chaves eletrônicas que compõem as unidades inversoras. Este é o caso dos denominados recursos comerciais STATCOM, SIPCON P, dentre outros [7], [8] e [9]. Tais produtos encontram-se embasados numa filosofia construtiva e operacional em consonância com o denominado UPFC [10].

Alternativamente, o processo da compensação da tensão, como anteriormente referido, pode empregar dispositivos capazes de atuar diretamente sobre esta grandeza através da alteração direta da mesma com vistas a promover a sua adequação aos padrões exigidos. Isto pode ser conseguido pela alteração manual ou automática de tapes ou pela inserção de tensões controladas, aditivas ou subtrativas, àquelas disponibilizadas pela rede supridora. Inserido neste contexto se apresentam produtos comerciais bastante clássicos, a exemplo dos reguladores eletromagnéticos: Toshiba TB-R1000, também os reguladores de fabricação brasileira COOPER VR-32 e o ITB RAV-2. [11], [12] e [13].

Ainda dentro do cenário dos dispositivos atuantes diretamente sobre os níveis das tensões surgiram, há relativamente pouco tempo, linhas mais modernas de produtos que empregam recursos da eletrônica de potência. Estes equipamentos possuem como filosofia básica a produção e injeção de tensões complementares à de suprimento, de forma aditiva ou subtrativa, que proporcionam incrementos de tensões com valores e posicionamentos angulares eletronicamente controláveis. Tais recursos, caso desejado, podem ainda viabilizar a compensação de forma independente por fase, contribuindo, concomitantemente, para o equilíbrio do suprimento. Dentro desta linha de equipamentos ressaltam as tecnologias comercialmente conhecidas por SIPCON S, DVR, Softswitching DySC, dentre outros [9], [14], [15], [16], [17], [18] e [19].

1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

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

- Estabelecimento de uma estratégia para o controle eletrônico da tensão de compensação;

- Modelagem computacional do equipamento de regulação e da nova concepção de controle e chaveamento;
- Avaliação computacional do desempenho da estratégia de compensação.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de atender as metas supracitadas, esta dissertação apresenta-se estruturada, além deste capítulo introdutório, pelas seguintes unidades:

Capítulo II – Estado da Arte sobre As Filosofias de Compensação de Tensão

Este capítulo destina-se a descrição dos equipamentos, que já estão disponíveis no mercado brasileiro, com destaque as duas linhas mestras de concepção de reguladores: aqueles que atuam diretamente nos níveis de tensão, a exemplo dos princípios operacionais para transformadores com tapes variáveis, e outros, contemplando a correlação entre o consumo ou fornecimento de reativos e seus impactos sobre as tensões.

Capítulo III – Nova Proposição do Compensador Eletromagnético de Tensão – Estrutura Física, Controle e Modelagem

Esta unidade é dedicada a uma descrição do arranjo físico que compõe a unidade de potência do CET (Compensador Eletromagnético de Tensão), bem como duas de suas filosofias de controle e chaveamento. Uma primeira caracterizada por chaveamentos de tapes discretos, e uma segunda, objeto desta

dissertação, por chaveamento contínuo. A partir destes conceitos, com destaque ao segundo, são apresentadas as lógicas utilizadas para a modelagem do equipamento e controle no simulador ATP e obtido o produto principal para a realização dos estudos avaliativos, nos termos abaixo postos.

Capítulo IV – Estudo de Casos

Esta seção encontra-se imbuída do propósito de, através de investigações computacionais, evidenciar a eficácia da proposta de controle ao processo da compensação dinâmica de tensões. Para tanto, através de um caso hipotético, são feitos estudos diante da ocorrência de distúrbios manifestados na forma de variações súbitas de tensão junto ao supridor, os quais foram admitidos como de origem equilibrada e desequilibrada. Também, visando ressaltar o processo da restauração da tensão para diferentes patamares para os desvios desta grandeza, diferentes níveis de redução e elevação são empregados.

Capítulo V – Conclusões Gerais

Este último capítulo destina-se a sintetizar os principais pontos abordados em cada um dos capítulos anteriores, assim como oferecer uma discussão mais ampla sobre os resultados obtidos na pesquisa, visando, sobretudo, realçar as conquistas atingidas, limitações impostas pelo atual estágio dos desenvolvimentos e as perspectivas futuras para a melhoria do dispositivo e sua filosofia de controle como um todo.

Referências Bibliográficas

Por fim, condensa-se o material bibliográfico utilizado para o desenvolvimento da dissertação.

CAPÍTULO II

ESTADO DA ARTE SOBRE AS FILOSOFIAS DE COMPENSAÇÃO DA TENSÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo, ainda de caráter introdutório, visa sintetizar e descrever os equipamentos utilizados em âmbito nacional e internacional para controle dos níveis adequados da tensão de suprimento e suas respectivas filosofias de controle e atuação. Dentre todos os dispositivos em uso na área de atuação acima descrita, duas filosofias de atuação se destacam: A primeira, que pode ser descrita como um controle da tensão utilizando-se de meios indiretos, ou seja, os que empregam da compensação reativa nas barras, destacando ora pois, os equipamentos denominados por fornecedores de reativos e aqueles associados com o consumo de reativos.

No contexto dos dispositivos consumidores de reativos há de se reconhecer, de imediato, aqueles de natureza eletromagnética, como o reator à núcleo saturado e o compensador síncrono que pode atuar na geração ou consumo de reativos. No cenário dos fornecedores ressaltam-se os clássicos capacitores fixos ou variáveis. Ainda, neste contexto filosófico, há aqueles que se valem de alguns meios eletrônicos de chaveamento conhecidos como RCT, CCT e STATCOM.

A segunda filosofia, utilizando um meio direto para compensação do nível de tensão, ou seja, atuando na grandeza propriamente dita, se vale de recursos similares aos

anteriormente citados. Alguns dos equipamentos eletromagnéticos que serão descritos são muito conhecidos no mercado como o Toshiba TB-R1000 e os equipamentos de fabricação brasileira COOPER VR-32 e ITB RAV-2. Há também os que utilizam recursos mais caros e altamente tecnológicos e com propriedades operativas bastante atrativas. Estes fazem uso dos recursos mais finos na eletrônica de potência, e que ainda fazem parte do grupo de atuação direta. Nesta família se encontram o: DVR, o SIPCON S da Siemens, o DySC da Softswitching, dentre outros.

Portanto, o presente capítulo, como já dito, de carácter introdutório, almeja sintetizar os principais conceitos associados com a questão da regulação de tensão e, na sequência, apresentar e descrever alguns produtos comercialmente em uso no país e exterior.

2.2 MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE TENSÃO

O controle dos níveis de tensão é um assunto de extrema importância para o contexto de transmissão e distribuição de energia elétrica, pois, partindo deste, pode-se ter a exata dimensão da possibilidade de carregamento das linhas, atendimento de novas cargas com os sistemas já instalados e o cumprimento da legislação vigente e aplicável.

Dentre os métodos empregados para o processo da restauração dos padrões de tensão de suprimento reconhece-se a existência de processos e produtos que se fundamentam na compensação de reativos, e outros, baseados na regulação direta das tensões, como detalhado a seguir:

2.2.1 MÉTODOS INDIRETOS [6]

Sob esta terminologia, esta dissertação considera os procedimentos que encontram fundamentação na correlação clássica entre os níveis de tensão e as potências reativas atreladas com o funcionamento dos complexos elétricos. Para uma melhor compreensão desta estratégia, os desenvolvimentos realizados na sequência culminam em uma relação

matemática direta entre as duas grandezas ora referidas, fato este que ratifica o princípio de compensação ora mencionado.

Fundamentalmente, a regulação de tensão pode ser definida como a variação proporcional da tensão de alimentação associada a uma mudança na corrente de carga. Isto é causado pela queda de tensão na impedância da fonte que alimenta a carga, portanto, dependente da impedância do alimentador e da corrente de carregamento advinda da rede de alimentação. Assim sendo, para o entendimento do tema, pode-se empregar um circuito simplificado como indicado na figura 2.1(a), de onde pode-se escrever que a queda de tensão é:

$$\Delta \dot{V} = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 = Z_S \cdot \dot{I}_L \quad (2.1)$$

Sendo:

$$\dot{Z}_S = R_S + jX_S \quad (2.2)$$

$$\dot{I}_L = \frac{P_L - jQ_L}{\dot{V}} \quad (2.3)$$

De onde:

$$\Delta \dot{V} = (R_S + jX_S) \left(\frac{P_L - jQ_L}{\dot{V}} \right) \quad (2.4)$$

$$\Delta \dot{V} = \left(\frac{R_S \cdot P_L + X_S \cdot Q_L}{\dot{V}} \right) + j \left(\frac{X_S \cdot P_L - R_S \cdot Q_L}{\dot{V}} \right) \quad (2.5)$$

$$\Delta \dot{V} = \Delta V_R + j\Delta V_X \quad (2.6)$$

A variação de tensão possui uma componente ΔV_R em fase com $\dot{V}$ e uma componente ΔV_X em quadratura, como ilustra a figura 2.1(b).

Com a introdução do compensador em paralelo com a carga, a figura 2.1(c) passa a representar o novo arranjo formado.

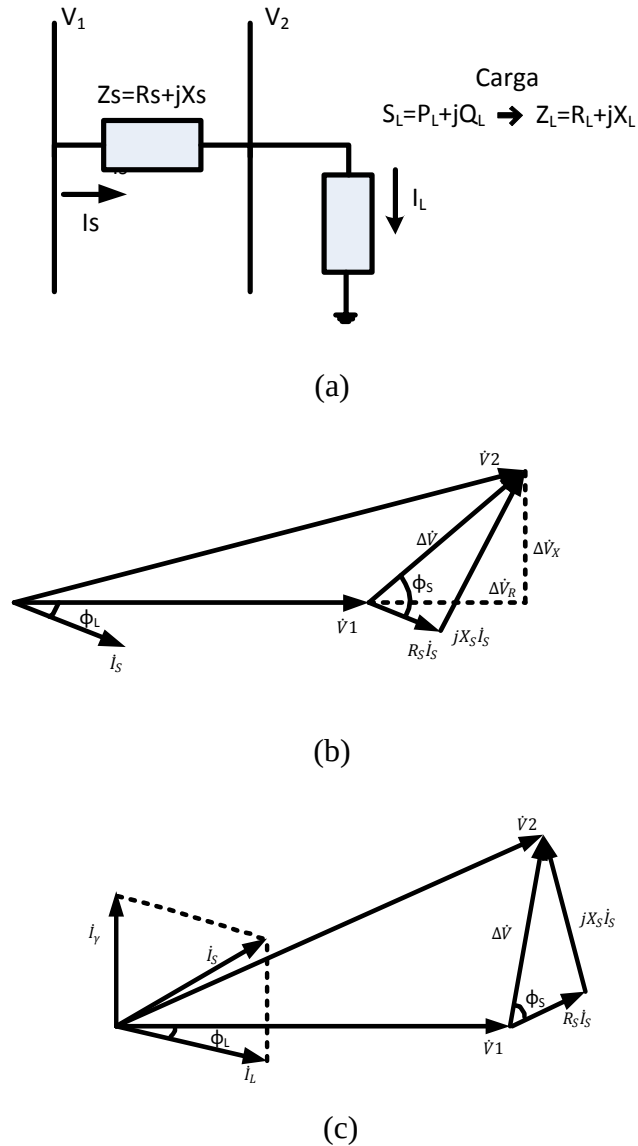


Figura 2.1 - Circuito equivalente do alimentador e diagramas fasoriais – sem e com compensação. (a) – Circuito equivalente da carga e sistema de alimentação, (b) – Diagrama fasorial da figura 2.1(a) (sem compensação) e (c) – Diagrama fasorial da figura 2.1(a) (com compensação)

Se o sistema supridor se apresenta com uma potência de curto-circuito dada por:

$$S_{cc} = P_{cc} + jQ_{cc} = \dot{V}_1 \cdot I_{cc}^* = \frac{\dot{V}_1^2}{Z_{cc}^*} \quad (2.7)$$

Onde:

$$\dot{Z}_{cc} = R_s + jX_s \quad (2.8)$$

E $\dot{I}_{sc}$ a corrente de curto-circuito.

Nestes termos:

$$R_s = Z_{cc} \cos \Phi_{sc} = \frac{V_1^2}{S_{cc}} \cos \Phi_{cc} \quad (2.9)$$

$$X_s = Z_{cc} \sin \Phi_{cc} = \frac{V_1^2}{S_{cc}} \sin \Phi_{cc} \quad (2.10)$$

$$\tan \Phi_{cc} = \frac{X_s}{R_s} \quad (2.11)$$

Substituindo as equações (2.9) e (2.10) em (2.7) e normalizando ΔV_R e ΔV_X para a tensão V (valor de referência ou nominal), e admitindo que $V_1/V \approx 1$, tem-se:

$$\frac{\Delta V_R}{V} \approx \frac{1}{S_{cc}} P_L \cos \Phi_{cc} + Q_L \sin \Phi_{cc} \quad (2.12)$$

e:

$$\frac{\Delta V_X}{V} \approx \frac{1}{S_{cc}} P_L \sin \Phi_{cc} - Q_L \cos \Phi_{cc} \quad (2.13)$$

Frequentemente, a parcela de queda de tensão ΔV_x é ignorada pois esta componente proporciona um efeito majoritário apenas sobre a variação de fase da tensão do ponto de alimentação (relativa a $\dot{V}_1$).

Em vista das simplificações acima adotadas tem-se que:

$$\frac{\Delta V_R}{V} \approx \frac{1}{S_{CC}} P_L \cos \Phi_{CC} + Q_L \sin \Phi_{CC} \quad (2.14)$$

E ainda, se a resistência R_S da fonte de alimentação é significativamente inferior ao valor da correspondente reatância X_S , respeitadas as adoções feitas, sob a ação de uma variação da potência fornecida pelo alimentador à carga, a regulação de tensão passa a ser:

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta V_R}{V} = \frac{\Delta Q_L}{S_{CC}} \sin \Phi_{CC} \approx \frac{\Delta Q_L}{S_{CC}} \quad (2.15)$$

A expressão acima evidencia a forte relação existente entre a tensão e a potência reativa, de onde se pode constatar que, se o complexo elétrico passa a contar com um dispositivo capaz de fornecer ou consumir potência reativa de forma dinâmica, esta grandeza, em conjunto com o consumo de reativos exigidos pela carga, pode exercer uma expressiva ação sobre o barramento supridor, em consonância com o desempenho operacional mostrado na figura 2.2. Esta última, embora aproximada, é bastante útil para uma visualização do comportamento do compensador no sistema de alimentação quanto a sua influencia sobre a tensão do barramento.

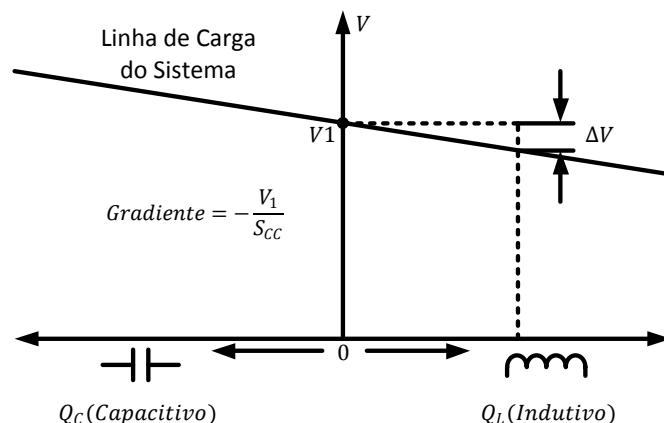


Figura 2.2 – Característica tensão versus potência reativa

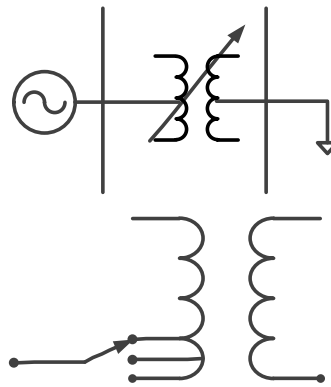
Com isso fica demonstrado que um equipamento que se utiliza da solicitação de potência reativa pode afetar as variações de tensões passíveis de ocorrência para o barramento onde este se encontra inserido, assim como em outros adjacentes. Diante do exposto, há uma compreensão que os recursos em pauta se apresentam como uma relação indireta entre as grandezas em foco (potências reativas e tensões), motivo este que gerou a denominação aqui utilizada.

2.2.2 MÉTODOS DIRETOS [6]

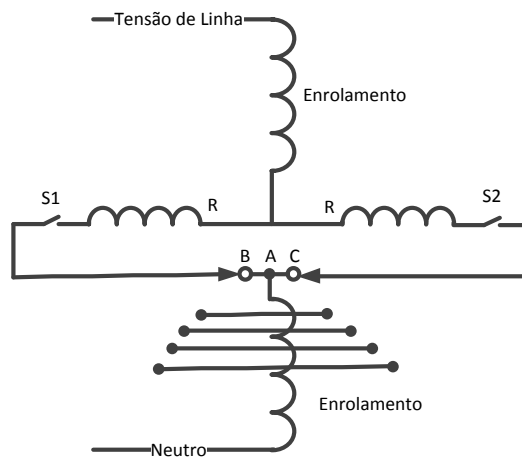
O segundo método aqui tratado se encontra fundamentado nas tecnologias que atuam diretamente sobre os níveis de tensão dos barramentos através de equipamentos que se valem da variação de taps ou de uma estratégia de adição ou subtração de uma parcela de tensão visando os propósitos da regulação de tensão.

Dada à premissa supracitada, esta terminologia, então, pode ser designada aos clássicos reguladores de tensão, fixos ou automáticos, que podem ser comutados sob carga ou não, a fim de estabilizar os níveis de tensão nas barras de suprimento em consonância com a legislação vigente.

Uma das mais tradicionais soluções que se enquadra nesta categoria pode ser compreendida através da ilustração contida na figura 2.3(a) a qual mostra, de forma esquemática, um transformador com mudança de taps destinado à operação a vazio. Complementarmente, a figura 2.3(b) corresponde a um transformador com mudança de taps sob carga.



(a)



(b)

Figura 2.3 – Ilustração dos arranjos físicos utilizados para transformadores com mudança de taps: (a) equipamento para operação vazio e (b) equipamento para operação sob carga.

Para a figura 2.3(b), pode-se observar que os taps de comutação se encontram na posição onde existe a máxima tensão a ser disponibilizada pelo transformador, e sua respectiva corrente de carga é dividida igualmente entre as duas metades da bobina R,

resultando assim num fluxo zero e, conseqüentemente, numa impedância mínima para a bobina R. O procedimento de mudança de tapes, para diminuição do valor eficaz da tensão, ocorre com a abertura da chave S1 o que implica em dizer que a corrente de carga passa, agora, somente pela outra metade do reator R. O contato B então move-se para o tape mais abaixo e, então, novamente é fechada S1. Decorrente desta ação existe uma corrente circulante na bobina R imposta pela corrente de carga. Para que isto não ocorra, a chave S2 abre e o contato C move para o tape mais abaixo. Novamente a chave S2 é fechada e, assim, é restaurado o fluxo zero na bobina R. Com isto, pode-se concluir, que para alteração do tape de um transformador de comutação de tape sob carga há necessidade de se cumprir 6 etapas até que a restauração da tensão seja obtida. Isto se constitui numa das grandes restrições do produto quanto aos aspectos: tempo de resposta e efeitos sobre desgastes de peças e componentes.

A fim de complementar a ilustração sobre o emprego de transformadores com comutação de tapes e destinados à regulação de tensões de um alimentador radial, a figura 2.4 mostra dois reguladores nos termos aqui referidos. Como pode ser constatado a estratégia para a regulação aqui ilustrada compreende o uso de dois equipamentos em série, um junto à denominada barra emissora (V_1) e outro na barra receptora (V_2). Assim, considerando que os transformadores reguladores encontram-se operando com tapes de operação definidos pelas grandezas t_s e t_r , a expressão de V_2 em função dos parâmetros estabelecidos pelo circuito elétrico ilustrado é dada por (2.16). Vale ressaltar que as tensões intermediárias na saída do primeiro transformador (V_s) e na entrada do segundo transformador (V_r) não compõem a referida equação por serem grandezas conseqüentes dos tapes empregados.

$$V_2 = \frac{1}{2} [t_s^2 \cdot V_1 \pm t_s \sqrt{t_s^2 \cdot V_1^2 - 4(R + jX)}] \quad (2.16)$$

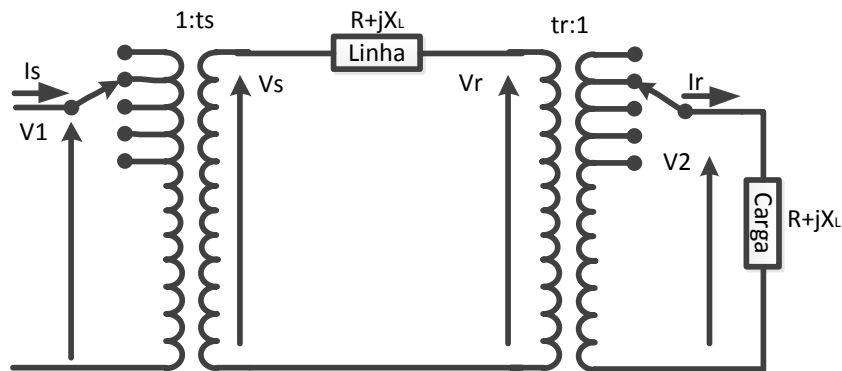


Figura 2.4- Ilustração de uma estratégia de regulação de tensão através de 2 transformadores com mudança de tape em uma linha radial

Somado a estratégia anterior, há ainda a se considerar que, à luz dos avanços oferecidos pela eletrônica de potência, dispositivos embasados em filosofias mais recentes têm sido disponibilizados no mercado. Estes se apresentam na forma de uma linha de reguladores genericamente denominada por Controlador de Fluxo de Potência Unificado ou UPFC (*Unified Power Flow Controller*), cujo esquema de conexão com o sistema CA é mostrado na figura 2.5, como reportado em [10].

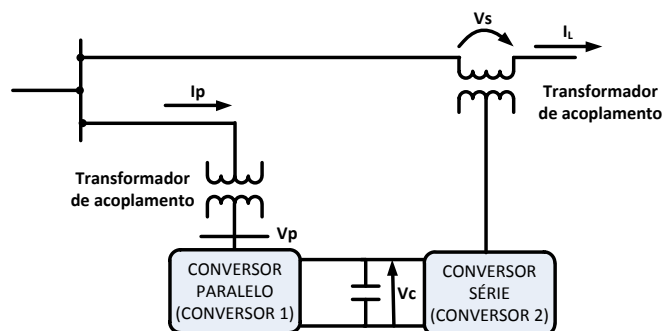


Figura 2.5 - A concepção de um regulador de tensão da tecnologia UPFC.

Como pode ser observado na figura 2.5, o UPFC é constituído por dois conversores do tipo VSI, alimentados a partir da mesma fonte de corrente contínua. Desse modo, o conversor 1 (paralelo) pode fornecer ou absorver potência reativa em relação à rede de conexão, e ainda, prover a potência ativa destinada ao suprimento do conversor 2. Este último, por sua vez, fornece uma tensão controlada em magnitude e ângulo de fase que se destina à injeção série

com o alimentador. Portanto, o primeiro conversor se enquadra na categoria dos dispositivos compensadores de reativos (método indireto), enquanto que a estrutura operacional do conversor 2 encontra sintonia com a filosofia utilizada pelo denominado método direto.

Para uma melhor compreensão do dispositivo intitulado UPFC, a figura 2.6 ilustra, na forma de diagramas fasoriais, a estratégia de compensação oferecida pelo equipamento em pauta. Pode-se, com clareza, constatar que a tensão injetada em série com o alimentador pode proporcionar um mecanismo de regulação em módulo e ângulo da tensão nos terminais da barra receptora.

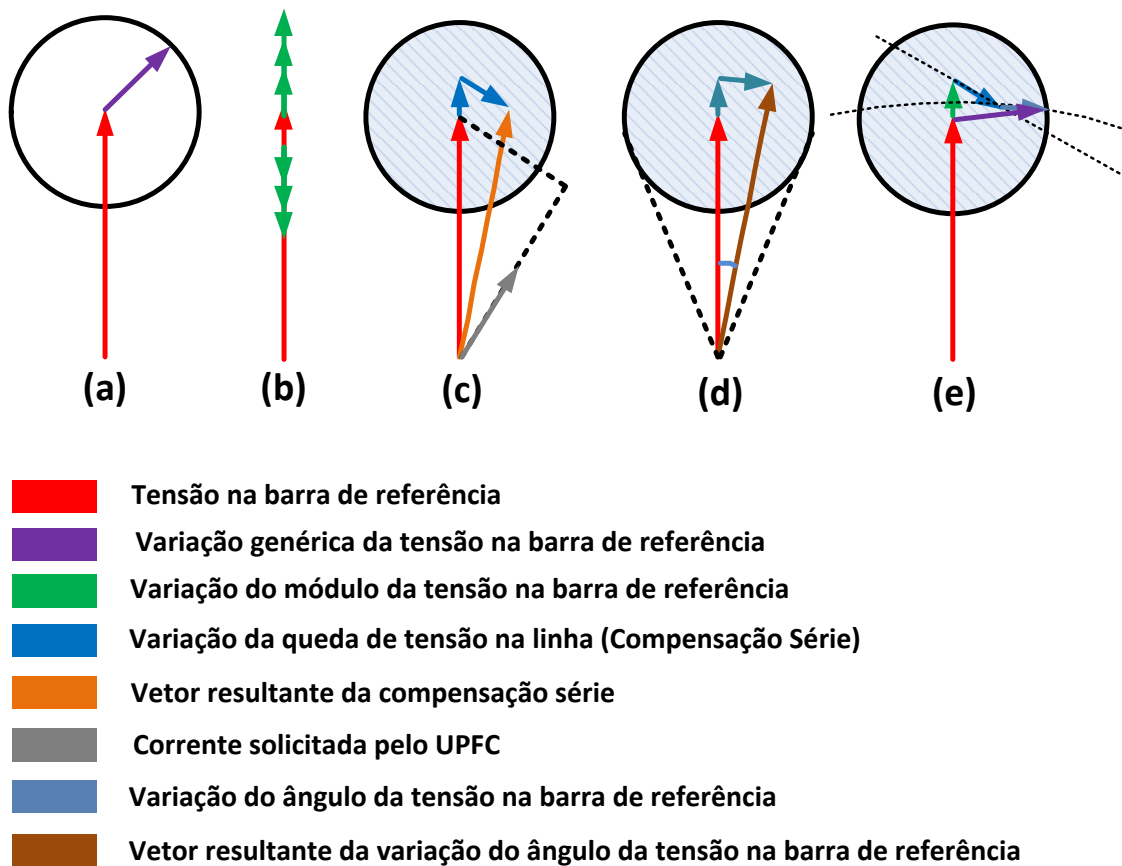


Figura 2.6 – Conceituação básica da operação do UPFC: (a) variação de tensão na forma geral; (b) variação apenas em módulo da tensão (compensação em derivação); (c) variação da queda de tensão na linha (compensação série); (d) variação do ângulo de tensão; (e) Operação simultânea das compensações em derivação, série e defasamento angular.

Não obstante os comentários acima, na sequência dos trabalhos, serão detalhados equipamentos comerciais específicos e tendências para os novos dispositivos já oferecidos em âmbito nacional.

2.3 DISPOSITIVOS PARA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS VIA MÉTODOS INDIRETOS

Objetivando apresentar uma síntese dos principais equipamentos comerciais utilizados para fins da compensação da tensão, os quais se apresentam conectados em paralelo com o barramento controlado, reconhece-se os seguintes produtos:

- Compensadores com chaveamento mecânico;
- Compensadores síncronos;
- Compensadores baseados em chaveamentos tiristorizados;
- Compensadores à núcleo saturado;
- Compensadores estáticos à conversores PWM.

Nas subseções seguintes são apresentados alguns dos principais dispositivos acima referidos. Vale ressaltar que muito embora se reconheça a existência de compensadores fundamentados no emprego de capacitores e indutores em série, estes, diante da menor expressão quantitativa, em especial quanto a utilização em sistemas de distribuição, não são aqui contemplados.

2.3.1 COMPENSADORES COM CHAVEAMENTO MECÂNICO [6]

A literatura claramente mostra a coexistência de dois equipamentos que primeiramente se destacaram no cenário da compensação da energia reativa. Estes são os bancos de capacitores e reatores. Ambos são equipamentos disseminados por todo o sistema elétrico devido seu alto nível de confiabilidade e requerimento mínimo de manutenção. Como é de se esperar, os pontos anteriormente citados são de extrema importância, porém, o método

de chaveamento destes componentes pode comprometer o tempo de resposta para uma pronta recuperação das tensões e seus impactos sobre a estabilidade do sistema. O diagrama da figura 2.7 ilustra arranjo físico do digrama de conexão de banco de capacitores e um reator linear. Já as figuras 2.8 e 2.9 ilustras, respectivamente, uma fotografia de um módulo de banco de capacitores para subestação da empresa Shreem Americana e a fotografia de um Reator Linear pertencente a subestação da Eletronorte em Cuiabá – MT.

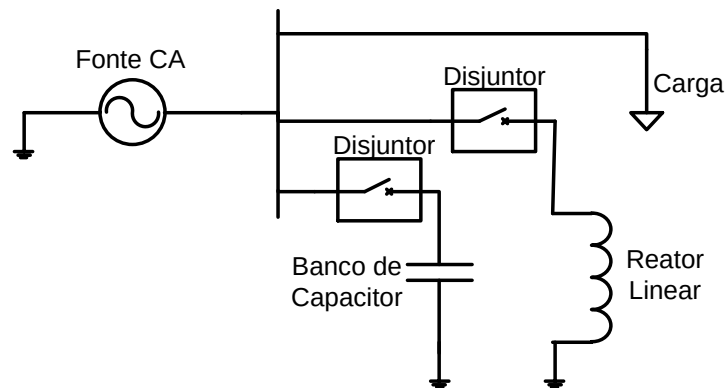


Figura 2.7- Arranjo físico de um banco de capacitor e um reator linear conectado a uma barra.



Figura 2.8 – Módulo de um banco de capacitores para subestação da empresa Shreem Americana.



Figura 2.9 – Reator Linear de uma subestação da Eletronorte em Cuiabá – MT.

2.3.2 COMPENSADOR SÍNCRONO [6]

O compensador síncrono constitui-se uma máquina construtivamente similar aos geradores, entretanto, destinado tão somente ao processo da absorção ou injeção de energia reativa da rede. Esta propriedade é vista com bons olhos pelas empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia elétrica, pois utilizando somente um equipamento é possível o controle do fluxo de potência reativa nos pontos de acoplamento, o que torna a regulação dos níveis de tensão muito mais simples de se executar. Esta propriedade pode ser utilizada a partir da sobre-excitação ou sub-excitação do enrolamento de campo destas máquinas, fato este que determina que a capacidade de absorção ou injeção de potência reativa depende exclusivamente do tempo de resposta do controle da corrente de campo. Isto implica que o tempo de resposta total deste equipamento o torna muitas vezes inadequado para algumas situações de uso. Este equipamento, em uso a longa data, foi amplamente difundido nos sistemas elétricos de potência e sua instalação, por motivos bastante conhecidos, influencia diretamente no aumento do nível da potência de curto-circuito da barra, o que é extremamente indesejado em alguns casos, pois pode exigir a troca dos equipamentos de manobra e alguns equipamentos de proteção. Por outro lado, isto pode tornar o sistema mais estável, fato este bastante atrativo para outras aplicações. Com relação à questão da manutenção, a literatura aponta para o fato de que este equipamento exige

manutenção preventiva e corretiva a ser realizadas com frequência. As figuras 2.10 e 2.11 mostram, respectivamente, o arranjo físico e um exemplo de equipamento instalado em uma subestação no estado do Maranhão.

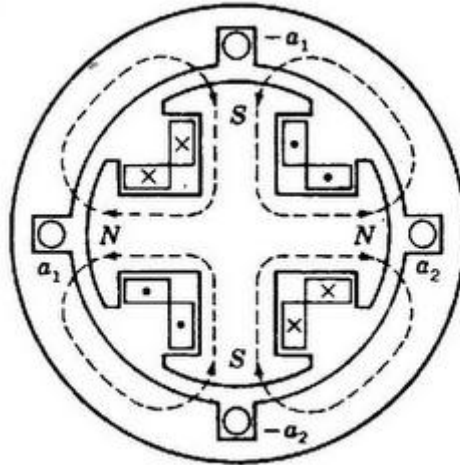


Figura 2.10 – Arranjo físico do Compensador Síncrono.



Figura 2.11 – Foto de um compensador síncrono instalado em uma subestação no estado do Maranhão.

2.3.3 REATOR À NÚCLEO SATURADO [4]

Conciliando a ideia de um dispositivo totalmente eletromagnético, com baixo índice de manutenção, juntamente com um bom desempenho efetivo e baixo custo, o reator à

núcleo saturado [4] surge um dispositivo apropriado por finalidade da realização do controle do excedente de potência reativa nas barras. Este equipamento, primeiramente explorado na década de 70 e agora, no século 21, retomado por alguns pesquisadores [4] e [5], fundamenta-se numa combinação de um núcleo magnético com características não lineares e enrolamentos especiais para realização da regulação de tensão de forma dinâmica e rápida. Seu núcleo magnético é especialmente projetado afim de que seu ponto de saturação ocorra ao atingir a tensão de operação, a qual está propositalmente ajustada a nível um pouco abaixo da tensão nominal do sistema. A principal característica deste tipo de equipamento é o fato de que possui uma reatância auto ajustável e não necessitando assim de equipamentos de controle, o que o torna ideal para sistemas isolados, sem acesso a mão-de-obra qualificada. Por ser um equipamento não linear, o reator a núcleo saturado produz ordens harmônicas de correntes, que em determinados sistemas, podem afetar a qualidade do produto, porém, as bobinas que compõem o núcleo magnético podem ser arranajadas de várias formas, a citar os casos dos reatores *twin-tripler* e o *treble-tripler*, fazendo uma compensação destas ordens harmônicas pelo próprio equipamento, e conseqüentemente, uma melhoria em seu aspecto mais negativo. A figura 2.12 ilustra o arranjo físico empregado pelo dispositivo a núcleo saturado e a figura 2.13 ilustra um reator a Núcleo Saturado de 3 MVar e 34,5 kV instalado na subestação de Várzea Grande no estado de Mato Grosso.

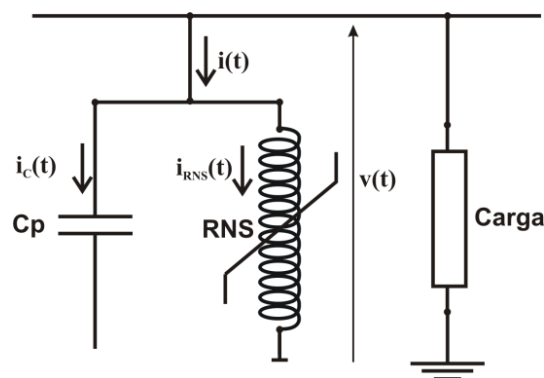


Figura 2.12 – Arranjo físico de um reator a núcleo saturado



Figura 2.13 –Reator a Núcleo Saturado de 3MVA_r e 34,5 kV.

2.3.4 REATOR CONTROLADO A TIRISTORES – RCT [3]

Este tipo de arranjo alia alguns elementos da eletrônica de potência juntamente com um reator linear, tornando o RCT um equipamento ideal para a compensação de excedente reativo em redes dinâmicas. A possibilidade de controle do montante de absorção de reativo se dá a partir do controle do valor eficaz da tensão que esta sendo aplicada ao reator linear. Sua plataforma de controle e chaveamento parte da atuação dos dispositivos semicondutores, cuja propriedade permite ao usuário limitar o período de aplicação da onda de tensão em cima do reator, através da utilização do ângulo de disparo, α , de ambos tiristores, de forma simétrica e constante. Seu ponto negativo é a geração de correntes harmônicas de ordem ímpar, porém, da mesma forma que o reator a núcleo saturado, o arranjo das bobinas componentes dos reatores, juntamente com o número de pulsos pré definidos, que se formam a partir do uso de transformadores com defasagens angulares diferentes, aprisiona a circulação de corrente de sequência zero e alguns níveis de ordens harmônicas de sequência positiva e

negativa. A figura 2.14 ilustra o arranjo físico de um RCT e a figura 2.15 ilustra o reator controlado a tiristores.

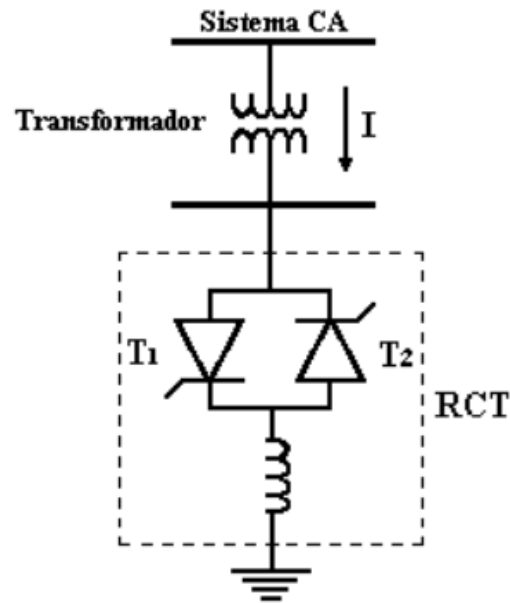


Figura 2.14 – Arranjo físico de um Reator Controlado a Tiristores – RCT.



Figura 2.15 - Ilustração de um Reator Controlado a Tiristores – RCT.

2.3.5 CAPACITOR CHAVEADO A TIRISTORES– CCT [3]

O capacitor chaveado a tiristores fornece a complementação do RCT, ou seja, este consegue fornecer a potência reativa necessitada pelo sistema. Este fornecimento acontece pela energização das unidades que compõem o banco de capacitor, em momentos diferentes ou simultâneos. Diferentemente do RCT, o fornecimento de potência reativa não pode ser controlado a partir da segmentação da forma de onda de tensão e, conseqüentemente, do módulo da tensão eficaz nos terminais do capacitor, então, utilizou-se a lógica de degraus, com várias unidades compondo o banco, de forma a abranger uma gama maior de solicitação de potência reativa. Seus tiristores possuem somente dois estágios, de condução total ou nula, portanto, o CCT apresenta característica senoidal de forma de onda de tensão e corrente. A figura 2.16 ilustra o arranjo físico do CCT e a figura 2.17 ilustra um banco de capacitores à esquerda e a direita ilustra as colunas de tiristores.

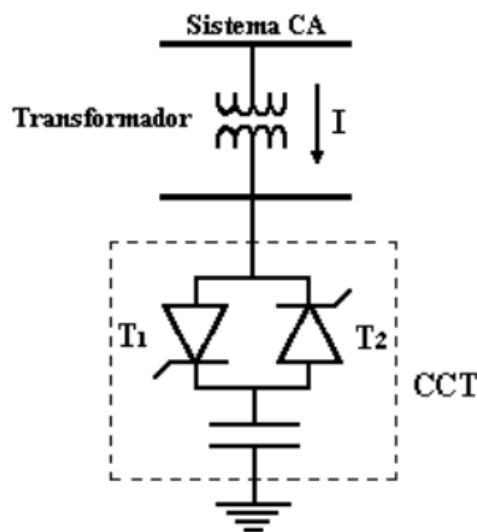


Figura 2.16 – Arranjo físico de um compensador tipo Capacitor Chaveado a Tiristores – CCT.



Figura 2.17 - Ilustração do Capacitor Chaveado a Tiristor – CCT.

2.3.6 STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR– STATCOM [7] E [9]

O STATCOM é um equipamento com estrutura física totalmente eletrônica e com propriedades operativas similares ao compensador síncrono. Sua estrutura paralela (*shunt*) é formada por um transformador acoplador, um capacitor e com um conversor multi-nível equipado com a linha mais fina da eletrônica de potência juntamente com um sistema de controle de pulsos. Seu princípio de funcionamento é executado a partir da defasagem da forma de onda de tensão de saída dos seus terminais perante a tensão da rede, fazendo com que a corrente solicitada pelo equipamento esteja defasada, seja atrasada, trabalhando como um reator, ou adiantada, operando como um capacitor. Para melhor exemplificar, pode se dizer que quando a tensão no elo CC de seu capacitor está sendo incrementada, o equipamento está trabalhando de maneira sobreexcitada, análoga ao compensador síncrono, gerando assim potência reativa. De forma contrária, o equipamento pode trabalhar subexcitado diminuindo a tensão em seus terminais de corrente contínua, operando, assim, como absorvedor de potência reativa. Com relação ao seu conversor multi-nível, a literatura deixa claro que a partir da escolha do tipo de modulação imposta pelo sistema de controle, não irá existir a necessidade crítica de filtros harmônicos. Outro ponto positivo é que, diferentemente do compensador síncrono, no qual seu tempo de resposta pode chegar a cerca

de 500 ms, o tempo de resposta máximo do STATCOM é de aproximadamente 30 ms, existindo casos onde a resposta foi registrada em 8 ms. Sua desvantagem é o alto custo de construção e implementação e a necessidade constante de existir equipamentos semicondutores sobressalentes, bem como mão de obra qualificada para efetuação de manutenção preventiva e corretiva. A figura 2.18 ilustra o arranjo físico de um STATCOM, enquanto a figura 2.19 ilustra o contêiner no qual estes componentes estão montados e a figura 2.20 ilustra o dispositivo comercialmente disponibilizado pela Hyosung Power.

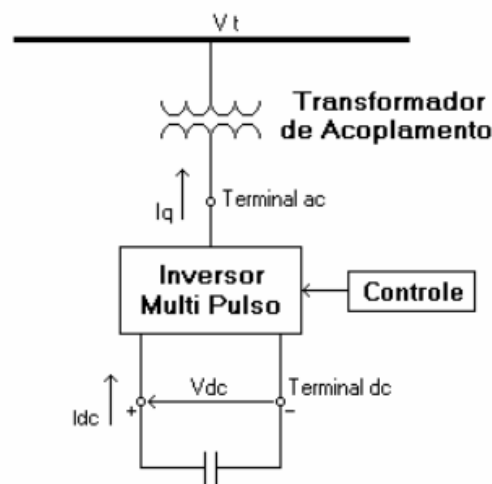


Figura 2.18 – Arranjo físico do STATCOM.



Figura 2.19 – Container contendo a estrutura do STATCOM



Figura 2.20 - Unidades que compõem o STATCOM.

2.3.7 SIEMENS SIPCON-P [9]

O equipamento designado por SIPCON P, cujo diagrama encontra-se na figura 2.21, do fabricante SIEMENS, segue a mesma característica de controle e atuação que o equipamento anteriormente citado, o STATCOM. Também é composto por uma unidade transformadora e de acoplamento, um módulo de chaveamento, utilizando-se para isso a chave semicondutora do tipo IGBT, que por sua vez é regido pelo sistema de controle de pulsos, bem como um capacitor, o qual proverá a potência necessária ao equipamento para realização do processo de compensação.

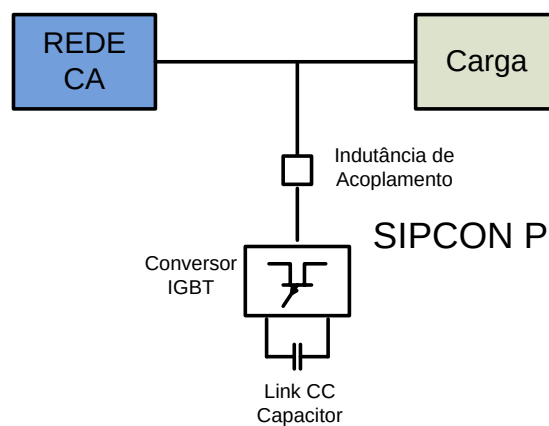


Figura 2.21 – Arranjo Físico do Siemens Sipcon-P.

2.4 DISPOSITIVOS PARA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS VIA MÉTODOS DIRETOS

A fim de exemplificar as filosofias de produtos embasados na estratégia denominada por método direto apresenta-se, na sequencia alguns equipamentos comercialmente disponíveis no mercado e que se valores de recursos atrelados com a alteração dos tapes de reguladores ou transformadores ou da adição de tensão, aditiva ou subtrativa, para o cumprimento de seus objetivos.

2.4.1 TOSHIBA TB-R1000 [11]

O regulador de tensão da Toshiba, denominado por TB-R1000, é um regulador destinado para efetuar o processo da regulação da tensão eficaz em linhas de distribuição. Sua estrutura básica é composta pelo regulador de tensão eletromagnético e um sistema de controle equipado com um processador tipo DSP para leitura da tensão e controle de tapes. Para fins de regulação dinâmica da tensão eficaz, o regulador em questão, disponibiliza 8 tapes de variação de 2,85%, sendo um deles o tape central. Como este equipamento disponibiliza uma chave para inversão de polaridade, sua estrutura permite a compensação de variações de tensão de regime permanente de até 0,2 pu., ou seja, afundamento de até 0,8 pu de tensão residual e elevações de até 1,2 pu de tensão residual. Com potência passante até 25 MVA, o regulador TB-R1000 possui diversos níveis de potências reais e níveis de tensão. Cabe ressaltar que para uma maior confiabilidade, o sistema conta o acionamento da chave *by-pass* para desligamento total do sistema e estabelecimento de conexão direta entra a carga e a fonte. A figura 2.22 ilustra a foto do regulador TB-R1000



Figura 2.22 – Foto do regulador de tensão Toshiba TB-R1000

2.4.2 COOPER VR-32 [12]

Seguindo com a filosofia de compensação direta tem-se, também, o regulador de tensão do fabricante Cooper Power System. Trata-se de um produto produzido no Brasil e com grande difusão no mercado nacional. Este regulador possui diversos níveis de tensão e potência, pois, como no caso do equipamento Toshiba, sua potência nominal deve ser igual ou maior do que a carga a ser suprida. A variação da regulação pode ser de até 12%, acima ou abaixo da tensão de operação, de 1 em 1 %. Possui o sistema CL-5C de automação para controle dos indicadores de desempenho. A figura 2.23 abaixo é uma imagem do equipamento descrito.



Figura 2.23 – Foto do equipamento Cooper VR-32

2.4.3 ITB RAV-2 [13]

De forma análoga a ambos os reguladores de tensão descritos, o regulador de tensão da fabricante brasileira ITB, denominado RAV-2, consiste num regulador automático de tensão, com 33 variações de tapes, possuindo variações de 0,625%, 16 acima da tensão de operação, 16 abaixo da tensão de operação e 1 tape central. A figura 2.24 abaixo ilustra o equipamento em pauta.



Figura 2.24– Foto do regulador de tensão ITB RAV-2.

2.4.4 DYNAMIC VOLTAGE RESTORER - DVR [14]

O restaurador dinâmico de tensão, mais comumente conhecido pela sua nomenclatura americana: DVR – Dynamic Voltage Restorer - possui tecnologia avançada de controle e chaveamento, um excelente tempo de resposta, e além de suprir variações de tensão de curta duração, consegue também compensar algumas ordens harmônicas. O primeiro compensador foi desenvolvido pela Westinghouse e o EPRI (Electrical Power Research Institute) e foi colocado em operação em agosto de 1996 nas instalações da empresa têxtil Duke Power Company, localizada na Califórnia do Norte – Estados Unidos da América.

Em sua topologia clássica, ilustrada na figura 2.25, apresenta os seguintes componentes: um transformador acoplador, com um de seus enrolamentos em série com a carga a ser suprida, cuja finalidade é a injeção de tensão série, aditiva ou subtrativa; um filtro

para diminuição de ruídos em altas frequências provocadas pelo conversor; um conversor do tipo VSI – Voltage Source Inverter, ou em português, inversor de tensão; e um capacitor para fornecimento da energia necessária para suprir os surtos e um sistema de controle em PLL – Phase Locked Loop, como ilustrado na figura 2.26.

A fim de apresentar uma maior confiabilidade, alguns fabricantes adicionam uma chave *bybass* para “curto circuitar” o dispositivo caso ocorra falhas de funcionamento. Além da topologia clássica, existem mais duas outras concepções, uma com suprimento auxiliar à montante do transformador série, e outra, com suprimento auxiliar à jusante do transformador. A referência [17] ilustra que o arranjo mais eficaz para suprir VMTs (Variações Momentâneas de Tensão) é aquele indicado na figura 2.26 e a figura 2.27 apresenta uma foto de um equipamento já construído.

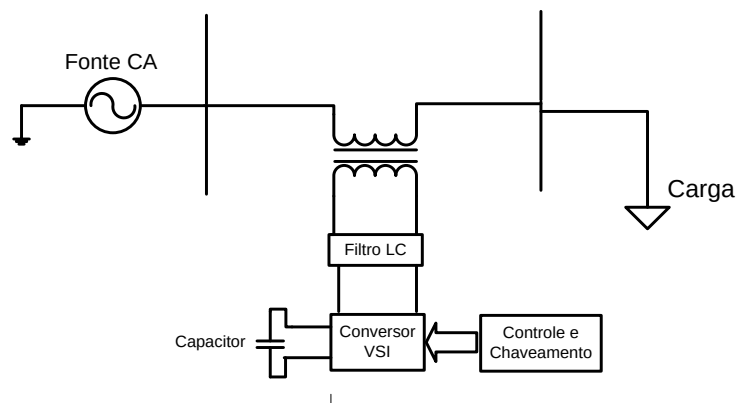


Figura 2.25 – Arranjo físico dos elementos clássicos que compõem o restaurador dinâmico de tensão – DVR

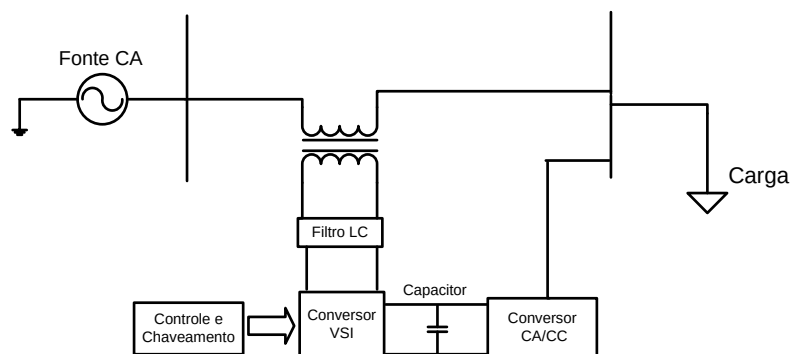


Figura 2.26 – Arranjo físico da topologia com realimentação a jusante do transformador série.



Figura 2.27 – Ilustração de um DVR

2.4.5 SIEMENS SIPCON-S [9]

O fabricante SIEMENS, por sua vez, executou o projeto denominado SIPCON S (Siemens Power CONditioner), o qual possui topologia similar a do equipamento DVR. Todavia, sua plataforma de controle e chaveamento se difere por usar a chave semicondutora do tipo IGBT, que pode executar chaveamentos em altas frequências. A principal diferença está na localização do seu sistema de controle e sua ponte retificadora, os quais se encontram à montante do barramento CC para realimentação do capacitor. A figura 2.28 mostra a topologia utilizada para o equipamento.

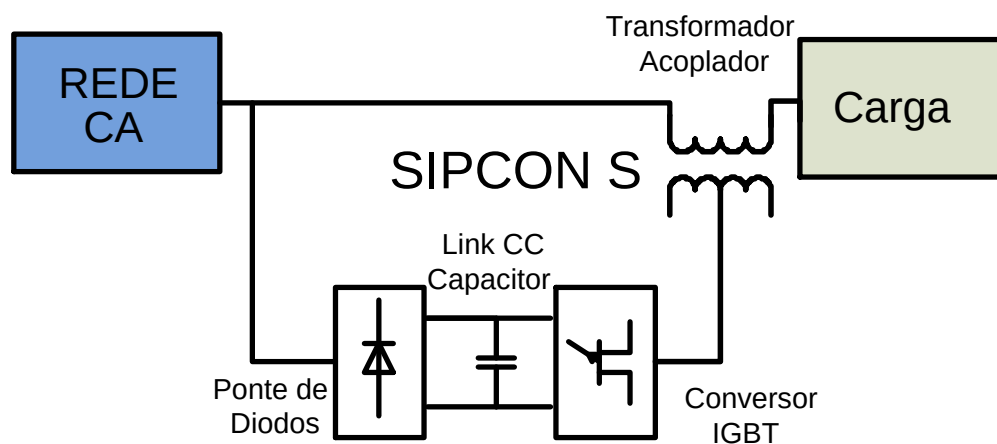


Figura 2.28 - Arranjo físico do Condicionador de Potência conectado em série – SIPCON S

2.4.6 SOFTSWITCHING DYSC [17] E [18]

A Softswitching Technologies, em 1999, apresentou um equipamento capaz de compensar tensões. Este produto foi denominado PRODySC (Dynamic Sag Corrector). Num primeiro estágio, o equipamento foi desenvolvido para suprir toda a carga de uma indústria, com potência de 2 MVA. Após os primeiros anos, e com a certeza que de todos os equipamentos elétricos de uma indústria, apenas 20 ou 30 % das cargas eram consideradas sensíveis, a Softswitching decidiu investir em equipamentos de baixa tensão, para uso dentro das próprias indústrias, e não mais em suas subestações. Desta decisão, criou-se a primeira vertente de produtos denominada por MINIDySC, desenvolvido para cargas monofásicas, com potências nominais de 250 VA até 14kVA, com tensão nominais de até 250V. Outra variante foi o equipamento PRODySC, destinado para cargas trifásicas, com potências nominais de 10kVA a 165 kVA e tensão nominal de 200 a 480V. E por ultimo, o equipamento denominado MEGADySC, trifásico, com potência nominal de 333kVA a 2MVA, com tensão nominal de 200 a 480 V. A topologia básica do MINIDySC é ilustrada na figura 2.29 e a figura 2.30 ilustra uma foto do equipamento. Como pode ser observado, o compensador não possui um transformador série, entretanto, o mesmo se apresenta com chaves eletrônicas em série com a carga. A existência de um indutor em paralelo com a carga previne a elevação ou afundamento instantâneo de corrente. Segundo [21], o equipamento foi desenvolvido para cargas com fator de potência acima de 0,92, o que impõe restrições a seu uso. É cabível lembrar que esta topologia só se encontra nos restauradores MINIDySC e PRODySC, sendo o último composto por 3 unidades monofásicas. O equipamento MEGADySC apresenta topologia similar ao DVR e possui o transformador série e o armazenador de energia.

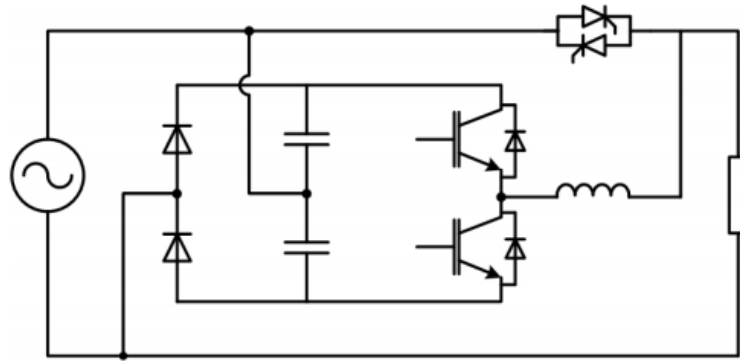


Figura 2.29 – Arranjo físico básico do MINIDySC.



Figura 2.30 – Foto do MINIDySC.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo focou, sobremaneira, as filosofias de básicas para a regulação das tensões de suprimento. Estas, em sintonia com os processos de compensação empregados, foram agrupadas em duas grandes categorias de produtos, aqui denominados por compensadores via indireta e direta. Na primeira vertente foram enquadrados os equipamentos que empregam a estratégia da correlação entre as potências ativas, fornecidas ou recebidas, de forma estática ou dinâmica, e seus correspondentes impactos sobre os níveis de tensão. De forma complementar, foi destacada uma segunda via de compensação, a direta, que se vale de mecanismos capazes de alterar o valor da tensão de suprimento, atuando diretamente sobre os módulos das tensões utilizando transformadores com mudança de tapes,

manuals ou automáticos, assim como uma linha mais recente de reguladores associados com as modernas tecnologias disponibilizadas pelos avanços da eletrônica de potência.

Na continuidade do capítulo foram ressaltados equipamentos comerciais e em franca utilização no mercado nacional e internacional, assim como tendências promissoras para os fins aqui almejados. Diante da grande diversidade de produtos, cada qual com sua concepção física e operacional, há de se reconhecer atributos que podem se materializar na forma de vantagens e desvantagens técnicas, econômicas e operacionais. Para facilitar uma análise comparativa entre os mesmos, complementando informações extraídas de [28] foi produzida a tabela 2.1 a seguir, a qual ilustra, de forma sucinta, os principais aspectos atrelados com uma ou outra tecnologia e produto.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de equipamentos de compensação para sistemas de distribuição

Equipamento de Compensação	Vantagens	Desvantagens
Reator chaveado mecanicamente	• Princípio e construção simples;	• Valores fixos;
Banco de capacitores chaveado mecanicamente	• Princípio e construção simples;	• Valores Fixos; • Transitórios de chaveamento;
Compensador Síncrono	• Possui capacidade de sobrecarga; • Totalmente controlável;	• Tempo de resposta lento (500ms); • Contribuição de curto circuito na faixa capacitiva; • Perdas elevadas; • Manutenção Elevada;
Reator à núcleo saturado	• Princípio e construção simples; • Baixo índice de manutenção; • Controle natural da absorção de reativos; • Rápido tempo de resposta;	• Não é produzido em escala industrial; • Produção de componentes harmônicas;
Reator controlado a Tiristores - RCT	• Tempo rápido de resposta (5ms); • Totalmente controlável; • Controle contínuo de potência reativa;	• Harmônicos durante transitórios e regime permanente;

	• Nenhum efeito sobre o nível de faltas; • Perdas médias; • Manutenção Baixa;	
Banco de capacitores chaveado a Tiristores – CCT	• Tempo rápido de resposta (10ms); • Perdas baixas; • Manutenção baixa;	• Harmônicos durante transitórios; • Controle da potência reativa somente por estágios; • Barramentos e controle complexos; • Capacidade de absorção não inerente a limitação de sobre tensões;
Reguladores automáticos de tensão	• Princípio e construção simples; • Baixo custo;	• Alto tempo de resposta; • Alto índice de manutenção; • Valores preestabelecidos para regulação da tensão;
Static Synchronous Compensator - STATCOM	• Rápido tempo de resposta (8ms); • Pode fornecer ou absorver potência reativa; • Total controle do montante de potência a ser absorvida/injetada; • Não produz componentes harmônicas;	• Alto custo de implementação e manutenção; • Necessidade de mão de obra qualificada; • Utiliza a mais fina linha da eletrônica de potência; • Complexo sistema de controle;
Dymanic Voltage Regulator - DVR	• Rápido tempo de resposta (8ms); • Pode injetar tensões, tanto aditivas quanto subtrativas, em módulo e ângulo de fase; • Pode ser utilizado como um filtro ativo; • Não produz componentes harmônicas;	• Alto custo de implementação e manutenção; • Necessidade de mão de obra qualificada; • Utiliza a mais fina linha da eletrônica de potência; • Complexo sistema de controle; •

CAPÍTULO III

NOVA PROPOSIÇÃO DE COMPENSADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO - ESTRUTURA FÍSICA, CONTROLE E MODELAGEM

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS

Fundamentalmente, o presente capítulo visa apresentar um novo produto concebido pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, concepção esta idealizada pelo trabalho de doutorado em andamento e devidamente identificado ao longo do texto que compõe esta dissertação.

Dentre os pontos explorados, esta unidade contempla aspectos gerais relacionados com a estrutura física do regulador proposto, uma primeira idealização para a estratégia de controle focada na pesquisa de doutorado, uma nova estrutura para o controle e demais informações relevantes ao conhecimento do tema central em pauta.

A caracterização da estrutura física dos componentes que perfazem o regulador aqui considerado evidencia, com clareza, tratar-se de uma filosofia de equipamento totalmente eletromagnético, com propriedades e princípios operacionais similares aos modernos dispositivos que se apoiam na injeção série de incrementos de tensão para a restauração desta grandeza nos moldes requeridos pela legislação aplicável.

Dentre os motivadores que nortearam o direcionamento das atividades desta dissertação ressalta-se que, a nova proposta de regulador de tensão, dentro do conceito originalmente estabelecido, utiliza tapes discretos para o processo da regulação da tensão. Muito embora o reconhecimento da adequação deste princípio aos propósitos do equipamento, a busca por aprimoramentos do processo como um todo, constitui-se em pontos desafiadores para uma melhor atuação do produto final.

Neste sentido, a substituição da sistemática de controle por um mecanismo que proporcione compensações de tensão, positivas ou negativas, de forma contínua, se apresenta como um forte atributo para o dispositivo. É, pois dentro deste contexto que se insere esta unidade da pesquisa, a qual, além dos aspectos anteriormente referidos e relacionados com a concepção operacional e estratégia de controle, ainda contempla a modelagem do regulador no que tange a sua estrutura de potência e de controle no simulador ATP.

3.2 O COMPENSADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO – CET

O dispositivo regulador de tensão, objeto central desta dissertação e em desenvolvimento através da pesquisa de doutorado do aluno Fabricio Parra Santilio, aqui denominado por Compensador Eletromagnético de Tensão (CET) [22], [23], [24], [25], [26], [27] e [28], encontra-se constituído por unidades de potência totalmente eletromagnéticas, conforme detalhado na sequência.

O produto contemplado nesta proposta se apresenta com uma topologia inovadora, como ilustrado na figura 3.1. Esta estrutura, muito embora a similaridade com arranjos tradicionais que empregam a tecnologia da eletrônica de potência e uma inserção de tensão advinda de equipamentos como o DVR e o SIPCON-S, possui, como mostrado no diagrama unifilar da figura supra mencionada, alguns aspectos conceptivos bastante distintos dos

equipamentos comercialmente em uso. Dentre eles ressaltam-se os seguintes pontos principais:

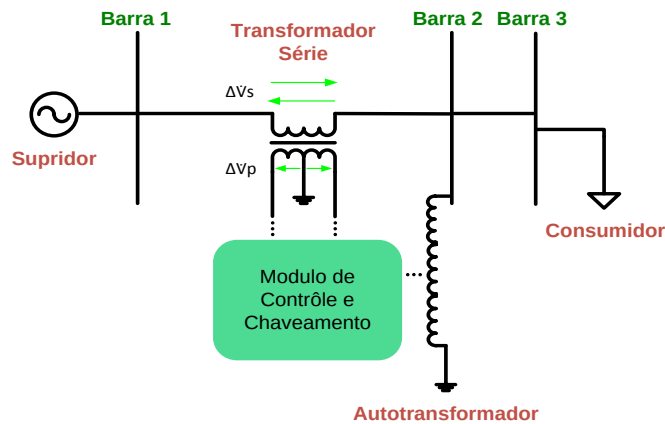


Figura 3.1- Estrutura do compensador eletromagnético de tensão

- A extração da tensão a ser injetada é oriunda da própria rede de suprimento;
- A sistemática de compensação se apoia na injeção de uma parcela, aditiva ou subtrativa, de tensão fornecida por um autotransformador e controlada em função do nível de compensação almejado;
- Diante disto fica evidenciado que a concepção operacional se baseia no estabelecimento de uma “ponte” responsável pela derivação da tensão e respectiva injeção em série, fato este, como pode ser constatado pelo respectivo diagrama unifilar, o qual evidencia que a potência necessária à restauração dos padrões de tensão corresponde tão apenas a uma parcela do valor total da potência requerida pela carga. Portanto, não se trata de um regulador que se apresenta com a filosofia da potência “passante” igual ao valor total daquela requerida pelo consumidor, como ocorre para vários outros conceitos de reguladores;
- No que se refere ao processo da seleção do nível das tensões de compensação, este pode ser embasado em estratégias discretas, como investigado na já

mencionada pesquisa de doutorado, ou ainda via meios eletrônicos, os quais podem oferecer recursos tais a proporcionar um controle contínuo das tensões de compensação, assunto este focado nesta dissertação. Além do mais, vale ressaltar que os valores de tensão considerados para fins deste trabalho encontram-se na região associada com níveis mais baixos do que as nominais;

- Também, em se tratando da utilização de dispositivos eletrônicos para a promoção dos chaveamentos, há ainda que se reconhecer que o produto ora apresentado pode se mostrar altamente atrativo quanto aos seus possíveis tempos de resposta, quando comparados aos tradicionais reguladores acionados mecanicamente.

A figura 3.2 mostra, didaticamente, a ação esperada para o compensador em pauta. Vale lembrar que, generalizando, a injeção do complemento de tensão destinada ao efeito final do processo da regulação da tensão se apresenta com características tais que a mesma pode ser variada em amplitude. Esta propriedade irá conferir a possibilidade da compensação de elevações de tensão ou de reduções desta grandeza, conforme a polaridade do reforço de tensão imposta em série com o alimentador em foco.

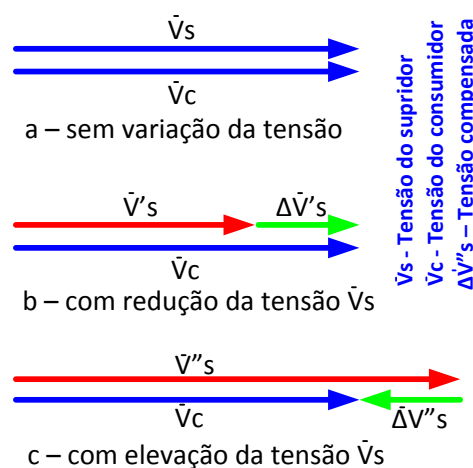


Figura 3.2 - Diagrama fasorial do desempenho do compensador no que tange a variações de tensão e respectivas compensações.

3.3 A CONCEPÇÃO INICIAL PARA O CONTROLE DO CET [23] e [27]

Dentro da lógica de controle, uma primeira filosofia de atuação do equipamento CET foi proposta e desenvolvida. Esta, baseada no chaveamento dos tapes disponibilizados pela unidade de extração de potência da rede, ou seja, do autotransformador shunt, é realizada a compensação de tensão requerida a fim de corrigir os desvios ocorridos na rede. A definição dos valores de compensação é especificada tendo em vista o maior índice de variações momentâneas de tensão que comumente ocorrem nas redes de suprimento, registradas pelas concessionárias elétricas e a agência reguladora.

Com o intuito de melhor descrever os componentes integrantes do primeiro sistema de controle, a figura 3.3 ilustra o diagrama unifilar baseado nos chaveamentos de tapes discretos. Já a figura 3.4 ilustra o diagrama esquemático do protótipo do Compensador Eletromagnético de Tensão, para realização de ensaios laboratoriais.

A tensão a ser injetada em série, advinda do autotransformador e injetada no denominado transformador série, parte da escolha entre os diversos tapes de controle, conforme definido pela utilização das chaves *Ch1.....Ch5*, determinando assim a amplitude da tensão de compensação a ser aplicada. Já a escolha entre as chaves *Chpn* e *Chpp* depende da polaridade da tensão requerida ao processo e que será injetada. De fato, quando da ocorrência de afundamento momentâneo de tensão, fica evidenciada a ação da chave *Chpp* visando um reforço de tensão positivo, e quando da manifestação de uma eventual elevação de tensão, a atuação ficará a cargo da chave *Chpn* visando a inserção de uma tensão contrária à da fonte. A chave by-pass *Chbp* mantém-se fechada quando o nível da tensão no consumidor permanece dentro dos limites preestabelecidos.

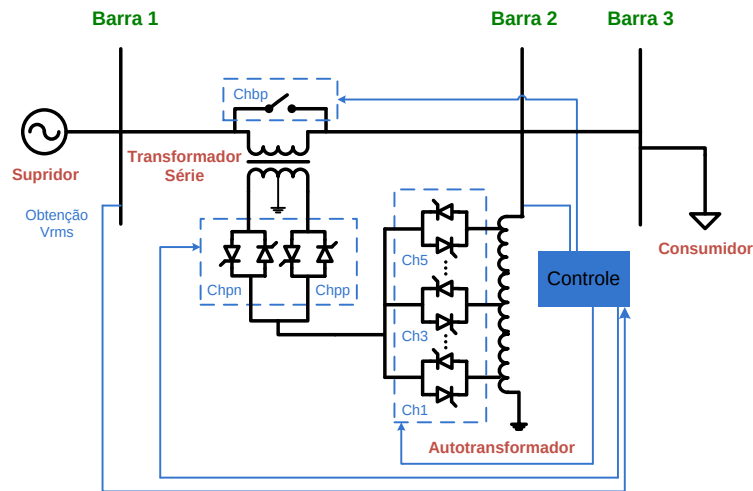


Figura 3.3 - Estrutura física do compensador eletromagnético de tensão com mudança de tapes discretos.

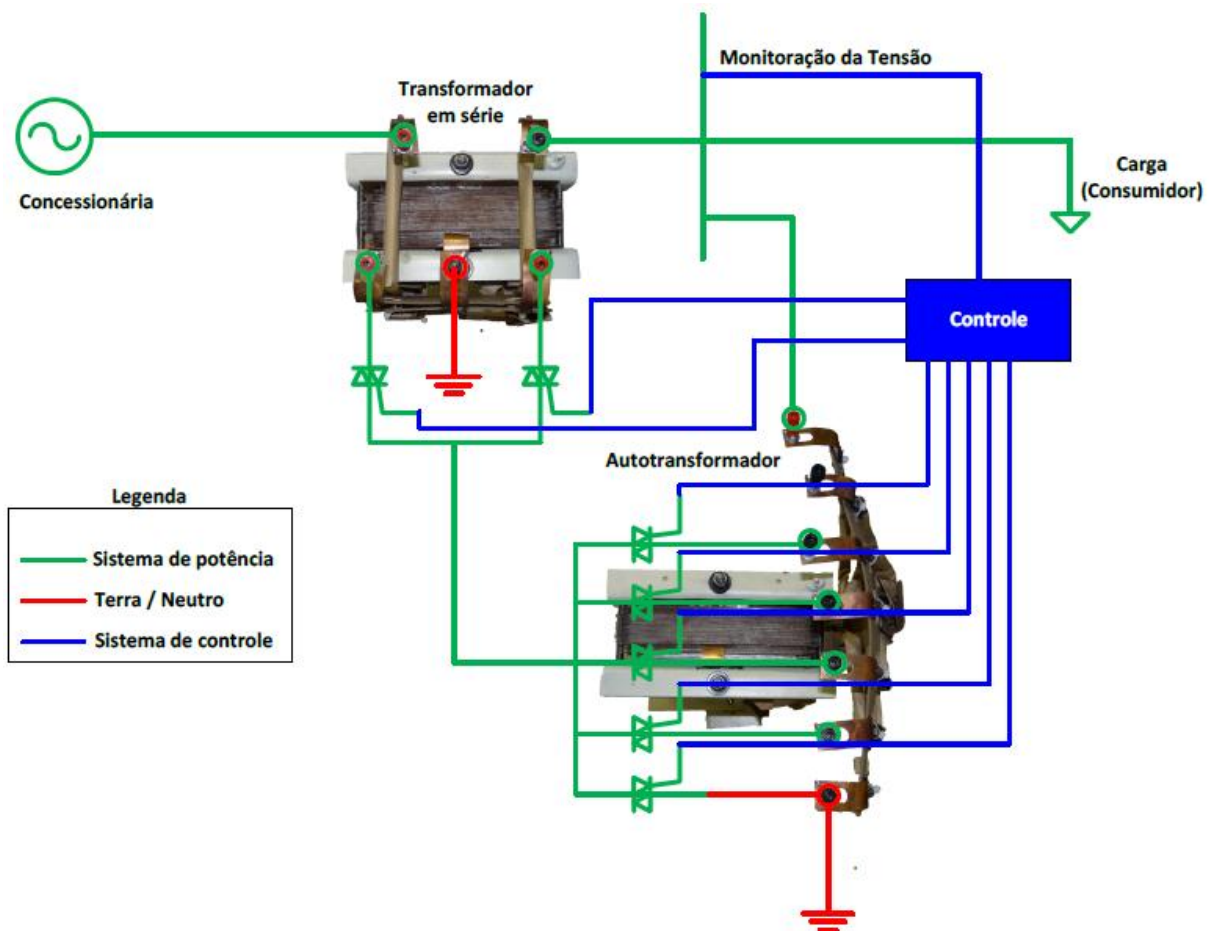


Figura 3.4 – Diagrama de ligação do CET para realização de estudos laboratoriais.

À luz destes fatos, a figura 3.5 apresenta o diagrama de blocos do esquema concebido para a obtenção de tensões variáveis através de um chaveamento controlado por tapes

discretos e as principais partes que formam seu complexo do controle. Como esclarecido, a lógica aqui apresentada corresponde a utilizada em [23].

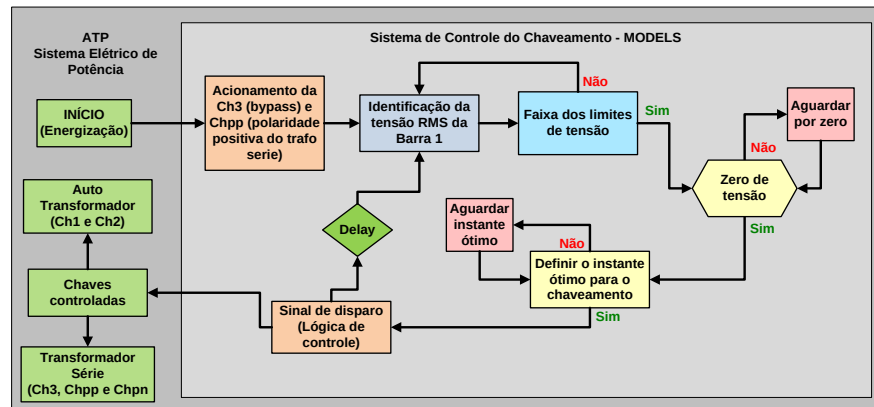


Figura 3.5 - Diagrama de blocos para o chaveamento controlado – filosofia de tapes discretos.

O funcionamento básico do controle de chaveamento discreto ocorre dentro da seguinte lógica:

- A operação do arranjo é iniciada com o fechamento das chaves *Chbp* (chave *bypass*) e *Chpp* (chave de polaridade positiva do transformador série), indicadas nas figuras 3.3, 3.4 e 3.5;
- Na sequência procede-se a determinação da tensão para a qual se almeja atingir os propósitos da regulação. Para o sistema em análise, o barramento escolhido corresponde a Barra 1, na figura 3.3 e 3.4;
- A tensão medida é então confrontada com os valores de referências estabelecidos para o chaveamento controlado de cada tape. Cabe observar que os valores de tensões de referência foram selecionados e adicionados na linguagem de controle para atender a uma determinada faixa de tensão, de modo que, a tensão entregue à carga permaneça dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL;
- Se a tensão na Barra 1 encontrar-se dentro da faixa adequada, o controle permanece com as chaves *Chbp* e *Chpp* fechadas. Todavia, caso a referida

grandeza ultrapasse os limites considerados como adequados, o sistema busca um tape para o devido enquadramento. Isto conduz aos procedimentos abaixo descritos;

- Num primeiro momento é realizada a detecção da passagem por zero da tensão, quando então o controle passa, automaticamente, para o próximo passo. Caso isto não ocorra o passo atual é executado novamente;
- A seguir determina-se o ponto ótimo do chaveamento, visando, sobretudo, a minimização dos fenômenos transitórios. Uma vez encontrado o ponto para o qual ocorrerá o chaveamento sem maiores impactos sobre os transitórios, o controle passa para o próximo passo. Caso contrário, esta etapa do processamento será repetida até se obter as características de chaveamento desejadas;
- Após encontrar o ponto ótimo, o controle emite um sinal de disparo para as chaves. Este sinal comanda o fechamento e/ou abertura dos contatos. Com o intuito de se evitar chaveamentos indevidos, uma nova operação somente será autorizada após um intervalo de tempo pré-definido no *Delay*.

3.4 A NOVA PROPOSTA DE CONTROLE DO CET [27] e [28]

Uma vez esclarecido que a estrutura operacional supra descrita proporciona variações discretas do processo de compensação oferecido pelo CET, esta seção tem por meta apresentar uma nova concepção para a definição dos níveis de tensões a serem injetadas de forma tal a oferecer um controle contínuo para a tensão nos terminais da carga.

A figura 3.6 ilustra o diagrama unifilar decorrente da filosofia de chaveamento contínuo idealizada a partir da necessidade de um controle mais fino da tensão eficaz de injeção no

barramento e a figura 3.7 ilustra o circuito elétrico utilizado no software ATPDraw para realização das simulações dos estudos de casos.

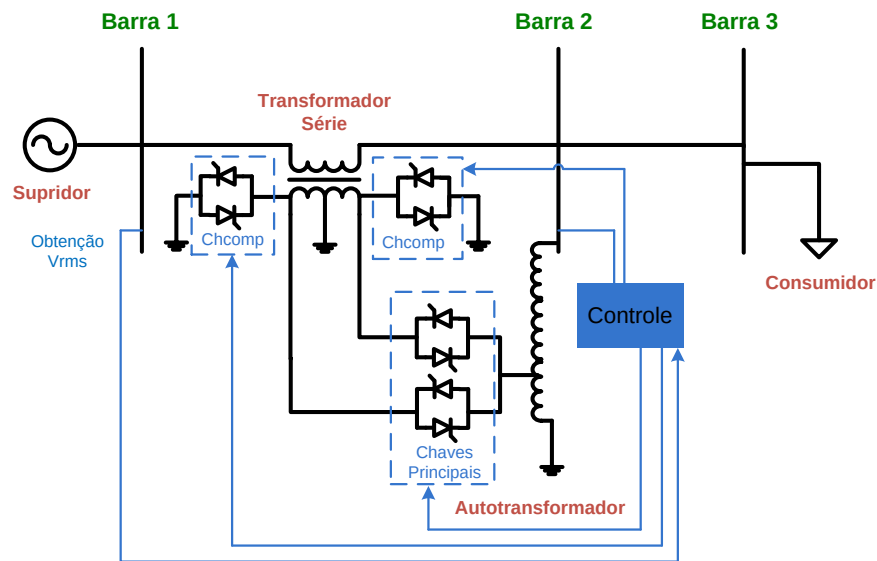


Figura 3.6 - Estrutura do compensador eletromagnético de tensão de chaveamento contínuo.

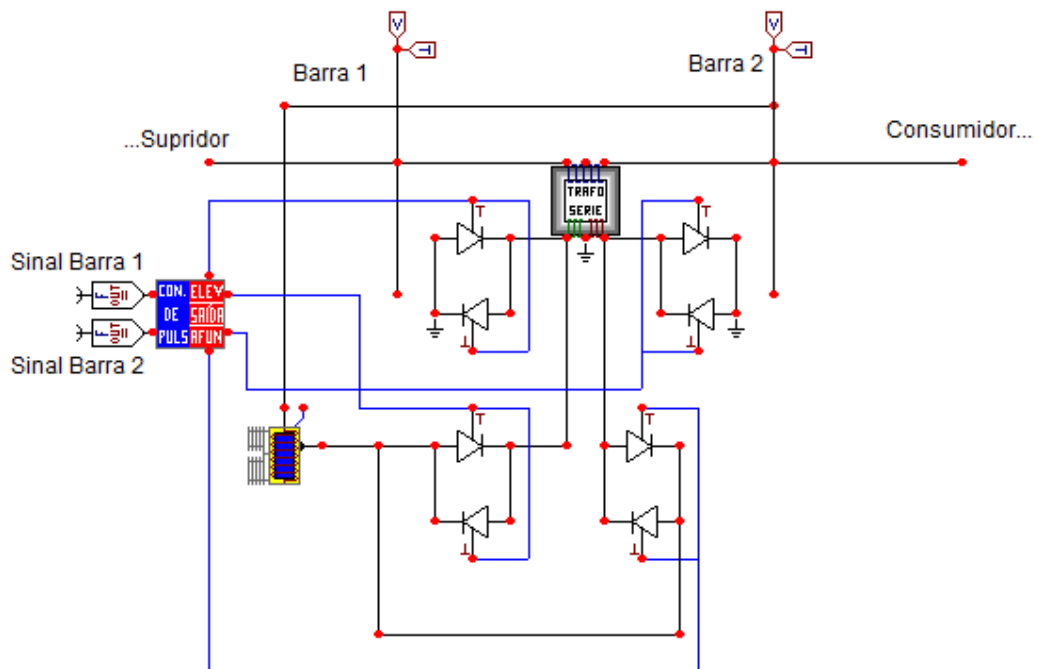


Figura 3.7 – Ilustração da plataforma utilizada no ATPDraw para simulação dos casos estudados.

A nova filosofia aqui proposta encontra-se alicerçada no emprego de um par de chaves semicondutoras conectadas no maior valor de tensão requerido para a regulação. Estes recursos, a princípio definidos pelos dispositivos comerciais GTO, se justificam por dois

motivos fundamentais: um primeiro atrelado com a necessidade de uma simetria operacional entre os dois ciclos das tensões e correntes e, um segundo, pela propriedade oferecida por tais dispositivos quando a possibilidade de abertura e fechamento em momentos totalmente determinados pelos disparos advindos do sistema de controle. Através da programação dos valores dos ângulos de disparo das Chaves Principais, obtêm-se os níveis de tensão desejados ao processo da regulação da tensão, como será oportunamente esclarecido através de explicações e estudos a serem realizados na sequência dos trabalhos.

Adicionalmente, pode-se também evidenciar a utilização de outras duas chaves identificadas por Ch_{comp} :

- Um dos motivos da existência está no fato que, para o caso das chaves principais se encontrarem em circuito aberto, haverá necessidade de se viabilizar um circuito para a circulação da corrente no enrolamento (primário) do transformador série objetivando oferecer uma condição operativa similar aquela que corre num transformador de corrente. Esta situação se faz necessária para se evitar o surgimento de sobre tensões que poderiam se mostrar altamente comprometedoras para o nível de isolamento do primário do transformador série. Em outras palavras, o recurso aqui concebido visa proporcionar, através de um caminho de circulação de corrente, a criação de um contra fluxo para a respectiva corrente de carga;
- Outra razão para o emprego destas chaves se apoia na necessidade de complementar a estrutura das chaves principais, mesmo durante a atuação destas, visando oferecer, nos interstícios de bloqueio, caminhos para a circulação das correntes induzidas nos mesmos termos acima referidos.

Em sintonia com os princípios acima expostos segue que, para se obter o valor de tensão eficaz desejado, as chaves principais executam uma segmentação da forma de onda de

tensão do maior tape. Esta seccionamento é feito com base nos cálculos dos ângulos α e β , os quais definem o período de condução da onda de tensão, como mostrado na figura 3.8.

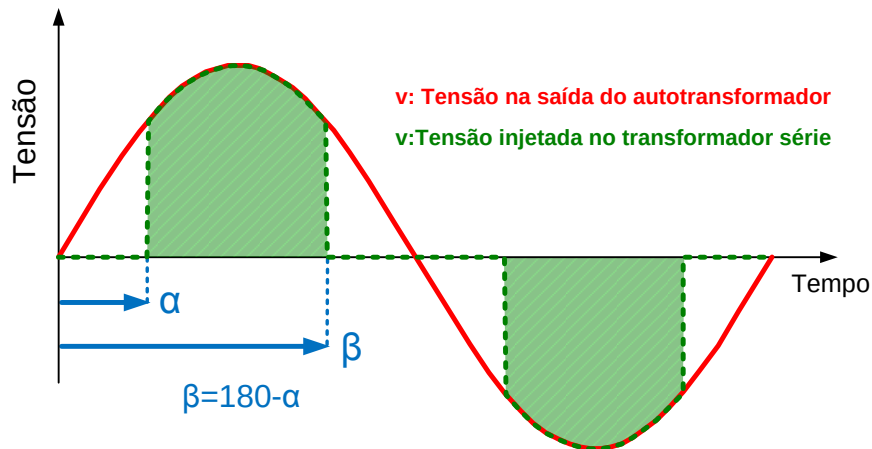
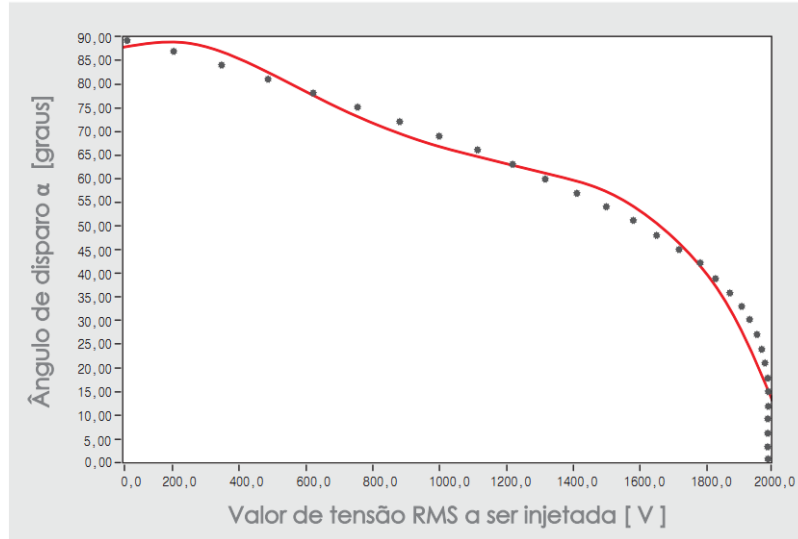


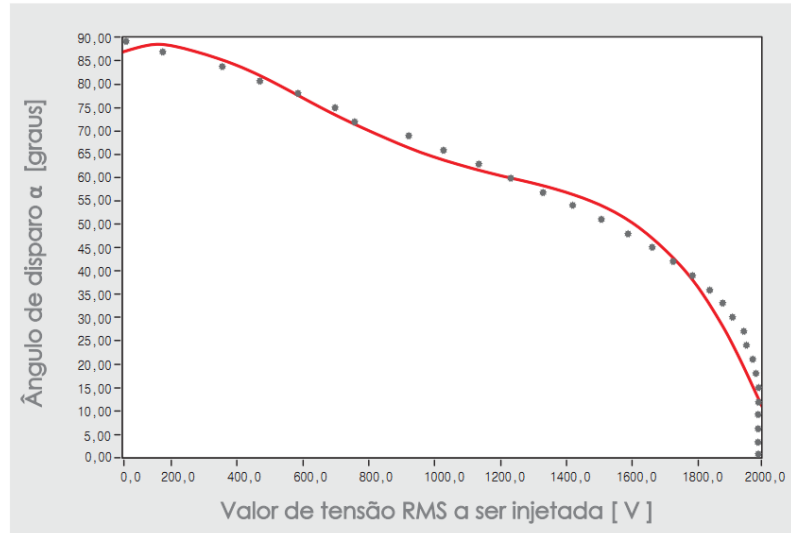
Figura 3.8 - Forma de onda da tensão complementar para a restauração dos níveis desejados para o suprimento da carga – efeito dos ângulos de disparo das chaves principais.

Quanto ao ângulo α , esta grandeza é determinada em função do nível de compensação de tensão definido pelo controle, enquanto que o corresponde tão apenas ao suplemento deste valor.

Para a definição do ângulo de disparo a ser adotado para compatibilizar o reforço de tensão nos termos exigidos pelo processo de regulação de tensão, para o presente momento, a metodologia empregada fundamentou-se na realização de estudos que culminaram pela obtenção de curvas que correlacionam o módulo da tensão a ser injetada em função do respectivo ângulo de controle. Nestes termos a figura 3.9 (a), que originou a equação (3.1), permite determinar o ângulo de controle para as situações de afundamentos momentâneos de tensão. Por outro lado, a figura 3.9 (b) e sua correspondente expressão (3.2), permite a determinação dos ângulos de disparo em função das elevações momêntaneas de tensão manifestadas.



(a)



(b)

Figura 3.9 - Relação $\alpha=f(V)$ para: (a) Afundamentos de tensão e (b) Elevações de tensão.

$$\alpha = -34,6e^{-12} \times V^4 + 110,4e^{-9} \times V^3 - 122,8e^{-6} \times V^2 + 27e^{-3} \times V + 87,3 \quad (3.1)$$

$$\alpha = -35,5e^{-12} \times V^4 + 124,6e^{-9} \times V^3 + 140,3e^{-6} \times V^2 + 28e^{-3} \times V + 87,4 \quad (3.2)$$

Com base nestas informações criou-se então a rotina ilustrada através do diagrama de blocos da figura 3.10. Esta permite a determinação dos ângulos de controle e encontra-se inserida no simulador computacional ATP, utilizando por base o programa computacional desenvolvido pela pesquisa de doutorado em andamento e já devidamente referenciada.

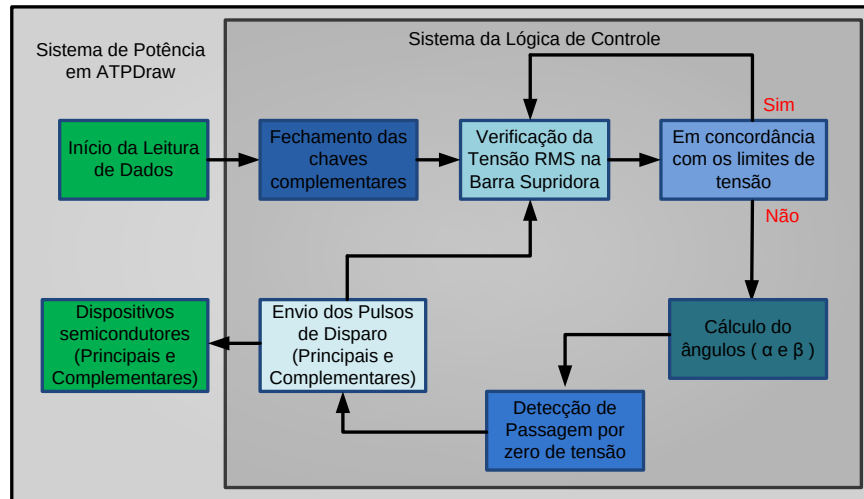


Figura 3.10 - Diagrama de blocos para a determinação dos ângulos de controle do CET.

O funcionamento básico do controle de chaveamento contínuo ocorre dentro da seguinte lógica:

- A operação do arranjo é iniciada com o fechamento das chaves complementares, indicadas na figura 3.6 e 3.7;
- Na sequência procede-se a determinação da tensão para o ponto do complexo elétrico para o qual se almeja atingir os propósitos da regulação. Para o sistema em análise, o barramento escolhido corresponde a Barra 1;
- A tensão de suprimento é então medida e então confrontada com os limites de referência estabelecidos pela ANEEL. Se a tensão na Barra 1 encontrar-se dentro da faixa adequada, o controle permanece com as chaves complementares fechadas. Todavia, caso a referida grandeza ultrapasse os limites considerados como adequados, o sistema busca o exato valor eficaz

necessário para compensação de tensão, restaurando assim o nível de tensão ao seu valor nominal. Isto é conduzido pelos procedimentos abaixo descritos;

- A partir da diferença de tensão eficaz encontrada entre a Barra 1 e a tensão de operação, o controle faz uma análise do circuito elétrico para caracterização do fenômeno, seja de um afundamento ou elevação momentânea de tensão, a fim de determinar o par de chaves principais a ser utilizado bem como a equação na qual a diferença do valor de tensão será utilizado para o cálculo de α e β ;
- Na próxima etapa é então realizada a detecção da passagem por zero da tensão;
- De modo complementar, a seguir ocorre o envio dos pulsos do controle, através da MODELS (Apêndice 1), para as chaves principais e complementares. Para isso, a plataforma emite um sinal positivo e outro sinal zero que comanda a operação de condução e bloqueio das chaves semicondutoras;
- A partir da restauração do nível de tensão desejado o controle continua nesta operação até evidenciar ou a restauração da tensão de suprimento ao seu valor nominal de operação ou da constatação de um novo eventual desvio de tensão.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo focou tópicos importantes e relacionados com a composição estrutural das unidades de potência do compensador eletromagnético de tensão, nos termos idealizados e destacados pelo projeto de doutorado em andamento, e ainda, contemplou de forma pontual, como objetivo central desta dissertação, a questão do controle para o dispositivo.

No que tange ao equipamento denominado CET, foi possível verificar que este se apresenta, quanto as suas partes de potência, na forma de uma estrutura construtiva totalmente

eletromagnética, portanto, capaz de oferecer propriedades atrativas como: robustez, custos atrativos e confiabilidade operacional. Somado a tais atributos pode-se ainda reconhecer outras vantagens, a exemplo de: menores potências passantes; mecanismos de chaveamento em tensões mais baixas do que as nominais; possibilidade de pequeno tempo de resposta em consonância com a técnica de controle, etc. Diante disto, vislumbra-se que o produto, na sua forma final, possa contribuir para o enquadramento das tensões nos termos requeridos pelos agentes reguladores, mas também, oferecer um desempenho compatível com outras tecnologias destinadas à compensação das denominadas variações momentâneas de tensão.

Uma vez estabelecida a base operacional do produto, os trabalhos contemplaram, de modo especial, a questão da lógica do controle propriamente dito. Dentro deste contexto, foram tecidos comentários sobre a estratégia do processo de compensação original e dados passos importantes na direção do estabelecimento de uma nova filosofia, baseada não apenas no chaveamento, mas também do controle eletrônico da tensão a ser adicionada ao alimentador, objetivando, por fim, a regulação pretendida.

As discussões feitas conduziram, num primeiro momento, ao estabelecimento de uma estratégia de controle com características contínuas com relação aos níveis de compensação da tensão, a qual se mostra promissora quanto a restauração de variações de tensão de curta duração, simétricas ou não, e ainda, devido as propriedades intrínsecas ao controle eletrônico, com possibilidade de oferecer tempos de respostas adequados aos propósitos da mitigação de VMTs.

Uma vez estabelecidas as diretrizes principais para o equipamento como um todo, este foi, por fim, inserido no simulador ATP, passando, então a oferecer uma base computacional para a realização de estudos de desempenho, como será descrito no capítulo subsequente.

CAPÍTULO IV

ESTUDOS DE CASOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez investigado e descrito o equipamento denominado CET e sua filosofia de controle de chaveamento contínuo, este capítulo ilustra os estudos de casos com vias a ratificar que o equipamento em questão possui mérito para regularização dos níveis de tensão eficaz nas barras de um sistema de distribuição genérico.

Neste sentido, os estudos realizados focaram um alimentador genérico, ao qual foram impostas distintas condições operacionais envolvendo variações de tensão equilibradas e desequilibradas. Dentro destas circunstâncias foram realizadas simulações computacionais através do programa computacional inserido na plataforma ATPDraw, fato este determinante para que o processo avaliativo permita a realização de investigações através da técnica de modelagem no domínio do tempo. Tal condição se mostra essencial para os propósitos desta dissertação visto que, somado ao desempenho esperado para os valores eficazes para as tensões, há ainda necessidade da realização de estudos avaliativos sobre as formas de onda associadas aos processos de compensação.

4.2 ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS AVALIATIVOS.

Os trabalhos de investigação, em consonância com os propósitos desta dissertação, foram realizados através da modelagem do complexo elétrico genérico e do compensador eletromagnético de tensão (CET), nos termos anteriormente definidos, dentro da lógica estabelecida pela plataforma ATP.

O complexo elétrico genérico de distribuição é ilustrado no diagrama unifilar da figura 4.1. Esta configuração foi utilizada para todas as situações operacionais selecionadas para a apresentação e discussão neste trabalho.

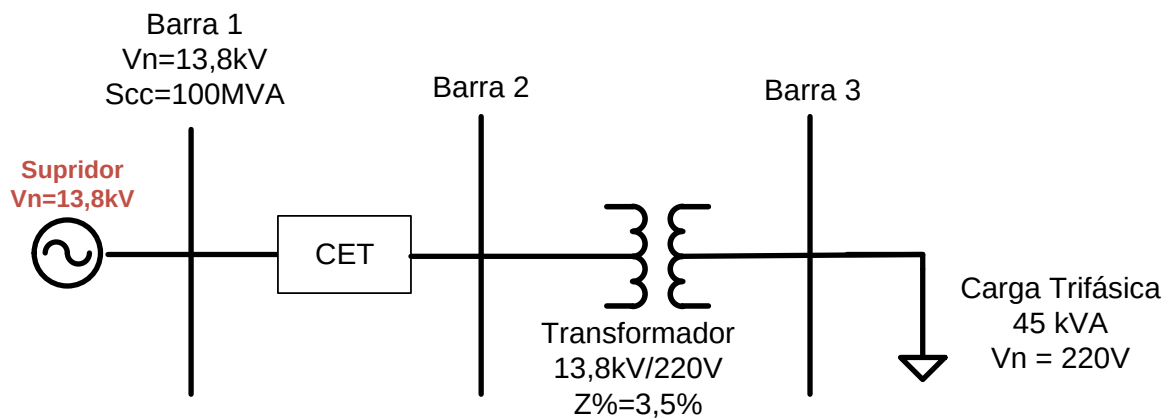


Figura 4.1 – Diagrama unifilar adotado para os estudos de casos.

Quanto às unidades de potência pertencentes ao compensador eletromagnético de tensão (CET), a tabela 4.1 descreve, de maneira clara e sucinta, os principais parâmetros e características adotadas para o compensador.

Tabela 4.1 - Parâmetros do Compensador Eletromagnético de tensão - CET

Dados	Potência (kVA)	Fator de Potência	Tensão (V)	Zcc%
Autotransformador	6	-	7967/1991	3,5
Transformador Série	6	-	2:1	3,5

No que tange ao processo avaliativo do desempenho do complexo elétrico sob diversas condições operacionais, simétricas ou não, com afundamentos ou elevações de tensão, adotou-se, para fins de apresentação, conjuntos de situações que foram agrupadas em dois grandes grupos, como a seguir.

4.3 CASO 01: CONDIÇÕES DE AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES EQUILBRADAS DE MOMENTÂNEOS DE TENSÃO

Este estudo de caso tem por propósito verificar a compatibilidade do equipamento para obter a restauração da tensão de suprimento na eventualidade da ocorrência de um VTCD, condição anômala esta que pode se apresentar na forma de afundamentos ou elevações equilibrados de tensão.

Como as variações de tensão ocorrem de maneira simétrica, tanto para os AMTs quanto para as EMTs, e ainda, que o alimentador utilizado se apresenta originalmente constituído por um arranjo totalmente equilibrado no que se refere aos parâmetros, carregamentos e condições operativas, apenas os resultados atrelados com a fase A são explicitados no trabalho. As demais, como esperado, se apresentam com o mesmo desempenho, motivo pelo qual são omitidas no texto.

O conjunto de simulações realizadas evidencia que os trabalhos conduzidos envolveram seis intervalos de tempo sequenciais, cada qual atrelado com uma dada condição operativa. O tempo total de estudo foi de 6s e os intervalos representativos dos diferentes desempenhos do sistema correspondem cada um, a um fenômeno com duração de 1s.

A fim de descrever os acontecimentos do primeiro estudo de caso, no intervalo de tempo de 0 a 3 segundos, pode-se constatar, gradativamente, decréscimos sucessivos de 10 em 10% da tensão de suprimento. Uma vez restaurada a tensão nominal em $t=3$ s, a partir deste e para os intervalos subsequentes, compreendendo a gama de tempos de 4 a 6 segundos,

constatam-se elevações de tensão com a mesma taxa percentual anteriormente explicitada. Isto pode ser constatado na figura 4.2 e melhor esclarecido na tabela 4.2, em valores reais e em pu.

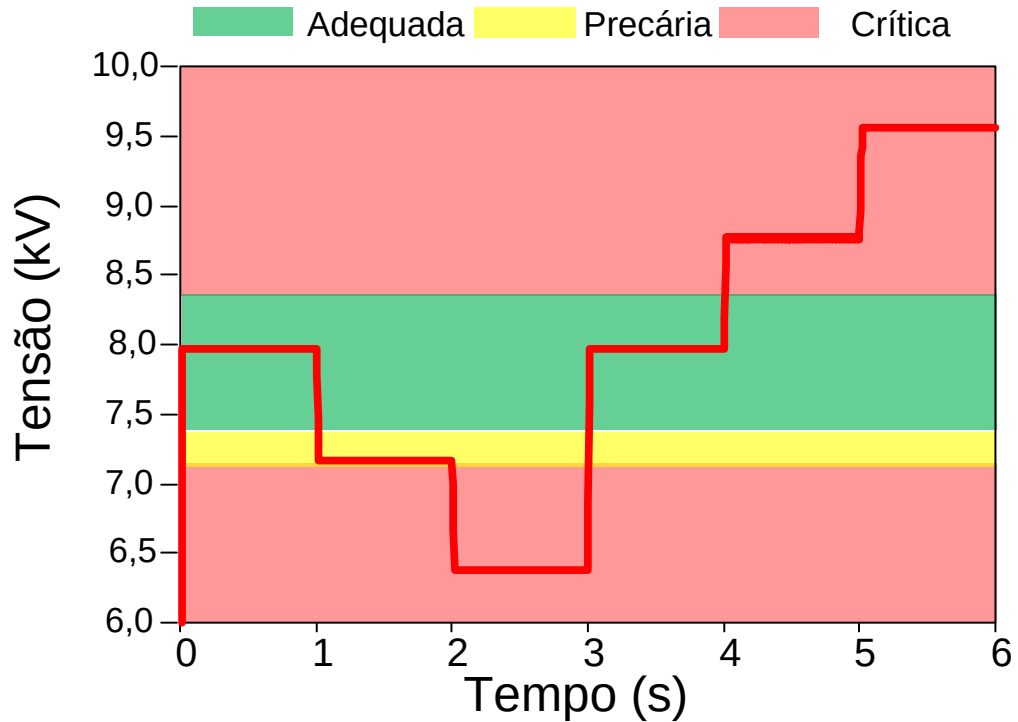


Figura 4.2 - Tensão na Barra 1 – variações adotadas ao longo do período de investigação - intervalos de variação da tensão de suprimento

Tabela 4.2 - Tensões de Operação Adotadas para o Barramento 1 – Caso 01

Intervalos	Tempo [s]	Tensão [V]	Valores em pu
Intervalo 1	0 a 1	7967	1,00
Intervalo 2	1 a 2	7170	0,90
Intervalo 3	2 a 3	6373	0,80
Intervalo 4	3 a 4	7967	1,00
Intervalo 5	4 a 5	8763	1,10
Intervalo 6	5 a 6	9560	1,20

Analisando o perfil da curva de tensão eficaz, há de se concluir sobre a necessidade de providências para que estas alterações da magnitude das tensões sejam restauradas aos padrões considerados normais. Desta forma, a partir da obtenção da tensão manifestada, o

sistema de controle, em consonância com os princípios estabelecidos no capítulo anterior, passa a calcular os ângulos α e β almejando a restauração do valor eficaz de tensão. Isto pode ser evidenciado na figura 4.3 e na tabela 4.3.

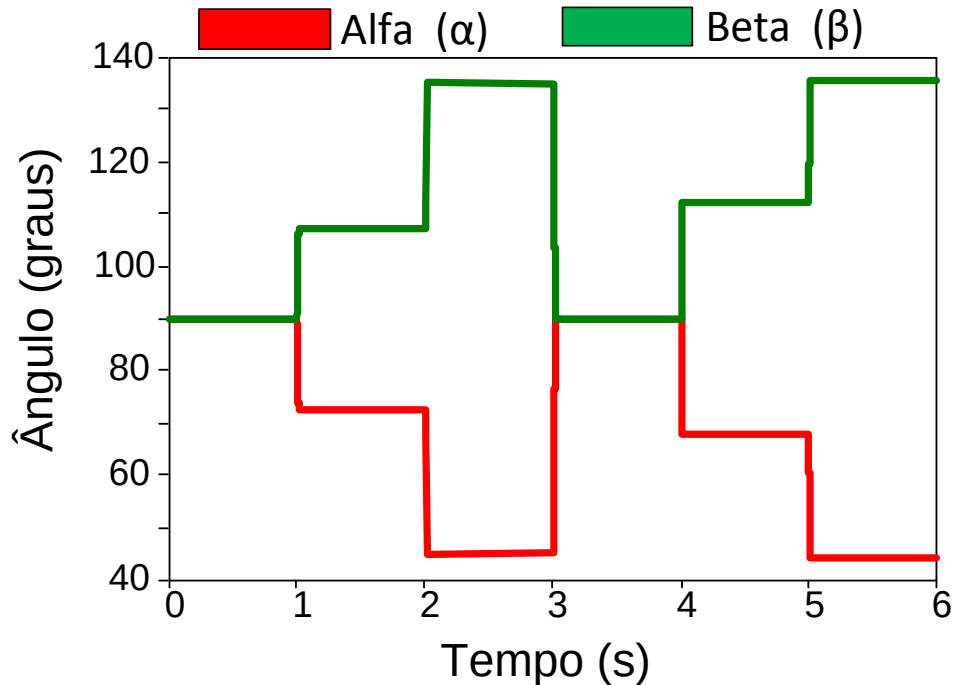


Figura 4.3 – Ângulos α e β para obtenção dos valores de tensão injetada – Caso 01.

Tabela 4.3 - Cálculo dos ângulos Alfa e beta – Caso 01

Intervalos	Tempo [s]	α [°]	β [°]
Intervalo 1	0 a 1	90	90
Intervalo 2	1 a 2	72,5	107,5
Intervalo 3	2 a 3	45,0	135,0
Intervalo 4	3 a 4	90	90
Intervalo 5	4 a 5	68,0	112,0
Intervalo 6	5 a 6	44,5	135,5

Com os valores obtidos para os ângulos, nos termos acima esclarecidos, o controle emite os pulsos para abertura e fechamento das chaves principais e complementares com o intuito de recuperar a tensão da barra 2 para seu valor nominal ou próximo a este.

A ilustração dos pulsos de afundamentos e elevações advindos da plataforma de controle pode ser visualizada na figura 4.4. Na figura 4.5 pode observar o período da ocorrência do afundamento de 0,1 pu, um zoom dos pulsos e o período de condução das chaves principais e complementares necessárias para realização do processo de regulação.

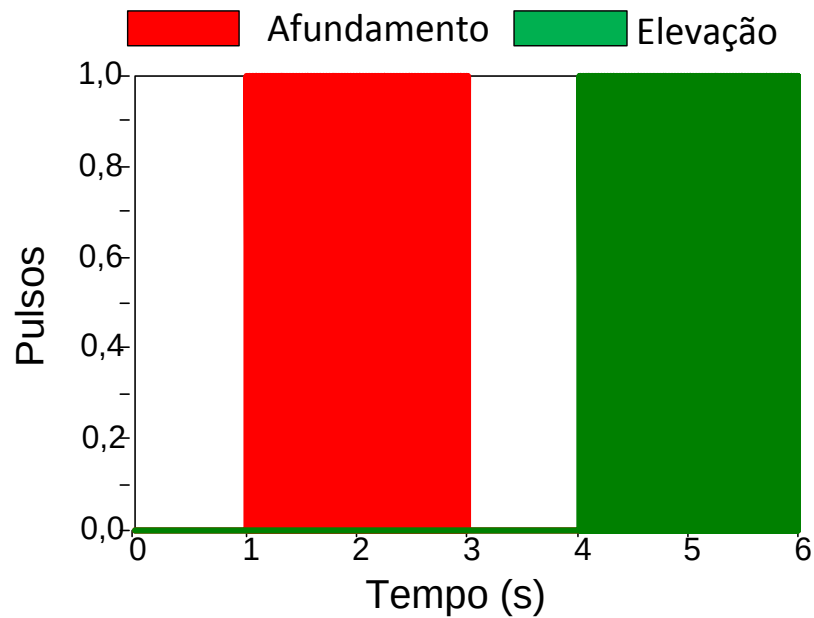


Figura 4.4 – Pulsos das chaves principais para afundamentos e elevações de tensão – Caso 01.

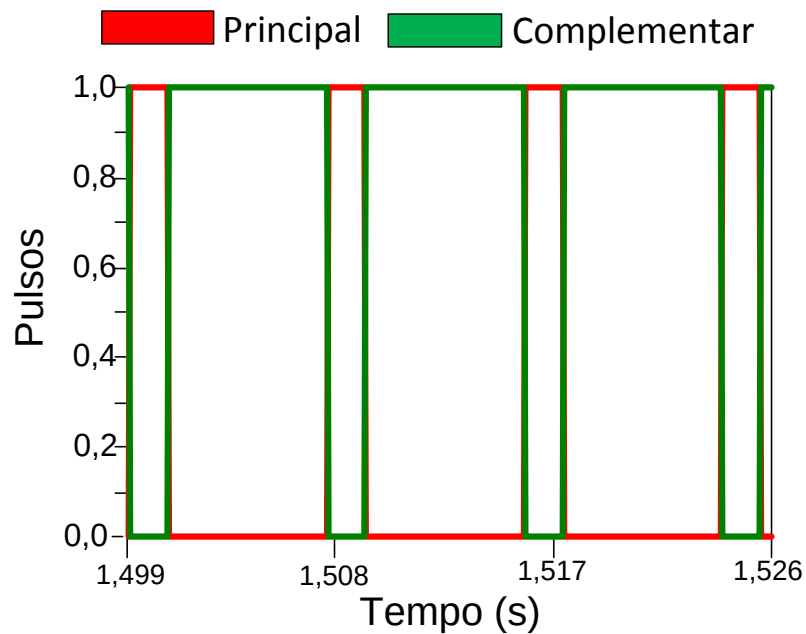


Figura 4.5 – Pulsos das chaves principais e complementares para um afundamento de 0,1 pu – Caso 01.

A partir das informações e procedimentos supramencionados, as tensões de compensação definidas e destinadas à inserção série com o alimentador correspondem àquelas ilustradas na figura 4.6. Complementarmente, na tabela 4.4 tem-se os correspondentes valores das tensões e correntes incrementais.

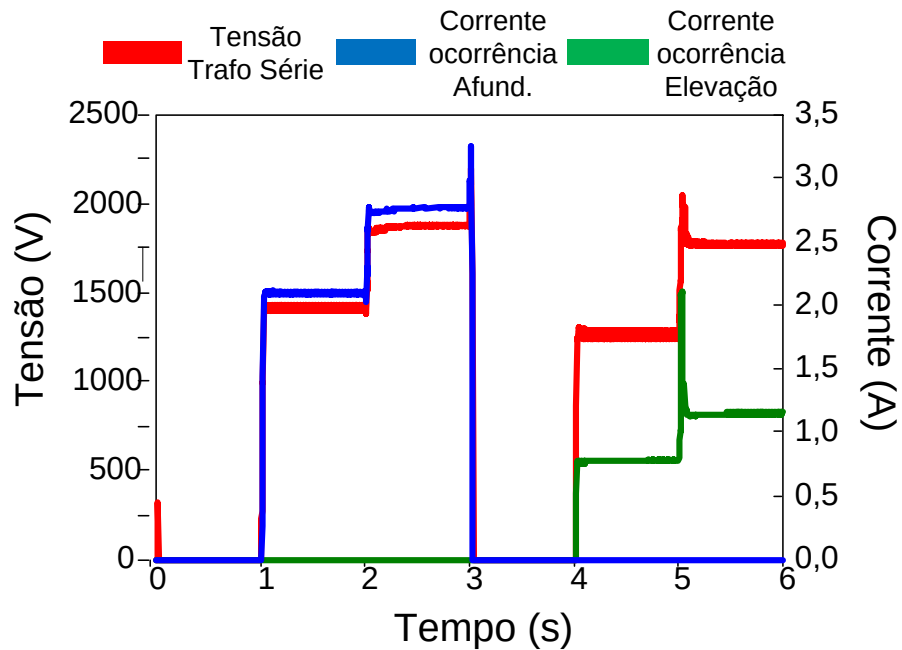


Figura 4.6 – Tensões e correntes injetadas no primário do transformador série – Caso 01.

Tabela 4.4 - Tensões e correntes de injeção no transformador série – Caso 01

Intervalos	Tempo [s]	Tensão no trafo série [pu]	Corrente no trafo série [A]
Intervalo 1	0 a 1	0	0
Intervalo 2	1 a 2	0,18	2,10
Intervalo 3	2 a 3	0,24	2,8
Intervalo 4	3 a 4	0	0
Intervalo 5	4 a 5	0,16	0,80
Intervalo 6	5 a 6	0,22	1,20

Portanto, a partir da geração dos pulsos para os pares de chaves condutoras e da ilustração dos valores de tensão e correntes impostas no primário do transformador série, chega-se ao perfil para as tensões da barra 2 indicado na figura 4.7. A título de ilustração e

comparação, na mesma figura encontram-se também indicadas as tensões de suprimento não compensadas. Adicionalmente, a tabela 4.5 fornece os valores encontrados neste gráfico.

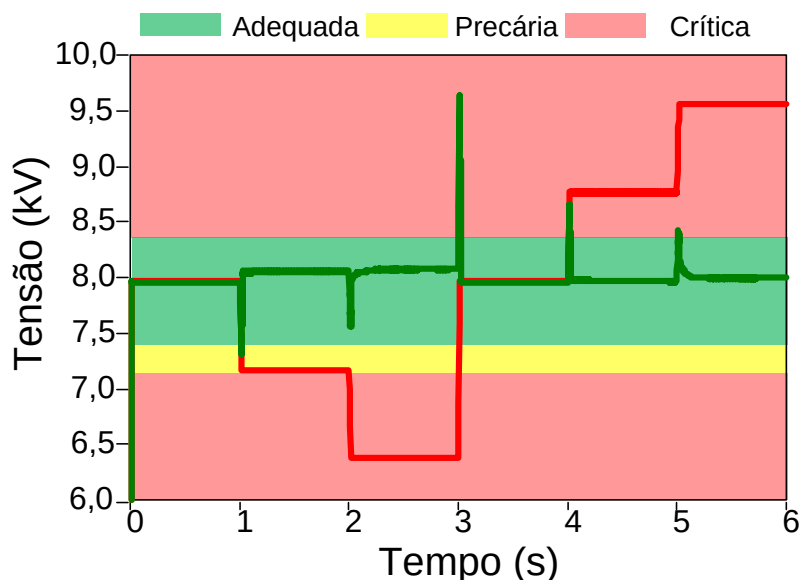


Figura 4.7 - Tensões nos barramentos 1 e 2.

Tabela 4.5 - Tensões de da Barra 1 e Barra 3 – Caso 01

Intervalos	Tempo [s]	Tensão da Barra 1 [pu]	Tensão da Barra 2 [pu]
Intervalo 1	0 a 1	1,00	1,00
Intervalo 2	1 a 2	0,90	1,01
Intervalo 3	2 a 3	0,80	1,00
Intervalo 4	3 a 4	1,00	1,00
Intervalo 5	4 a 5	1,10	0,99
Intervalo 6	5 a 6	1,20	1,00

Objetivando evidenciar as tensões reguladas na barra 2 em suas formas instantâneas, os gráficos relacionados com o período completo de estudos e dois exemplos de focalizações são indicados nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10. Enquanto que a figura 4.8 ilustra o perfil completo, as figuras 4.9 e 4.10 ilustram, respectivamente, as formas de onda de tensão no instante do afundamento momentâneo de tensão com tensão residual de 80%. Atenção especial deve ser dada a uma aparente diferença entre os picos de tensão ao longo do processo, fato este

diretamente relacionado com a tensão de inserção não senoidal adicionada à tensão de suprimento.

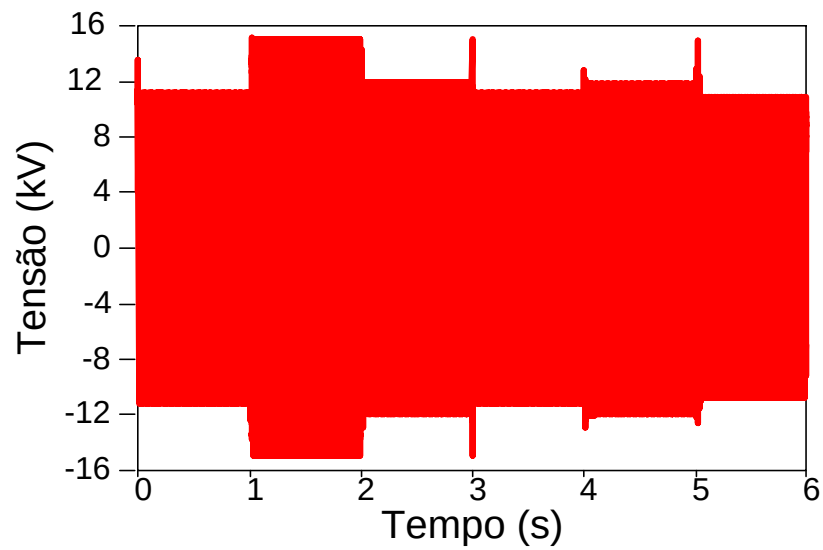


Figura 4.8 – Formas de onda da tensão da fase A - barra 2 – após o processo da compensação – Caso 01.

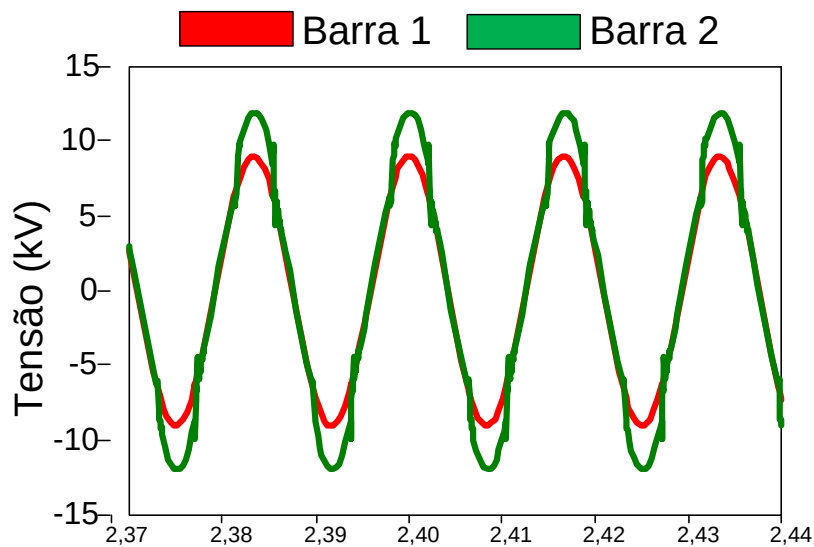


Figura 4.9 – Zoom da forma de onda de tensão da fase A no instante do afundamento momentâneo de tensão com tensão residual 80% – Caso – 01.

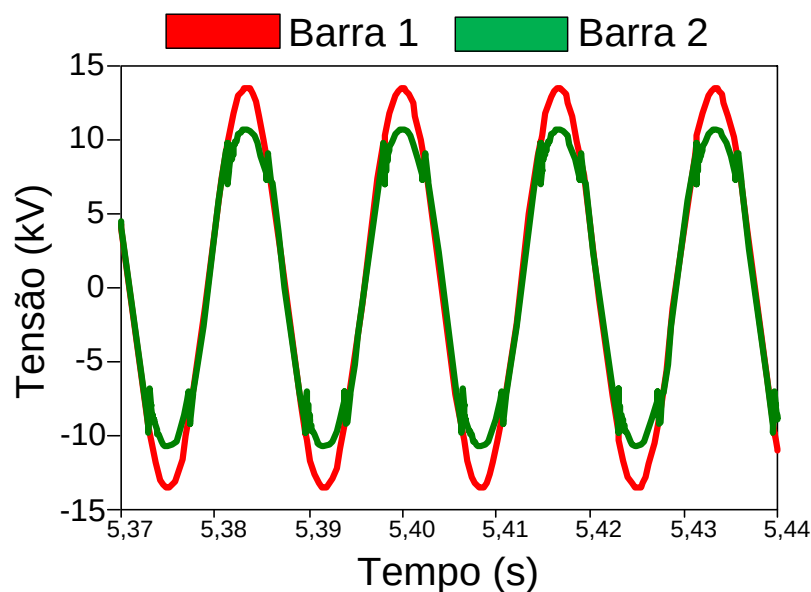


Figura 4.10 – Zoom da forma de onda de tensão da fase A no instante da elevação momentânea de tensão de 1,2pu – Caso 01.

Em relação a distorção harmônica total de tensão ocorrida para cada uma das variações de tensão, a figura 4.11 ilustra os valores encontrados para a simulação de afundamentos e elevações equilibrados de tensão.

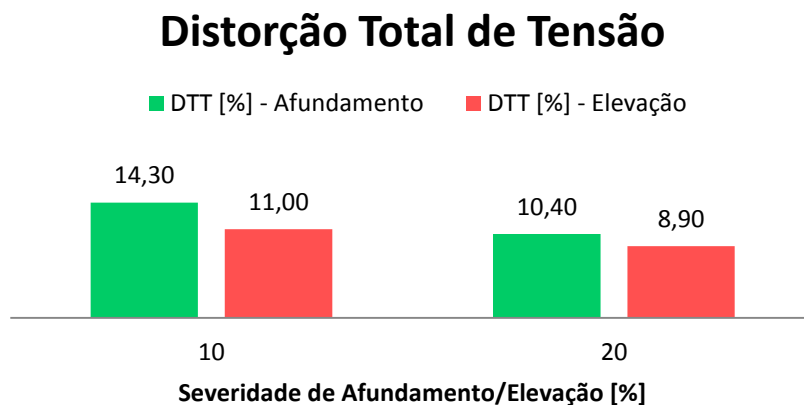


Figura 4.11 – Exemplificação do nível de distorção harmônica total de tensão para as duas condições ilustradas anteriormente – Caso 01.

No que tange às potências requeridas pelo complexo, em particular as potências aparentes envolvidas no processo de compensação, a figura 4.12 evidencia tais grandezas para os diversos pontos do sistema, a saber: entre a fonte e a barra 1; entre a barra 2 e a carga; e,

por fim, entre o secundário do autotransformador e o primário do transformador série. A tabela 4.6 fornece os valores obtidos para estas grandezas e mostra que o processo da compensação ocorre com um percentual da potência total consumida pela carga.

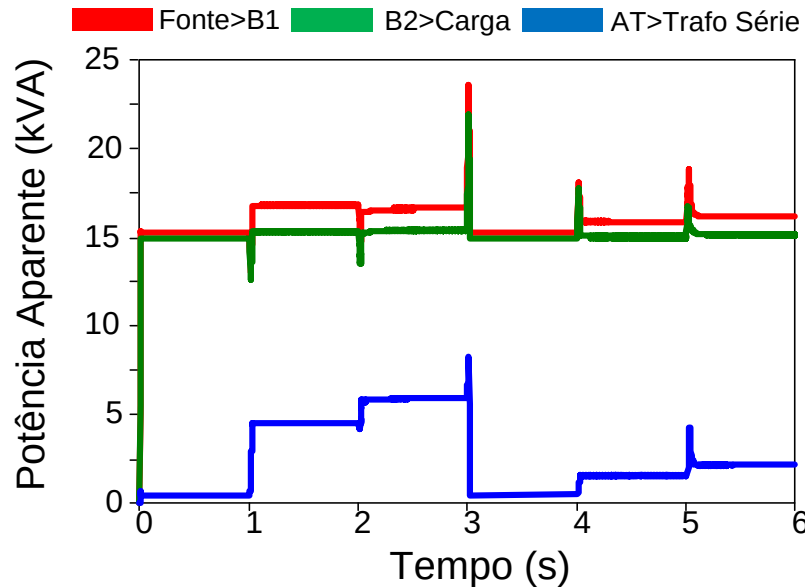


Figura 4.12 - Potências aparentes nos diversos intervalos citados – Caso 01.

Intervalos	Tempo [s]	Fonte>B1 [kVA]	B2>Carga [kVA]	AT>Prim. Tr. Série [kVA]
Intervalo 1	0 a 1	15,3	15,0	0,3
Intervalo 2	1 a 2	16,7	15,3	4,5
Intervalo 3	2 a 3	16,6	15,4	5,9
Intervalo 4	3 a 4	15,3	15,0	0,3
Intervalo 5	4 a 5	15,9	15,0	1,5
Intervalo 6	5 a 6	16,1	15,1	2,1

De modo similar, os resultados indicados na figura 4.13 e tabela 4.7 fornecem o correspondente desempenho do complexo quanto aos fluxos de potências ativas. As constatações são as mesmas já feitas para as potências aparentes, isto é, o dispositivo regulador atua no sentido de adicionar ou absorver a potência na rede principal.

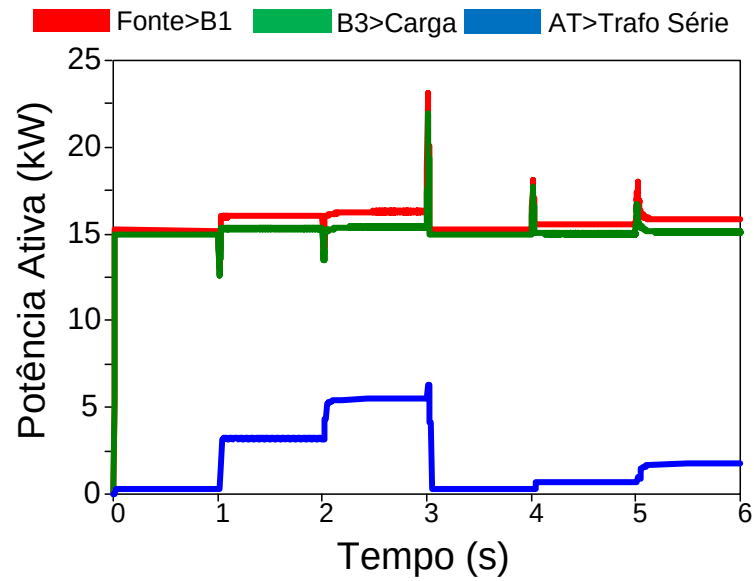


Figura 4.13 - Potências ativas nos diversos intervalos citados – Caso 01.

Tabela 4.7 - Potências Ativas em kW entre os barramentos citados – Caso 01

Intervalos	Tempo [s]	Fonte>B1 [kW]	B2>Carga [kW]	AT>Prim. Tr. Série [kW]
Intervalo 1	0 a 1	15,2	15,0	0,2
Intervalo 2	1 a 2	16,0	15,3	3,2
Intervalo 3	2 a 3	16,3	15,4	5,5
Intervalo 4	3 a 4	15,2	15,0	0,2
Intervalo 5	4 a 5	15,5	15,0	0,7
Intervalo 6	5 a 6	15,8	15,1	1,7

A última grandeza a ser explorada refere-se ao desempenho das potências reativas, as quais, como não poderia ser diferente, obedecem a mesma lógica já destacada para as anteriores. A figura 4.14 e tabela 4.8 sintetizam os resultados obtidos.

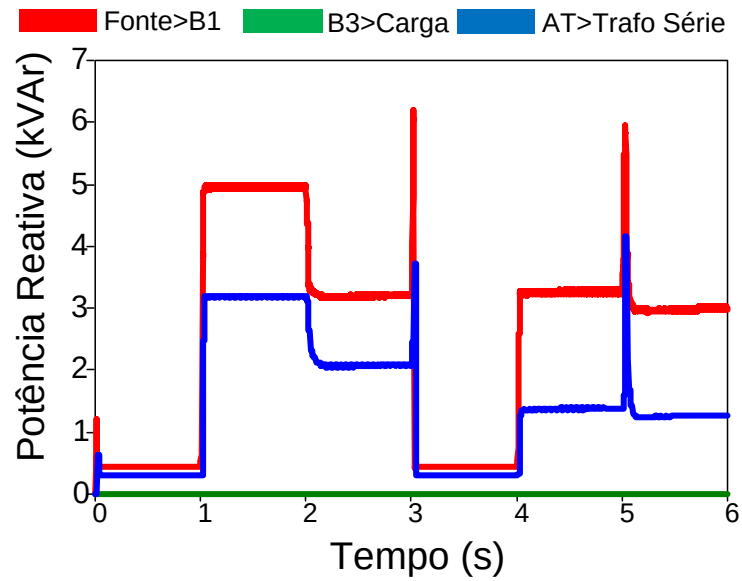


Figura 4.14 - Potências reativas nos diversos intervalos citados – Caso 01

Tabela 4.8 - Potências Reativas em kVAr entre os barramentos citados – Caso 01

Intervalos	Tempo [s]	Fonte>B1 [kVAr]	B2>Carga [kVAr]	AT>Prim. Tr. Série [kVAr]
Intervalo 1	0 a 1	0,4	0	0,3
Intervalo 2	1 a 2	5,0	0	3,2
Intervalo 3	2 a 3	3,2	0	2,0
Intervalo 4	3 a 4	0,4	0	0,3
Intervalo 5	4 a 5	3,2	0	1,4
Intervalo 6	5 a 6	3,0	0	1,3

À luz do exposto segue que os resultados apresentados e discutidos ratificaram a eficácia do CET juntamente com sua nova filosofia de controle. De fato, a tensão na barra 2 manteve-se praticamente constante durante todo o período de simulação, proporcionando assim, a manutenção da potência solicitada pela carga.

4.4 CASO 02: CONDIÇÕES DE VARIAÇÕES MOMENTÂNEAS DESEQUILIBRADAS DE TENSÃO

De forma análoga, para este segundo estudo de caso, o tempo total de simulação foi de 6s, durante o qual foram simuladas diferentes situações quando aos fenômenos atrelados com as variações de tensão. Tendo em vista que, diferentemente do caso 01, as investigações aqui conduzidas refletem condições operativas desequilibradas, as variáveis associadas com o desempenho da compensação de cada fase será, naturalmente, distinto. Diante desta realidade, há necessidade de se apresentar e discutir individualmente os desempenhos para as fases A, B e C.

Diante de um número infinito de situações passíveis de ocorrência para um alimentador elétrico típico, houve necessidade, para fins desta dissertação, da proposição de um perfil típico de variações assimétricas de tensões. A escolha recaiu, aleatoriamente, para o comportamento indicado na figura 4.15, complementada pela tabela 4.9.

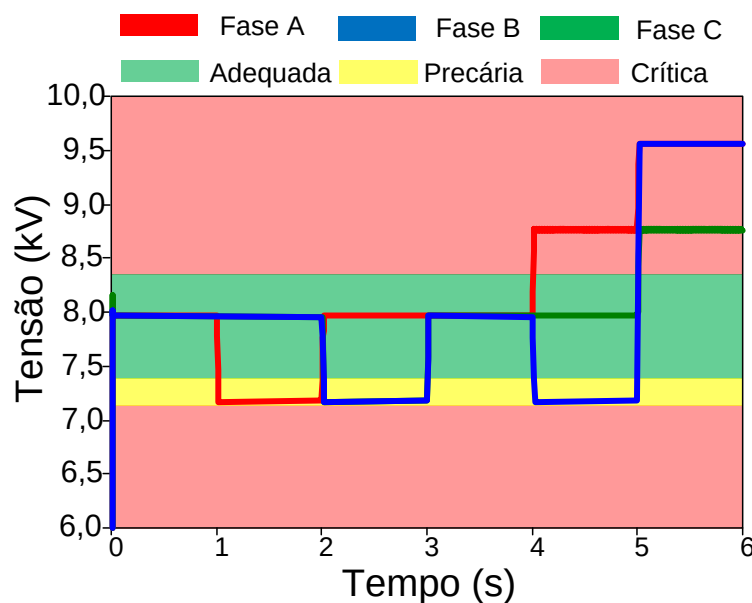


Figura 4.15 – Tensão eficaz das fases A, B e C na Barra 1 e seus intervalos de variação – Caso 02.

Tabela 4.9 - Tensões de Operação Adotadas para a Fase A, B e C da Barra 1 – Caso 02

Intervalos	Tempo [s]	Tensão Fase A (pu)	Tensão Fase B (pu)	Tensão Fase C (pu)
Intervalo 1	0 a 1	1,00	1,00	1,00
Intervalo 2	1 a 2	0,90	1,00	1,00
Intervalo 3	2 a 3	1,00	0,90	0,90
Intervalo 4	3 a 4	1,00	1,00	1,00
Intervalo 5	4 a 5	1,10	1,00	0,90
Intervalo 6	5 a 6	1,20	1,10	1,20

Seguindo a mesma lógica instituída no estudo de caso anterior, tem-se, na sequência, os ângulos α e β das fases A, B e C para fins da adequação do valor de tensão eficaz a ser injetado em série com a tensão de suprimento. As figuras 4.16, 4.17 e 4.18 ilustram os valores encontrados para estas três fases, bem como as tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 fornecem os valores obtidos. Vale ressaltar que as figuras foram apresentadas separadamente por fase para maior clareza na visualização do processo.

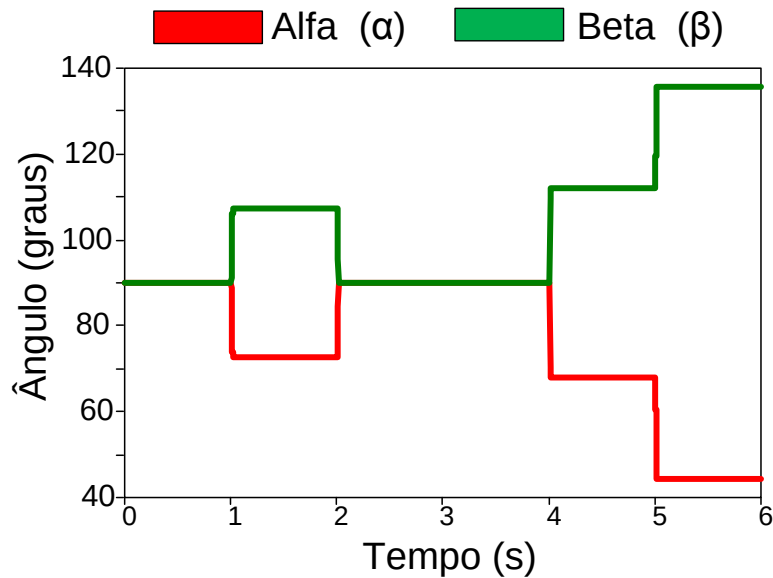


Figura 4.16 – Ângulos α e β para adequação da tensão – fase A – Caso 02.

Tabela 4.10 - Ângulos Alfa e Beta para a fase A – Caso 02

Intervalos	Tempo [s]	α [°]	β [°]
Intervalo 1	0 a 1	90	90
Intervalo 2	1 a 2	72,5	107,5
Intervalo 3	2 a 3	90	90
Intervalo 4	3 a 4	90	90
Intervalo 5	4 a 5	68,0	112,0
Intervalo 6	5 a 6	44,5	135,5

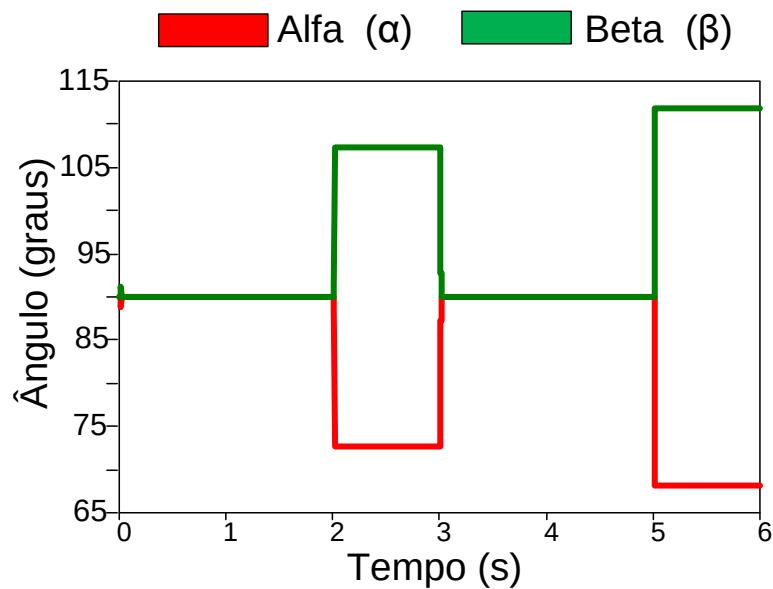


Figura 4.17 – Ângulos α e β da fase B para adequação da tensão – Fase B – Caso 02.

Tabela 4.11 - Ângulos Alfa e Beta da fase B – Caso 02

Intervalos	Tempo [s]	α [°]	β [°]
Intervalo 1	0 a 1	90	90
Intervalo 2	1 a 2	90	90
Intervalo 3	2 a 3	72,5	107,5
Intervalo 4	3 a 4	90	90
Intervalo 5	4 a 5	90	90
Intervalo 6	5 a 6	68,0	112,0

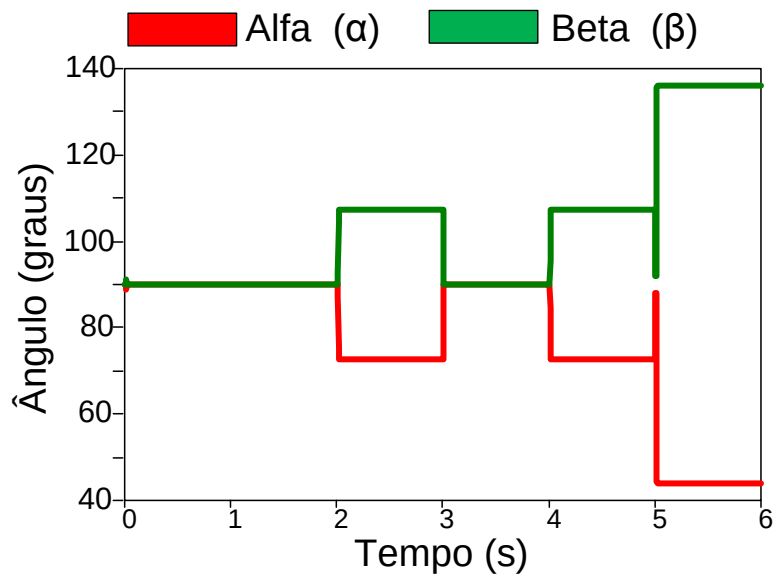


Figura 4.18 – Ângulos α e β da fase C para adequação da tensão – Fase C – Caso 02.

Tabela 4.12 - Ângulos Alfa e Beta da fase C – Caso 02

Intervalos	Tempo [s]	α [°]	β [°]
Intervalo 1	0 a 1	90	90
Intervalo 2	1 a 2	90	90
Intervalo 3	2 a 3	72,5	107,5
Intervalo 4	3 a 4	90	90
Intervalo 5	4 a 5	72,5	107,5
Intervalo 6	5 a 6	44,0	136,0

Em consonância com as condições apresentadas têm-se os valores das tensões a serem injetadas no primário do transformador série. Além destas grandezas, são ainda indicadas as correntes de injeção para cada situação. O perfil das tensões e correntes para as fases A, B e C, são ilustradas nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21 e, complementarmente, seus valores encontram-se indicados nas tabelas 4.13, 4.14 e 4.15.

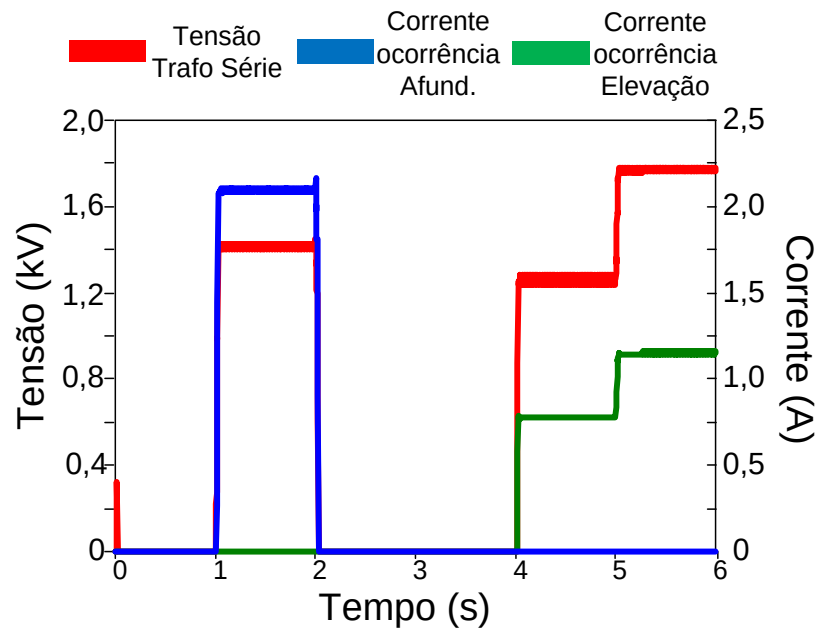


Figura 4.19 – Tensões e correntes da fase A injetadas no primário do transformador série – Caso 02.

Tabela 4.13 - Tensões e correntes de injeção da fase A no transformador série – Caso 02

Intervalos	Tempo [s]	Tensão no trafo série [pu]	Corrente no trafo série [A]
Intervalo 1	0 a 1	0	0
Intervalo 2	1 a 2	0,18	2,10
Intervalo 3	2 a 3	0	0
Intervalo 4	3 a 4	0	0
Intervalo 5	4 a 5	0,16	0,80
Intervalo 6	5 a 6	0,22	1,20

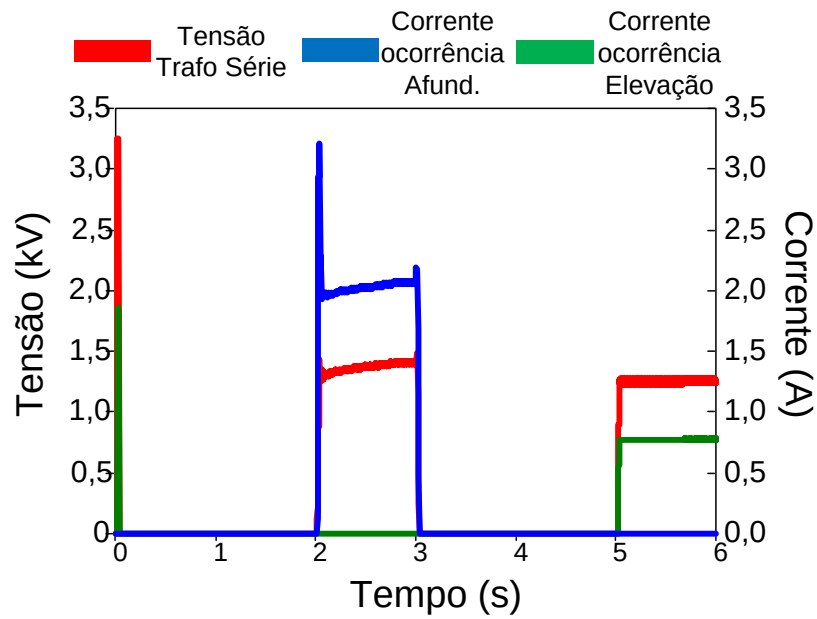


Figura 4.20 – Tensões e correntes da fase B injetadas no primário do transformador série – Caso 02.

Tabela 4.14 - Tensões e correntes de injeção da fase B no transformador série – Caso 02

Intervalos	Tempo [s]	Tensão no trafo série [pu]	Corrente no trafo série [A]
Intervalo 1	0 a 1	0	0
Intervalo 2	1 a 2	0	0
Intervalo 3	2 a 3	0,17	2,05
Intervalo 4	3 a 4	0	0
Intervalo 5	4 a 5	0	0
Intervalo 6	5 a 6	0,16	0,8

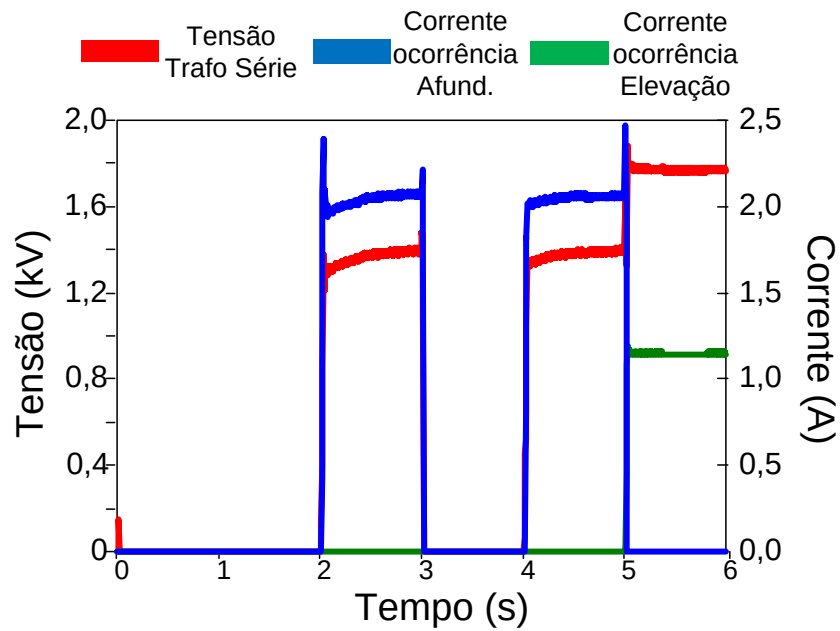


Figura 4.21 – Tensões e correntes da fase C injetadas no primário do transformador série – Caso 02.

Tabela 4.15 - Tensões e correntes de injeção da fase C no transformador série – Caso 02

Intervalos	Tempo [s]	Tensão no trafa série [pu]	Corrente no trafa série [A]
Intervalo 1	0 a 1	0	0
Intervalo 2	1 a 2	0	0
Intervalo 3	2 a 3	0,17	2,0
Intervalo 4	3 a 4	0	0
Intervalo 5	4 a 5	0,18	2,0
Intervalo 6	5 a 6	0,22	1,2

Por fim, o resultado final e individual para cada uma das fases, no que se refere às tensões nos terminais da carga, encontra-se indicado na figura 4.22. Como pode ser constatado, a atuação do CET, quanto a sua composição global (unidades de potência e controle), se mostra extremamente efetiva ao processo a que se destina.

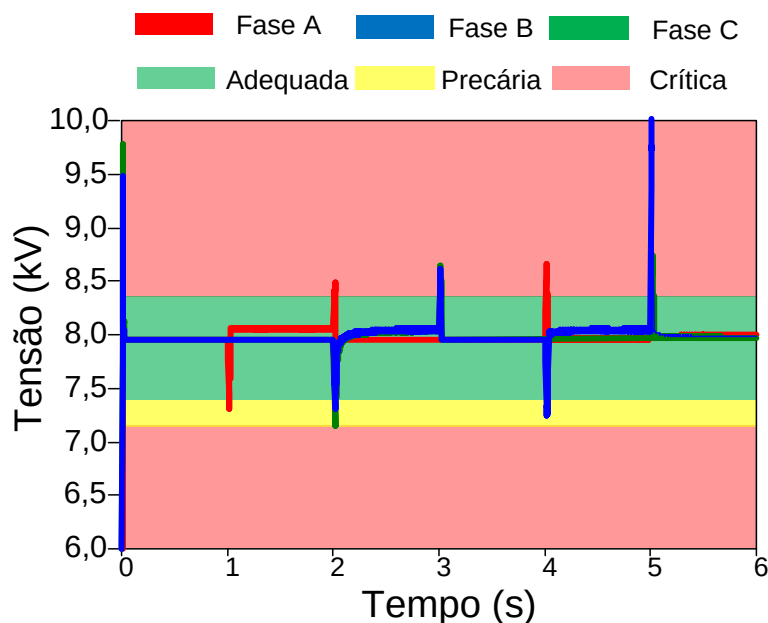


Figura 4.22 – Tensões das fases A, B e C corrigidas no barramento 2 – Caso 02.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo apresentado, em complementação ao anterior visou, sobretudo, ilustrar computacionalmente, a eficácia do regulador de tensão aqui denominado por CET, quando da manifestação de sucessivos e crescentes níveis de fenômenos associados com afundamentos e elevações momentâneas de tensão.

Com este intuito foi feita a proposição de um alimentador com características e parâmetros compatíveis com a realidade de campo e, através da caracterização de fenômenos responsáveis pelas alterações dos valores eficazes das tensões nos terminais do consumidor, nos termos acima referidos, foram realizados estudos diversos de desempenhos, os quais foram organizados na forma de dois casos básicos. Um primeiro vinculado com a manifestação de desvios das tensões de forma equilibrada, e outro, representando condições mais frequentes com a realidade operativa das redes de distribuição, qual seja, variações assimétricas das tensões.

Os resultados obtidos e aqui apresentados mostraram, através das mais diversas grandezas associadas com o processo de compensação idealizado, os ângulos de controle, as compensações de tensão a serem utilizadas, as correntes empregadas, as potências envolvidas e, por fim, o desempenho final atingido na forma da regularização da tensão nos terminais da carga.

Um aspecto que merece destaque refere-se à questão das distorções harmônicas associadas com a metodologia aqui proposta e pela estratégia da produção de uma tensão de compensação que se apresenta com forma de onda não senoidal. De fato, como observado ao longo do capítulo, muito embora o sucesso no processo da restauração da tensão, ficou evidenciada a produção de uma distorção harmônica total de tensão em proporções significativas. Não obstante a isto é importante lembrar que o compromisso maior foi atingido à custa de uma degradação da forma de onda da tensão na carga, porém, a manutenção da tensão nos patamares regulamentados se mostra, para as condições impostas, com maior grau de relevância.

Quanto a questão do sucesso do dispositivo na compensação de tensões desequilibradas, a possibilidade de funcionamento do regulador de forma independente por fase, também viabilizou, mesmo sob situações assimétricas, uma plena compensação dos padrões de tensão. Diante disto, não apenas a restauração dos valores eficazes das tensões foi obtida, como também o equipamento se mostrou com mérito para a adequação do suprimento aos padrões definidos pela agência reguladora no que tange aos indicadores de desempenho do produto: fator de desequilíbrio de tensão.

Um ponto que a ser observado é que, devido a variação dv/dt igual a zero da transição dos valores de variação de tensão, o primeiro valor registrado de tensão apresenta-se como um “spike”, o qual, em um sistema real, não irá acontecer devido a impedância de curto-circuito da rede e, obviamente, que a variação dv/dt para um caso real é diferente de zero.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante as considerações e comentários próprios feitos ao longo de cada capítulo considera-se essencial, neste momento, destacar as principais constatações, resultados e limitações obtidos dos estudos realizados ao longo desta dissertação, proporcionando, deste modo, uma visão ampla e sucinta das atividades realizadas pela presente dissertação, e ainda, apontar para as perspectivas futuras de trabalhos voltados para a complementação da proposta aqui feita.

O primeiro capítulo, em consonância com uma linha tradicional para a organização de uma dissertação, foi destinado a uma contextualização do tema central desta pesquisa. Neste sentido, foram apresentados os fatores motivadores para a realização de pesquisas no contexto aqui considerado, a relevância do tema dentro do cenário nacional e internacional, as filosofias que norteiam os produtos destinados ao processo da regulação da tensão, as contribuições oferecidas pela presente pesquisa e, por fim, a estrutura geral concebida para a elaboração e apresentação da dissertação, no seu âmbito técnico, científico e acadêmico.

O Capítulo II, ainda com forte caráter introdutório, tratou das principais filosofias de controle e atuação para regulação das tensões nas barras de suprimento, sendo estas divididas em duas estratégias fundamentais: as indiretas e as diretas. Com relação à filosofia indireta, as quais se utilizam da compensação reativa para obtenção da regulação das tensões, seus princípios físicos são amplamente conhecidos dentro dos conceitos que regem o

funcionamento dos circuitos e arranjos elétricos. Portanto, a partir deste princípio, a tônica maior foi direcionada aos principais equipamentos disponíveis e comercialmente oferecidos no mercado nacional e internacional. De forma similar, foram explorados os equipamentos denominados como associados com meios para uma compensação direta da tensão. Estes, com sintonia com os clássicos transformadores de tapes variáveis ou com meios para a inserção de incrementos positivos ou negativos de tensão, se fazem presentes como uma realidade incontestável para a engenharia elétrica. Os dispositivos fundamentados nesta tecnologia foram também destacados no texto.

Optando-se pela linha de produtos voltados para a regulação da tensão nos termos propostos pela estratégia da inserção de uma tensão de compensação em série surgiu o Capítulo III. Este focou, sobremaneira, o mecanismo concebido para a manutenção dos níveis de suprimento de acordo com a regulamentação vigente, nos termos originalmente estabelecidos pela tese de doutorado (em andamento) sob responsabilidade do aluno: Fabricio Parra Santilo. A ideia central encontra sustentação na injeção de uma tensão de compensação, aditiva ou subtrativa, a qual somada à de suprimento da rede de alimentação e objeto de variações, promove a restauração da tensão de suprimento do consumidor de acordo com as exigências impostas pelas normas vigentes e estabelecida pela ANEEL. O dispositivo foi designado por CET (Compensador Eletromagnético de Tensão).

Dentre os atrativos que indicam que a proposta em pauta possui propriedades atrativas está a sua constituição física, totalmente eletromagnética, sem peças móveis, com dispositivo de regulação inicialmente adotado com características tais a oferecer um controle discreto através de chaves mecânicas ou eletrônicas, dentre outras características. Isto, à princípio, se mostra vantajoso no que tange a sua robustez, custos e confiabilidade. Ainda, há de se destacar que o produto considerado se apresenta com: menores potências passantes, as tensões utilizadas para a compensação se apresentam em níveis inferiores à nominal da rede, etc..

Uma vez estabelecidos os fundamentos do projeto, os trabalhos contemplaram, de modo especial, a questão da lógica do controle propriamente dito, tema este que se constitui no cerne desta dissertação. Dentro deste contexto, foram tecidos comentários sobre a estratégia do processo de compensação original e dados passos importantes na direção do estabelecimento de uma nova filosofia, baseada não apenas no chaveamento, mas também do controle eletrônico da tensão a ser adicionada ao alimentador, objetivando, por fim, a regulação pretendida. Isto resultou no estabelecimento de uma estratégia de controle com características contínuas quando aos níveis de compensação da tensão, a qual se mostrou promissora quanto a restauração de variações de tensão simétricas ou não, e ainda, devido as propriedades intrínsecas ao controle eletrônico, com possibilidade de oferecer tempos de respostas adequados aos propósitos da mitigação de VTCD's.

Uma vez que as unidades de potência já se encontravam estabelecidas na plataforma ATP (pesquisa de doutorado), as atividades foram direcionadas à implementação da concepção e lógica de controle estabelecidas nesta dissertação, fato este que levou a utilização dos recursos da MODELS. Assim agindo, passou-se a dispor de um software, na base do domínio do tempo - ATPDraw, contendo o regulador de tensão aqui considerado, agora com um controle eletrônico, nos termos propostos pela presente pesquisa.

Uma vez obtida a ferramenta computacional de análise, as investigações prosseguiram na direção da caracterização de um sistema hipotético ao qual seriam impostas variações simétricas e assimétricas de tensão e, com a adição do regulador aqui explorado, a realização de estudos de desempenho do complexo quando aos objetivos maiores do produto proposto e implementado no simulador ATP.

Uma vez definido e parametrizado o alimentador, foram selecionados dois conjuntos de situações para os trabalhos. Uma compreendendo variações de tensão simétricas destas grandezas, em escalas graduais dentro de uma faixa de 0% à 20% (afundamento e elevação).

Outra, associada com fenômenos similares porém assimétricos. Estes foram os dois conjuntos de situações que originaram o que se denominou por Caso 01 e 02, cada qual impondo distúrbios de forma abrupta para as tensões objetivando, desta forma, analisar as potencialidades da proposta e sua eficácia aos propósitos aqui estabelecidos.

À luz dos desempenhos obtidos e sintetizados nas figuras e tabelas pôde-se observar que:

- O compensador se mostrou eficaz para o processo da regulação da tensão nos termos requeridos, pois, nos termos evidenciados computacionalmente, as tensões, correntes e potências supridas à carga se apresentam com valores praticamente inalterados;
- A nova filosofia de controle se mostrou eficaz, promissora e capaz de promover a regulação das tensões de curta e de longa duração;
- Um aspecto que merece destaque refere-se à questão das distorções harmônicas associadas com a metodologia aqui proposta e pela estratégia da produção de uma tensão de compensação que se apresenta com forma de onda não senoidal. De fato, como observado ao longo do capítulo, muito embora o sucesso no processo da restauração da tensão ficou evidenciado a produção de uma distorção harmônica total de tensão em proporções significativas. Não obstante a isto é importante lembrar que o compromisso maior foi atingido mesmo que à custa de uma degradação da forma de onda da tensão na carga;
- Muito embora os valores constantes nas figuras e tabelas para as potências associadas com a operação do regulador se mostrem positivas, vale observar que, para os casos de afundamentos momentâneos de tensão as mesmas são fornecidas e, para as situações vinculadas com elevações momentâneas de

tensão, estas invertem o seu sentido no Compensador Eletromagnético Série de Tensão;

- As relações percentuais entre as potências entregues à carga, para as distintas situações avaliadas, e aquelas atreladas com os requisitos exigidos do compensador, deixam claro que, este último é exigido com valores inferiores ao do suprimento. Isto evidencia que o dispositivo regulador, para cada nível de compensação solicitado na sua operação, opera com potências significativamente inferiores aos valores entregues à carga. Neste contexto fica demonstrado que quanto maior os valores das variações de tensão a serem restauradas tanto maior será a potência demandada do dispositivo em pauta.

Sintetizando as informações acima relacionadas, fica esclarecido que o regulador em questão, juntamente com o sistema de controle por chaveamento contínuo, se mostra adequado à compensação de VTCDs e de fenômenos de caráter de regime permanente. Não obstante a isto, a filosofia de controle por chaveamento contínuo ainda necessita aprimoramentos quanto aos seus objetivos e praticidade, obtenção de protótipos para a realização de testes laboratoriais para validação do processo, identificação e avaliação dos impactos sobre as distorções harmônicas e a construção de um protótipo em escala real para o processo avaliativo em campo. Enfim, o trabalho de pesquisa aqui realizado aponta para a necessidade de aprimoramentos e avanços nos seguintes pontos focais:

- Desenvolvimento de equacionamentos que correlacionem a relação entre os níveis de compensação almejados e respectivos ângulos de disparo das unidades de controle eletrônico visando a generalização da estratégia de regulação aqui estabelecida;
- Estudos relacionados com as quedas de tensão manifestadas nos transformadores paralelo e série visando otimizar o processo de regulação;

- Avaliação dos níveis de distorções harmônicas produzidas pelo regulador, em consonância com o controle dos disparos das chaves e, por conseguinte, os impactos sobre o sistema elétrico como um todo;
- Modelagem através de técnicas de representação utilizando elementos finitos para o maior domínio das questões associadas com a operação do dispositivo sob o ponto de vista magnético;
- Definição, especificação e construção de uma estrutura laboratorial para estudos experimentais e validação da proposta feita por esta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – Prodist – Modulo 8, 2008.
- [2] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – **Resolução Nº 505, de 26 de novembro de 2001.**
- [3] Oliveira, J. C.; Vasconcellos, A. B.; Apolônio, R.; Kawaphara, M. K.; Carvalho, J. E.; Raupp, R. **Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação.** VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia – VII CBQEE 2007, Santos, São Paulo.
- [4] Vasconcellos, A. B. **Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos tipo Reator a Núcleo Saturado Para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e Validação Experimental.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Setembro de 2004.
- [5] Barbosa Jr., J. A. F.; Oliveira, J. C.; Gondim, I. N.; Santilio, F. P.; Silva, T. V.; Vasconcellos, A. B.; Pacheco, J. M. **Avaliação Técnica e Econômica para o Uso de Reatores Saturados em Substituição aos Lineares em um Sistema de Transmissão em AT.** Ninth Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission - CLAGTEE 2011, Mar del Plata - Argentina.

- [6] B. M. Weedy and B. J. Corry – “**Electric Power Systems**” Fourth Edition, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex – United Kingdom – November 2004.
- [7] Santos, C. H. R. R. **Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Novembro de 2003.
- [8] Zhengping Xi; Parkhideh, B.; Bhattacharya, S.; **Improving Distribution System Performance with Integrated STATCOM and Super capacitor Energy Storage System**, Semicond. Power Electron. Center, North Carolina State Univ., Raleigh, NC, Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008, IEEE.
- [9] Weinhold, M.; Zurowski, R.; Mangold, T.; Voss, L.. **Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems**. II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica 1997 – SBQEE 1997, São Lourenço – Minas Gerais – Brasil.
- [10] Gyugyi, L. “**Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems**”. IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, Volume 139, Issue 4, Pag. 323-331. 1992.
- [11] Lima, R. R. ; Oliveira, A. de ; Oliveira, J. C. de ; Chaves, M. L. R. ; Silva, P. R. C. ; Benichio, V. M. **Projeto e implementação de um novo regulador de tensão em sistemas de distribuição de energia de 13,8 kV**. III Congresso International de Distribución Eléctrica, 2006, Buenos Aires - Argentina.
- [12] **Regulador de Tensão Monofásico COOPER – VR 32**, Manual do fabricante. Cooper Power Systems. Site: www.cooperpower.com
- [13] **Regulador de Tensão Monofásico ITB RAV-2**, Manual do fabricante. ITB Equipamentos Elétricos. Sitio: www.itb.ind.br.

- [14] Galassi M. **Projeto e Construção de um Restaurador Dinâmico de Tensão**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – São Paulo, 2006.
- [15] De Jesus, D. M. F.; Samesima, M. I.. **Avaliação de Desempenho do Restaurado Dinâmico de Tensão (DVR) na Compensação de Afundamentos e Elevações de Tensão**. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, 2007, Rio de Janeiro - RJ. V.1. p. 1-6.
- [16] Sidelmo, M. S. **Análise e Implementação de um Restaurado Dinâmico de Tensão**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dezembro de 2003.
- [17] Divan, D; Schneider, R.; Brumsickle, W.; Trungale, D.; Grant, T. **Impact of Voltage Sag Correction in Manufacturing Applications**. PQA 2002, North America – Portland, Oregon – Junho de 2002.
- [18] **MiniDySc, ProDySc e MegaDySC**, Manual do fabricante. Softswitching Technologies. Site: <http://www.softswitch.com/sst/index.do>
- [19] Pires, I. A. **Compensadores Série de Tensão em Onda Quadrada: Aplicação na Mitigação de Afundamentos de Tensão**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – Minas Gerais, 2011.
- [20] Santilio, F. P.; Velasco, L. N.; Oliveira, José Carlos de; Oliveira, A. **Uma Proposta de Regulador Eletromagnético Através da Inserção de Reforço Série de Tensão**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2010, Belém - Pará.
- [21] Santilio, F. P.; Barbosa, J. A. F.; Oliveira, J. C. ; Oliveira, A.; Gondim, I. N.; Vitoretti, L. C. **Análise de Desempenho de uma Proposta de Regulador Eletromagnético com Injeção Série de Tensão**. IX INDUSCON - 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2010, São Paulo.
- [22] Santilio, F. P.; Oliveira, J. C. ; Oliveira, A.; Bonelli, A. F.; Barbosa, J. A. F.; GONDIM, I. N. **Reguladores Eletromagnéticos através do Reforço Série de Tensão: Controle e**

Avaliação Computacional de Desempenho. IX CBQEE – IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá-MT.

- [23] Santilio, F. P.; Oliveira, J. C.; Silva, T. V. ; Oliveira, A. **An Electromagnetic Voltage Regulator Proposal throughout the Injection of Series Compensation: Physical Conception and Computational Analysis.** EPQU - ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILIZATION, 2011, Lisbon.
- [24] Santilio, F. P. ; Silva, T. V. ; Oliveira, J. C. ; Barbosa, J. A. F. **Proposta de Topologia e Validação Operacional de um Dispositivo Eletromagnético Baseado na Injeção Série de Tensão para o Processo da Regulação.** IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE 2012, 2012, Goiânia-MG.
- [25] Santilio, F. P.; Silva, T. V.; Oliveira, J. C. ; Barbosa, J. A. F. **A Computational and Experimental Performance Analysis of an Electromagnetic Voltage Regulator Proposal throughout Controlled Series Voltage Injection.** International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ 12, 2012, Santiago de Compostela.
- [26] Silva, T. V.; Santilio, F. S.; Vasconcelos, L. E.; Oliveira, J. C. **Análise Computacional de Desempenho de Duas Propostas de Controle e Chaveamento Para o Compensador Eletromagnético de Tensão.** X CEEL 2012 – Conferência do Estudos de Engenharia Elétrica 2012. Uberlândia - Minas Gerais – Brasil.
- [27] Silva, T. V.; Santilio, F. S.; Vasconcelos, L. E.; Oliveira, J. C. **Uma Proposta para o Controle Eletrônico de Reguladores Eletromagnéticos Através do Reforço Série de Tensão.** 10th INDUSCON – 10th IEEE/IAS International Conference on Industrial Applications 2012. Fortaleza – Ceará – Brasil.
- [28] Resende, J. W. Apostila “**Compensadores Estáticos e Suas Aplicações**”. Disciplina do curso de pós graduação em Engenharia Elétrica intitulada “**Carga Elétricas Não Convencionais Indústrias**”. Uberlândia – Minas Gerais - 2011/1.

APÊNDICE 1

```

MODEL PULSE

COMMENT
-----
MODELS FEITA PARA ENGATILHAR PULSOS DO GTO
-----
ENDCOMMENT

INPUT
vlei ----tensão da barra 1, [V]
vlei2 ----tensão da barra 2, [V]

OUTPUT
paf ----pulso de saída de afundamento[aberto-0 e fechado-1][K]
pel ----pulso de saída de elevação [aberto-0 e fechado-1], [K]
pafc ---pulso complementar de saída de afundamento [aberto-0 e fechado-1],[K]
pelc ---pulso complementar de saída de elevação [aberto-0 e fechado-1], [K]

DATA
FREQ{df1t:60} ----frequência do sistema, [Hz]
vref{df1t:7967} ----tensão nominal de referencia do sistema

HISTORY
ct {df1t:0} ---- memoriza os pontos anteriores de vlei
tempo_f {df1t:0} ---- memoriza os pontos anteriores de vlei

VAR
paf
pel
pafc
pelc
ct ----variável de controle do tensão
ct_p ----valor anterior da variável de controle
tempo_f ----tempo para o chaveamento em zero de tensão
PER ----tempo de um ciclo de 60Hz
ponto ----variável auxiliar de controle para o calculo do Vrms na barra 2
Vrms ----tensão RMS na barra 2
Vrms1 ----variável auxiliar para calculo de tensão na barra 2
N ----numero de amostra em meio ciclo de 60Hz
ponto2 ----variável auxiliar de controle para o calculo do Vrms2
Vrms2 ----tensão RMS no secundário do autotrafo
N2 ----numero de amostra em meio ciclo de 60Hz
MODO ----modo de operação (0 - sem chaveamento e 1 - com chaveamento)
alfa ----angulo de disparo dos tiristores
beta ----angulo de extinção dos tiristores
alfat ----variável auxiliar que determina o tempo para disparo dos tiristores
betat ----variável auxiliar que determina o tempo para extinção dos tiristores
Vrms21 ----valor da diferença de tensão entre a Barra 1 e a Barra 2
V ---- valor absoluto de Vrms21
RVrms21 ----regulação de tensão entre a Barra 2 e a referencia

INIT
tempo_f:=0
PER:=(1/FREQ)
N:=((1/FREQ)/2)/timestep
N2:=((1/FREQ)/2)/timestep
ct:=0
ponto:=0
Vrms:=Vref

```

```

Vrms1:=0
ponto2:=0
Vrms2:=Vref
Vrms21:=0
MOD0:=0
alfa:=90
beta:=(180-alfa)
alfat:=((16.66667E-3)*alfa)/360
betat:=(8.333334E-3)-alfat
Vrms21:=0
V:=0
RVrms21:=0
ENDINIT

EXEC
---- Tensão RMS na Barra 1 para meio ciclo -> Vrms = sqrt((Sum (vponto^2)/N))---
IF ponto < N THEN
  Vrms1:=Vrms1+(vlei**2)
  ponto:=ponto+1
ELSE
  Vrms:=sqrt(Vrms1/(N)) ----Para passar o valor fase-fase (3xVrms1)
  ponto:=0
  Vrms1:=0
ENDIF
---- Tensão RMS na Barra 2 para meio ciclo -> Vrms = sqrt((Sum (vponto^2)/N))---
IF ponto2 < N2 THEN
  Vrms21:=Vrms21+(vlei2**2)
  ponto2:=ponto2+1
ELSE
  Vrms2:=sqrt(Vrms21/(N2)) ----Para passar o valor fase-fase (3xVrms1)
  ponto2:=0
  Vrms21:=0
ENDIF

----- Cálculo do zero de tensão para instante de chaveamento -----
IF vlei <= 0 THEN
  ct:=0
ELSE
  ct:=1
ENDIF
ct_p:=prevval(ct)
IF ct <> ct_p THEN ----Se ct for diferente de ct_p e porque passou pelo
ponto zero
  tempo_f:=(t+(PER/2)-timestep)
ENDIF

----Cálculo da diferença de tensão RMS entre a Barra 1 e a Barra 2 e o ânguloα --
Vrms21:=Vrms-Vref
V:=abs(Vrms21)
RVrms21:=(Vrms/Vref)*100

IF RVrms21 >= 99 AND RVrms21 <= 101 THEN
  MOD0:=0
ELSE
  MOD0:=1
ENDIF

IF MOD0 = 0 THEN
  alfa:=90
  beta:=(180-alfa)
  pafc:=1
  pelc:=1
  paf:=0
  pel:=0
ENDIF

IF MOD0 = 1 AND RVrms21 < 99 THEN
  IF t < 0.005 THEN
    alfa:=90
  ELSE
    alfa:=(-34E-12*(V**4))+(110E-9*(V**3))-(122E-6*(V**2))+(26E-3*V)+87.3
    beta:=(180-alfa)
    IF ct <> ct_p THEN
      alfat:=t+(((16.66667E-3)*alfa)/360)
      betat:=t+(((16.66667E-3)*beta)/360)
    
```

```

        ENDIF
    ENDIF
ENDIF

IF MODO = 1 AND RVRms21 > 101 THEN
    IF t < 0.005 THEN
        alfa:=90
    ELSE
        alfa:=(-36E-12*(v**4))+(124E-9*(v**3))-(140E-6*(v**2))+(27E-3*v)+87.3
        beta:=(180-alfa)
        IF ct <> ct_p THEN
            alfat:=t+(((16.66667E-3)*alfa)/360)
            betat:=t+(((16.66667E-3)*beta)/360)
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF

IF MODO = 1 AND RVRms21 > 101 THEN
    ----- Pulsos de saída no evento: Elevação -----
    pafc:=0
    IF t > alfat AND t < betat THEN
        pel:=1
        pelc:=0
    ELSE
        pel:=0
        pelc:=1
    ENDIF
ELSE
    pel:=0
ENDIF

IF MODO = 1 AND RVRms21 < 99 THEN
    ----- Pulsos de saída no evento: Afundamento -----
    pelc:=0
    IF t > alfat AND t < betat THEN
        paf:=1
        pafc:=0
    ELSE
        paf:=0
        pafc:=1
    ENDIF
ELSE
    paf:=0
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```