

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



REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA
DE *TAPS* – ANÁLISE DE OPERAÇÃO E PROTEÇÃO DAS
CHAVES ELETRÔNICAS

André Roger Rodrigues

Uberlândia
2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA
DE *TAPS* – ANÁLISE DE OPERAÇÃO E PROTEÇÃO DAS
CHAVES ESTÁTICAS

Dissertação apresentada por André Roger Rodrigues à
Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção
do título de Mestre em Ciências aprovada em 10/05/07
pela Banca Examinadora:

Geraldo Caixeta Guimarães PhD. – UFU

Hélder de Paula, Dr. – UFMG

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. (Orientador) – UFU

**REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA
DE TAPS – ANÁLISE DE OPERAÇÃO E PROTEÇÃO DAS
CHAVES ESTÁTICAS**

André Roger Rodrigues

Dissertação apresentada por André Roger Rodrigues à
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.
(Orientador) – UFU

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO À MINHA FAMÍLIA, AOS MEUS PAIS, JOSÉ DARC E MARILDA, E AOS MEUS IRMÃOS, SANDRO E SARAH, QUE SEMPRE SOUBERAM ENTENDER OS MOMENTOS DE AUSÊNCIA, ME INCENTIVANDO A TODO INSTANTE, A VENCER OS OBSTÁCULOS ENCONTRADOS PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, pela sua presença constante em minha vida, principalmente nos momentos mais difíceis. O SENHOR é o meu pastor.

Agradeço em especial aos meus avós: **Sebastião** e **Júlia**, por suas orações, por me ensinar a colocar DEUS à frente da minha vida, em todos os lugares onde eu colocar os meus pés.

Ao Prof. Dr. **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos constantes ao longo deste tempo, pelo apoio incondicional e busca permanente da produção do conhecimento humano. Agradeço ainda pelo crescimento profissional e pessoal a mim proporcionados que sem sombra de dúvida me acompanharão para o resto de minha vida.

A minha namorada: **Marilene**, por seu amor e pelo seu companheirismo, incentivando-me em todos os momentos com carinho e atenção. Obrigado por estar presente ao meu lado em todos os momentos.

Aos amigos: **Alexandre, Adeon, João Felício, Roger, Fernando, Juliano e Val**, pelo companheirismo e importante apoio que me deram durante todo este período.

À amiga **Elise** pela amizade sincera construída em todos estes dias de convivência, onde nos tornamos grandes amigos. Obrigado por sua participação incondicional em todos os momentos ajudando-me, e disponibilizando muito do seu tempo para contribuir com este trabalho.

À amiga **Jordana** pelo apoio, pela amizade, e por seu enorme companheirismo estando ao meu lado na construção deste trabalho.

Ao colega **Rubens Assunção** pelo suporte profissional oferecido nos trabalhos experimentais. Aos demais colegas e professores de pós-graduação, pelo incentivo e apoio que em muito contribuíram para a conclusão desta dissertação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

A operação interligada de grandes sistemas elétricos e o rápido crescimento do setor elétrico com a presença cada vez maior de cargas sensíveis aos distúrbios da tensão de fornecimento exigiram a adequação da legislação vigente às necessidades dos consumidores, por exemplo, de garantirem a manutenção de ní p

ABSTRACT

The interconnected operation of large electrical systems and the fast spreading of the electrical sector with an increasing presence of sensitive loads to supply voltage disturbances demanded that the current laws to adapt to consumer needs, for example, to ensure the maintenance of constant voltage levels throughout the feeders of the electrical power distribution grid. From this point of view, the voltage regulator has been one of the most used equipments so as to correct or restrict the short-term voltage variations in the distribution grids, whether rural or urban. This equipment, in its most traditional form, is made of an autotransformer with an automatic *tap* changer mechanism, which, because of its mechanic operation, is slow and incapable of responding dynamically to the short-term voltage variations on loads, which may cause damages to harms to both the of electrical power consumers, and the utility companies. On such account, this dissertation has the aim of developing a computational model of a control system, which is considered intelligent able to make electronic on-load *tap* commutation, limiting the amplitude and duration of load voltage variations to within the values allowed by the rules and regulations. To ensure the operational continuity of this type of regulator it was necessary to develop an analytical study of on electromagnetic transients that occur during commutations. By means of this study, a system to protect the semiconductor switches against overvoltages and short-circuit currents was implemented in the Alternative Transients Program software.

KEY WORDS - ATP, TACS, Voltage regulator, Electronic On-load *tap* changer, Intelligent commutation control system, Semiconductor switching protection system.

Lista de Figuras

2.1	Arranjo magnético do regulador de tensão Tipo A.....	018
2.2	Arranjo magnético de reguladores de tensão do Tipo B.....	019
2.3	Atuação do reator de comutação evitando a interrupção do circuito.....	019
2.4	Operação do reator conduzindo a corrente de carga apenas por uma extremidade.....	020
2.5	Circuitos:	
	(a) onde o reator está com os dois contatos no mesmo <i>tap</i> e, portanto, não há tensão aplicada no reator	021
	(b) onde o reator está com os dois contatos em <i>taps</i> diferentes e, portanto, há tensão aplicada no reator.....	021
2.6	Circuito com a bobina de equalização inserida junto ao reator.....	022
2.7	Ligação elétrica entre o reator de comutação e a bobina de equalização.....	022
2.8	Capacitâncias intrínsecas de um enrolamento.....	025
2.9	Representação das capacitâncias dos enrolamentos da bobina de <i>taps</i> e da bobina de excitação do RT.....	027
2.10	Representação das capacitâncias dos enrolamentos de um regulador de tensão..	028
2.11	Caso 1: Regulador de tensão com 6 degraus e reator de comutação.....	031
2.12	(a) - Regulador de tensão na posição 20% para elevação (<i>tap</i> 4E).....	033
	(b) - Regulador de tensão na posição 10% para redução (<i>tap</i> 2A).....	033
2.13	Seqüência operacional para a comutação de <i>taps</i>	034
2.14	Corrente transitória de energização de reatores.....	036
2.15	Corrente nas chaves no instante de comutação sem a presença da componente DC.....	037
2.16	Corrente nas chaves no instante de comutação com a máxima componente DC.	038
2.17	Bloqueio da corrente nas chaves no instante de comutação com componente DC.....	039
2.18	Curto circuito provocado pelo disparo da chave no semiciclo negativo da tensão.....	039
2.19	Corrente nas chaves durante o processo de comutação.....	041

2.20	Forma de onda da corrente de carga.....	041
2.21	Tensão na carga.....	042
2.22	Valor eficaz da tensão na carga.....	042
2.23	Esquema do regulador de tensão sem o reator de comutação.....	045
2.24	Forma de onda da tensão na carga	047
2.25	Valores eficazes da tensão na carga	048
2.26	Forma de onda da corrente na carga	048
2.27	Esquema elétrico do regulador de tensão com a bobina de excitação ligada à carga	050
2.28	Forma de onda da corrente na carga	051
2.29	Transitório de comutação na tensão da carga	051
2.30	Valores eficazes da tensão na carga	052
2.31	Oscilação transitória de tensão na carga	052
2.32	Forma de onda da corrente na carga	053
2.33	Valores eficazes da tensão na carga	053
2.34	Arranjo magnético adotado para o regulador de tensão	060
3.1	Digrama de blocos representando a lógica do controle eletrônico de comutação	067
3.2	Medição do valor RMS da tensão na carga	070
3.3	Variável Tipo 93: Condição de operação das chaves	075
3.4	Dispositivo tipo 61da TACS - Seletor de <i>taps</i> e Direcionador de pulso para o disparo das chaves.....	078
3.5	Dispositivo tipo 61da TACS - Direcionamento do pulso de controle para o disparo das chaves	079
3.6	Condições para iniciar a operação de comutação de <i>taps</i>	085
3.7	Regulador de tensão com 9 degraus com tensões induzidas específicas para cada <i>tap</i> e fatores de correção de <i>taps</i>	088
3.8	Lógica de seleção de <i>taps</i> no controle inteligente de comutação	089
4.1	Forma de onda da tensão na bobina de excitação do regulador.....	097
4.2	Forma de onda da tensão na carga	098
4.3	Oscilações transitórias na tensão da carga durante a comutação de <i>taps</i> :	
	(a) – Oscilações durante as duas primeiras comutações	099
	(b) – Zoom da primeira comutação de <i>taps</i>	099

4.4	Tensão eficaz na carga	099
4.5	Forma de onda da corrente na carga	100
4.6	Forma de onda da tensão na chave do <i>tap</i> 6E	101
4.7	Sobretensões transitórias na chave do <i>tap</i> 6E durante a comutação entre os <i>taps</i> 1A e 2A.....	102
4.8	Circuito oscilante formado no momento de interrupção da corrente de carga	103
4.9	Tensão na carga	105
4.10	Perfil da tensão eficaz na carga	106
4.11	Forma de onda da corrente na carga	107
4.12	Forma de onda da tensão na chave do <i>tap</i> 6E	107
4.13	Perfil da tensão eficaz na carga com a operação do controle inteligente de comutação	108
4.14	Forma de onda da tensão na chave do <i>tap</i> 6E	109
4.15	Correntes nas chaves	110
4.16	Conexão dos reguladores de tensão monofásicos em delta	112
4.17	Triângulo de regulação de tensão	112
4.18	Aplicação da lei dos cossenos ao triângulo de regulação	113
4.19	Forma de onda da tensão na entrada do regulador de tensão	116
4.20	Perfil da tensão na carga para o modelo de regulador trifásico	117
4.21	Oscilações de tensão na carga durante a comutação de <i>taps</i>	117
4.22	Perfil da tensão na carga para o modelo de regulador trifásico	118
5.1	Característica não linear do pára-raios ZnO	125
5.2	Curva típica de operação de um pára-raios ZnO	126
5.3	Variações de corrente e de tensão durante a operação de um pára-raios	127
5.4	Margens de proteção típicas para transformadores	128
5.5	Modelo de regulador de tensão com 9 degraus e pára-raios de proteção contra surtos de manobra	131
5.6	Corte de corrente indutiva	135
5.7	Sistema elétrico para estudos de proteção do regulador de tensão contra sobretensões originadas por manobra	137
5.8	Forma de onda da tensão na bobina de excitação	138
5.9	Forma de onda da tensão na carga	139
5.10	Zoom das sobretensões durante as duas primeiras comutações	139

5.11	Perfil da tensão eficaz na carga	140
5.12	Forma de onda da corrente na carga	140
5.13	Forma de onda da tensão do <i>tap</i> 6E com sobretensões transitórias	141
5.14	Zoom da tensão na chave do <i>tap</i> 6E durante a 1ª e 2ª comutações	141
5.15	Tensão na chave do <i>tap</i> 6E com pára-raios de 9 kV	142
5.16	Zoom da tensão na chave do <i>tap</i> 6E durante a 1ª e 2ª comutações com pára-raios de 9 kV	143
5.17	Corrente de descarga nominal do pára-raios de 9 kV	143
5.18	Formas de onda de corrente e tensão no pára-raios de 9 kV, durante a condução na primeira e segunda comutações	144
5.19	Energia dissipada no pára-raios com tensão nominal de 9kV	145
5.20	Sobretensões impostas à chave do <i>tap</i> 6E	
	(a) Formas de onda da tensão na chave do <i>tap</i> 6E	146
	(b) Zoom da tensão na chave do <i>tap</i> 6E durante a 1ª e a 2ª comutações	146
5.21	Corrente de descarga nominal dos pára-raios	147
5.22	Formas de onda da tensão e da corrente nos pára-raios durante a 1ª e 2ª comutações	148
5.23	Energia total dissipada nos pára-raios	148
5.24	Modelo de regulador de tensão com 9 degraus e pára-raios de proteção contra descargas atmosféricas	151
5.25	Forma de onda da tensão no pára-raios instalado na entrada do regulador	153
5.26	Tensão transitória nos terminais do pára-raios instalado na entrada do regulador	154
5.27	Corrente de descarga no pára-raios instalado na entrada do regulador	154
5.28	Quantidade de energia dissipada no pára-raios instalado na entrada do regulador	155
5.29	Forma de onda da tensão no pára-raios do sistema de distribuição	155
5.30	Tensão transitória nos terminais do pára-raios do sistema de distribuição	156
5.31	Corrente de descarga no pára-raios do sistema de distribuição	156
5.32	Dissipação energética no pára-raios do sistema de distribuição	157
5.33	Forma de onda da tensão imposta ao pára-raios de proteção das chaves	157
5.34	Zoom da tensão no pára-raios de proteção das chaves	158
5.35	Corrente de descarga no pára-raios de proteção das chaves	158

5.36	Corrente de descarga no pára-raios de proteção das chaves durante a descarga atmosférica	159
5.37	Dissipação energética no pára-raios de proteção das chaves	159
5.38	Solicitação de tensão imposta à chave do <i>tap</i> 2A	160
5.39	Zoom da tensão imposta à chave do <i>tap</i> 2A durante a descarga	161
5.40	Modelo de regulador de tensão com 9 degraus e sistema de proteção contra sobretensões originadas por manobra e por descargas atmosféricas	162
5.41	Tensão no pára-raios instalado no <i>tap</i>	

Lista de Tabelas

2.1	Estudos de casos simulados do regulador sem o controle de comutação.....	030
2.2	Dimensionamento dos <i>taps</i> para diferentes números de espiras.....	046
2.3	Tensão na carga em cada <i>tap</i>	046
3.1	Dimensionamento dos <i>taps</i> para diferentes números de espiras	087
3.2	Médias dos fatores de correção entre <i>taps</i> adjacentes	091
4.1	Casos de operação do regulador de tensão considerados neste capítulo.....	095
4.2	Estudos de casos simulados do regulador com o controle primário.....	098
5.1	Níveis de isolamento de reguladores de tensão	129
5.2	Especificação das características do pára raios - Bowthorpe EMP	133
5.3	Determinação das constantes características dos pára-raios	133
5.4	Resultados comparativos dos três tipos de pára-raios	150
5.5	Resultados da simulação computacional com o reator ligado na saída do RT...	174
5.6	Resultados da simulação computacional com o reator ligado na entrada do RT	175

Sumário

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	001
1.2. OBJETIVOS.....	003
1.3. ESTADO DA ARTE.....	004
1.4. ESTRATÉGIAS DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO E DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS	006
1.5. A ROTINA TACS DO PROGRAMA ATP	008
1.6. CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO.....	009
1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	010

CAPÍTULO II – ESTUDOS SOBRE O ARRANJO ELETROMAGNÉTICO DO REGULADOR DE TENSÃO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	014
2.2. DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA PARA A MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO	015
2.3. O MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO DE 9 DEGRAUS	017
2.4. IMPLEMENTAÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS DE FUGA DOS ENROLAMENTOS DO REGULADOR DE TENSÃO.....	023
2.5. TRANSITÓRIOS DE COMUTAÇÃO DE TAP’S NO REGULADOR DE TENSÃO.....	029
2.5.1. CASO 1: REGULADOR DE TENSÃO DE 6 DEGRAUS COM REATOR DE COMUTAÇÃO	030
(A) SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO CONECTADO A UMA CARGA DE 100 A E FATOR DE POTÊNCIA 0,8 INDUTIVO.....	040
2.5.2. CASO 2: REGULADOR DE TENSÃO COM 6 DEGRAUS SEM O REATOR DE COMUTAÇÃO E COM A BOBINA DE EXCITAÇÃO LIGADA À FONTE.....	044
(A) SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO CONECTADO A UMA CARGA DE 100 A E FATOR DE POTÊNCIA 0,8 INDUTIVO.....	047
2.5.3. CASO 3: REGULADOR DE TENSÃO COM 6 DEGRAUS SEM O REATOR DE COMUTAÇÃO E COM A BOBINA DE EXCITAÇÃO LIGADA À CARGA	049

(A) SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO CONECTADO A UMA CARGA DE 100 A E FATOR DE POTÊNCIA 0,8 INDUTIVO.....	049
2.6. ESCOLHA DO ARRANJO MAGNÉTICO DO REGULADOR	054
2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	057

CAPÍTULO III – CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO DE TAPS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	061
3.2. A METODOLOGIA DO CONTROLE PARA COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAP'S.....	063
3.3. DESCRIÇÃO DA LÓGICA DO CONTROLE DE COMUTAÇÃO DE TAP'S	065
3.4. ADAPTAÇÕES DO CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO.....	080
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	091

CAPÍTULO IV – SIMULAÇÕES DO REGULADOR DE TENSÃO COM SISTEMA DE CONTROLE PARA COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAPS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	093
4.2. SIMULAÇÕES DO REGULADOR COM CONTROLE DE COMUTAÇÃO.....	096
4.3. CASO 1: OPERAÇÃO DO REGULADOR COM CONTROLE PRIMÁRIO DE COMUTAÇÃO..	097
4.3.1. CASO 1.1: REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100 A REPRESENTADA POR UM ÚNICO RAMO RL SÉRIE, COM FATOR DE POTÊNCIA 0,707 ATRASADO.....	098
4.3.2. CASO 1.2: REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100 A E FP = 0,94 ATRASADO FORMADA PELA ASSOCIAÇÃO DE CINCO CARGAS EM PARALELO.....	104
4.4. CASO 2: OPERAÇÃO DO REGULADOR COM CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO.....	108
4.5. CASO 3: OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO TRIFÁSICO COM CONTROLE DE COMUTAÇÃO	111
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118

CAPÍTULO V – PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS CONTRA SOBRETENSÕES E CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	122
5.2. IMPLEMENTAÇÃO DO PÁRA-RAIOS NO MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO COM 9 DEGRAUS	124
5.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DE PÁRA-RAIOS.....	124
5.4. ESTUDO DE PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS CONTRA SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR MANOBRA.....	130
5.4.1. SELEÇÃO DO PÁRA-RAIOS PARA PROTEÇÃO DAS CHAVES CONTRA SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR MANOBRA	131
5.4.2. INFLUÊNCIA DA CAPACITÂNCIA DE FUGA DA BUCHA DA CARGA NA DISSIPACÃO DE ENERGIA NO PÁRA-RAIOS	134
5.5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES DE MANOBRA.....	135
5.5.1. CARACTERÍSTICAS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO.....	136
5.5.2. SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO COM REGULADOR OPERANDO SEM PÁRA-RAIOS.....	138
5.5.3. SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO COM REGULADOR UTILIZANDO UM PÁRA-RAIOS DE PROTEÇÃO	141
(A) REGULADOR DE TENSÃO OPERANDO COM UM PÁRA-RAIOS DE 9 kV.....	142
(B) REGULADOR DE TENSÃO OPERANDO COM UM PÁRA-RAIOS DE 10,5 E 12 kV.....	145
5.5.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES DEVIDO A COMUTAÇÃO DE TAPS	149
5.6. ESTUDO DE PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS CONTRAS SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	150
5.6.1. SIMULAÇÃO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA NO MEIO DA LINHA DE ALIMENTAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO.....	153
5.7. CONCLUSÕES SOBRE O ESTUDO DE PROTEÇÃO DAS CHAVES CONTRA SOBRETENSÕES.....	165

5.8. IMPLEMENTAÇÃO DE UM REATOR PARA LIMITAÇÃO DAS CORRENTES DE FALTA NO REGULADOR DE TENSÃO	167
5.8.1. ESTUDOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NA CARGA CONECTADA AO REGULADOR	168
5.8.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA CARGA.....	170
(A) OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100 A COM FALTA À TERRA, SEM A INSTALAÇÃO DO REATOR	170
(B) OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100 A, SUMETIDO A CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA. O REATOR ESTÁ LIGADO NA SAÍDA DO REGULADOR.....	172
(C) OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100 A, SUMETIDO A CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA. O REATOR ESTÁ LIGADO NA ENTRADA DO REGULADOR.....	174
5.8.3. ESTUDOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ENTRE TAPS DO REGULADOR	175
5.8.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO ENTRE TAPS.....	177
5.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	177

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	179
---	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	
---------------------------------	--

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As variações de tensão de curta duração figuram entre os distúrbios da qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores que são limitados por normas da legislação vigente do setor elétrico e que estão diretamente ligadas ao desvio da magnitude da tensão do seu valor nominal. As variações de tensão sofridas pelas cargas podem provocar o mau funcionamento e até mesmo a queima dos equipamentos elétricos de acordo com a sua sensibilidade à magnitude da tensão de suprimento. Estas podem causar também o desligamento de equipamentos elétricos comprometendo todo um processo industrial, acarretando prejuízos aos consumidores de energia elétrica. A sensibilidade dos equipamentos às variações de tensão diz respeito tanto à amplitude da variação da tensão quanto à sua duração.

Dentre os distúrbios da qualidade de energia, os afundamentos de tensão são considerados como os mais importantes e com efeito mais crítico. O “Information Technology Industry Council” (ITIC) publicou a curva ITIC, a qual contém a duração e os níveis de tensão aceitáveis dos distúrbios [21]. A curva ITIC e a sua predecessora, a curva CBEMA, são largamente consultadas como padrão de suportabilidade das cargas às variações de tensão.

O uso crescente de cargas sensíveis às variações do valor eficaz da tensão, sendo incorporadas aos sistemas elétricos, determinou a necessidade das concessionárias fornecerem uma energia elétrica com nível de tensão idealmente constante aos consumidores cada vez mais exigentes e amparados pelas leis que regulamentam a comercialização de energia.

Nesse contexto, os reguladores de tensão são os equipamentos largamente utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica e destinados à manutenção dos níveis de tensão em uma rede em conformidade com os limites especificados pela Resolução 505/2001 da ANEEL [2]. Este documento contempla as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.

Os modelos tradicionais de reguladores são dotados de comutadores automáticos, constituídos por sistemas mecânicos que permitem a operação sob carga quando da regulação de tensão em alimentadores de distribuição. Como o sistema de comutação mecânica de *taps* representa uma estratégia de comutação com eficiência limitada, a necessidade de limitação das variações de tensão nos sistemas elétricos exigiu a busca por aprimoramentos que proporcionem um aumento da eficiência deste equipamento, em particular no que tange ao tempo de resposta dos reguladores.

Nesse contexto, surge como tema principal e motivador desta dissertação o desenvolvimento de um sistema de controle no programa ATP que permita a realização da comutação eletrônica de *taps* do regulador de tensão com um tempo mínimo para comandar uma ação corretiva, aumentando a eficiência operacional do equipamento e garantindo um nível de tensão o mais constante possível ao longo das linhas de distribuição de energia elétrica.

A implementação de um sistema de controle para a comutação de *taps* sob carga exige ainda, um estudo aprofundado da operação em regime permanente e principalmente em regime transitório, sobre os níveis de tensão e corrente impostas às chaves estáticas, na tentativa de garantir a sua integridade e

confiabilidade operacional. Assim, uma vez realizado este estudo, propõe-se um sistema de proteção das chaves estáticas contra sobretensões e também contra correntes de falta.

1.2. OBJETIVOS

A principal finalidade desta dissertação é a implementação de um sistema de controle inteligente utilizando o programa ATP, capaz de realizar a comutação eletrônica de *taps* sob carga proporcionando a evolução do tradicional sistema mecânico de comutação de *taps* para um sistema de comutação moderno, eficiente e robusto, atendendo as necessidades dos consumidores e às exigências legais que recaem sobre as empresas distribuidoras de energia.

Assim, busca-se desenvolver um modelo computacional de regulador de tensão com comutação eletrônica de *taps* sob carga capaz de reproduzir com a maior fidelidade possível a operação de um regulador ligado ao sistema elétrico, tanto em regime permanente quanto em regime transitório, focando as sobretensões nas chaves estáticas originadas nos instantes de comutação.

A operacionalidade do sistema de comutação eletrônica de *taps* é garantida através de um sistema de proteção das chaves estáticas contra sobretensões, originadas tanto por surtos de manobra quanto por descargas atmosféricas. Este sistema de proteção provê ainda a garantia de integridade operacional das chaves em casos de ocorrência de um curto-circuito fase-terra na carga ou de um curto-circuito entre as chaves de dois *taps* devido ao mal funcionamento de uma das chaves.

O desenvolvimento deste modelo computacional de regulador de tensão constitui-se na construção de uma ferramenta capaz de prever o desempenho de reguladores de tensão instalados em diferentes pontos dos sistemas elétricos. Levando-se em conta as peculiaridades das grandezas elétricas em cada nó de uma rede elétrica, torna-se possível analisar o desempenho do regulador quanto à

limitação das variações de tensão impostas à carga e também da duração destes distúrbios, além de permitir uma análise da viabilidade, sob o aspecto técnico-financeiro, da instalação do equipamento.

1.3. ESTADO DA ARTE

O suporte científico para a realização deste trabalho de pesquisa consistiu de um extenso levantamento bibliográfico focado em dois temas principais:

- i.* Sistemas de controle para comutação eletrônica de *taps* sob carga em reguladores de tensão e;
- ii.* Estratégias de proteção de chaves estáticas contra sobretensões e correntes de curto-circuito originadas no sistema elétrico.

Um modelo computacional que representa os reguladores de tensão através de um circuito elétrico equivalente, derivado direto e unicamente do circuito magnético extraído do modelo físico do regulador, é desenvolvido e validado na referência [1]. Tal modelo tem como base a distribuição dos fluxos magnéticos no núcleo, considerando as diversas possibilidades de caminhos pelos quais estes podem percorrer. O fluxo magnético associado a tais caminhos dá origem ao chamado circuito magnético, formado por relutâncias lineares e não-lineares, associadas às fontes de forças magnetomotrizes produzidas pelos enrolamentos do regulador de tensão [8]. Dessa forma, pela aplicação do princípio da dualidade [6,7] nesse circuito magnético, obtém-se o circuito elétrico equivalente do regulador de tensão com as devidas correspondências entre os parâmetros magnéticos e elétricos. Esse modelo equivalente do regulador foi implementado no programa ATP de forma a permitir a realização de estudos tanto em regime permanente quanto em regime transitório [1].

Os reguladores de tensão com comutação de *taps* sob carga são uma parte essencial dos modernos sistemas de energia, uma vez que estes permitem a manutenção da tensão de alimentação das cargas dentro dos níveis desejados [2]. Embora o primeiro comutador de *taps* tenha sido desenvolvido no começo deste século, os comutadores modernos não sofreram muitas alterações radicais desde então, e, essencialmente, são ainda constituídos por dispositivos mecânicos complexos [18]. A comunidade científica il Tccioncias nã(itecom)TjI3.98 0 0 13.99 451.3

manutenção. Novos conceitos de comutadores de *taps* utilizando contatos imersos em óleo, chaves à vácuo e atuadores eletromecânicos são também citados neste trabalho. Destaca-se também no artigo as vantagens e possibilidades de utilização de chaves GTO modernas com capacidade de operação em altas potências.

Em [20] propõe um sistema de controle da comutação de *taps* em transformadores baseado na utilização de redes neurais artificiais para comandar a operação de transformadores em paralelo. Uma d0 13.98 322.26468 722a-206794

tensão seria o mais adequado para a implementação do controle de comutação. O modelo de regulador de tensão adotado neste estudo foi desenvolvido e validado conforme apresentado na referência [1].

Tal opção foi amparada por um estudo analítico dos resultados de simulações computacionais da operação em regime permanente e transitório dos modelos de reguladores mais comumente utilizados alimentando diferentes tipos de cargas.

Uma vez definido o tipo de arranjo magnético mais adequado para a modelagem do regulador de tensão, implementou-se, no programa ATP, um controle de comutação chamado “controle primário”, o qual apresenta algumas das principais características operacionais presentes na maioria das topologias de controle de comutação consultadas na pesquisa bibliográfica deste trabalho. Com a implementação deste controle primário de comutação, vários aperfeiçoamentos foram realizados na sua lógica, buscando o desenvolvimento de um controle considerado “inteligente” pelo fato de monitorar constantemente o valor eficaz da tensão na carga e aguardar o momento mais apropriado para iniciar a operação de comutação de *taps*, reduzindo os efeitos transitórios da comutação e realizando a regulação da tensão na carga, idealmente com uma única operação de comutação, ou com o menor número de acionamentos de *taps*, comparado ao controle primário.

Após a implementação do regulador de tensão com o sistema de controle inteligente, tornou-se necessário um estudo das sobretensões transitórias nas chaves estáticas, originadas tanto por manobra de comutação de *taps* quanto por descargas atmosféricas, com o objetivo de garantir que estes níveis de sobretensão não ultrapassem a suportabilidade das chaves, garantindo a confiabilidade operacional do regulador. A proteção das chaves estáticas é feita através da instalação de pára-raios no modelo de regulador de tensão. Além de prover proteção das chaves contra sobretensões faz-se também necessário um

estudo sobre os níveis de correntes que podem circular pelas chaves em situações de falta ou mau funcionamento de uma das chaves.

1.5. A ROTINA TACS DO PROGRAMA ATP

O ATP (*Alternative Transients Program*) é uma importante ferramenta computacional, que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitâncias de barras. A formulação matemática baseia-se no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes [5].

O programa permite a representação de dispositivos com parâmetros concentrados ou distribuídos e componentes não-lineares, tais como transformadores e reatores, sendo disponíveis diversas alternativas para esta finalidade [1].

A rotina TACS (*Transients Analysis of Control Systems*) permite a utilização de diversos dispositivos de processamento lógico e algébrico para representação de um sistema elétrico [4,3]. Utilizando esses dispositivos pode-se montar uma rede de processamento, através da qual os sinais lógicos são transportados entre os seus elementos, podendo ser aplicados aos nós de uma fonte de tensão ou corrente da rede elétrica, ou ainda ser utilizado para controlar a operação de chaves eletrônicas, por exemplo.

A filosofia de utilização da TACS segue a regra geral de que o circuito, cujo comportamento a ser simulado, deve, primeiramente, ser descrito como um diagrama de blocos, com interconexões de direcionamento dos sinais lógicos entre todos os blocos [4].

A interação entre o ATP e a TACS é feita através de amostras de sinal de tensão em um nó (variáveis tipo 90), corrente através de chaves (variáveis tipo 91), medição de grandezas em máquinas elétricas (variáveis tipo 92) e status de chaves (variáveis tipo 93). Dessa forma, é possível utilizar sinais de tensão e corrente do circuito elétrico representado no ATP e transferí-los como sinais de entrada para os blocos que formam o sistema de controle montado na TACS. O contrário também é verdadeiro, ou seja, é possível construir uma fonte de tensão ou corrente no ATP controlada por uma variável da TACS. A fonte controlada pela TACS deve ser definida no cartão de fontes do ATP como tipo 60 e ser nomeada com o mesmo nome da variável da TACS que controla a fonte.

A TACS possui um processamento independente do ATP [22]. Durante a simulação, a cada passo de integração, a determinação das variáveis de controle da TACS segue o cálculo das variáveis elétricas do ATP. Essa seqüência de operações determina um retardo de tempo de um passo de integração na obtenção das variáveis de saída da TACS que serão aplicadas à rede elétrica do ATP. Assim, as saídas da TACS que serão utilizadas no ATP no instante de tempo t , foram calculadas no instante de tempo $t - \Delta t$ [5]. Ou seja, o processamento das variáveis da TACS ocorre paralelamente ao processamento do ATP e com um retardo de tempo de um passo de integração.

1.6. CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento e implementação de um modelo computacional de regulador de tensão de 9 degraus com um controle inteligente capaz de executar a comutação eletrônica de *taps* sob carga.

Um sistema de proteção das chaves estáticas contra sobretensões e correntes de falta é também proposto nesta dissertação, com a finalidade de

garantir a operacionalidade das chaves estáticas em qualquer situação de operação do regulador de tensão.

Com esse modelo, torna-se possível realizar estudos computacionais do comportamento do equipamento em redes de distribuição, em regime transitório ou permanente. Através desses estudos implementam-se adaptações na lógica do controle de comutação através do ajuste de alguns parâmetros como o tempo de resposta do regulador à variação de tensão e o desvio de tensão admissível na carga, às características do sistema elétrico onde será instalado o regulador de tensão, garantindo que o equipamento opere com a condição de máxima eficiência.

1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos neste capítulo, este trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira:

Capítulo II - Estudos sobre o arranjo magnético do regulador de tensão

Para desenvolver um sistema de controle com capacidade para realizar a comutação eletrônica de *taps*, é primordialmente necessário utilizar um modelo computacional que represente de forma precisa, as características elétricas e magnéticas do regulador de tensão [7,8,9]. O modelo computacional do regulador adotado neste trabalho está descrito em detalhes na referência [1], apresentando a modelagem eletromagnética implementada no programa ATP, baseada na aplicação do princípio da dualidade. De posse desse modelo computacional, apresenta-se neste capítulo, os resultados de um estudo da

operação em regime permanente e, principalmente, em regime transitório, com tipos de arranjos magnéticos do regulador mais conhecidos, suprindo diferentes tipos de composições de cargas, com a finalidade de definir, entre tais modelos, qual é o mais adequado para a implementação do sistema de controle de comutação.

Capítulo III - Controle inteligente de comutação de taps

Após a definição, no capítulo anterior, do modelo eletromagnético de regulador de tensão mais adequado para implementar a comutação eletrônica de *taps*, desenvolve-se, no programa ATP, um sistema de controle da operação de comutação de *taps* bastante simples e de limitada eficiência, sendo por isso chamado de controle primário de comutação. A lógica operacional do controle primário contém algumas características identificadas nas principais topologias de sistemas de controle de comutação sob carga [14,16,17,18,19], pesquisadas para a realização deste trabalho. A partir da análise deste sistema de controle primário, realizam-se algumas adaptações e aprimoramentos na sua lógica operacional para o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente de comutação, capaz de reduzir o tempo de resposta do regulador às variações de tensão na carga e, ainda, realizar a mesma regulação de tensão na carga com uma única operação de comutação, ou com um menor número de comutações comparado à operação do regulador com o controle primário.

Capítulo IV - Simulações do regulador de tensão com sistema de controle para a comutação eletrônica de taps

No capítulo IV são apresentados os resultados da operação do regulador de tensão com o controle primário e com o controle inteligente de comutação, analisando-se o desempenho desses dois modelos considerando o tempo de resposta do controle frente ao comportamento dinâmico da tensão na carga e o número de operações de comutação necessárias para restabelecer a tensão na carga. Os resultados são utilizados para destacar os benefícios da operação do regulador com o controle inteligente de comutação de *taps* sob carga. Estuda-se também as sobretensões impostas às chaves estáticas, originadas nos instantes de comutação, para garantir a operação segura destes dispositivos. Resultados da simulação de um regulador trifásico com o controle inteligente de comutação são apresentados no final deste capítulo para confirmar a eficiência operacional desse sistema de controle.

Capítulo V - Proteção das chaves estáticas contra sobretensões e correntes de curto-circuito.

A continuidade e a confiabilidade operacional deste modelo de regulador de tensão é garantida através de um estudo de proteção das suas chaves contra sobretensões originadas por surtos de manobra (comutação entre *taps*) e também devido à ocorrência de descargas atmosféricas. Assim, propõe-se neste capítulo um sistema de proteção das chaves contra sobretensões utilizando pára-raios instalados junto ao regulador. Além de reduzir os níveis de tensão transitória nas

chaves, é necessário ainda limitar os níveis de corrente que circula pelas mesmas em caso de ocorrência de curto-circuito entre *taps*, através do barramento de chaves, e também devido a possíveis curtos-circuitos fase-terra na carga. Assim, um estudo dos níveis de sobrecorrentes de falta é desenvolvido e oferece suporte técnico para uma proposta de proteção das chaves utilizando um reator de limitação de correntes de curto-circuito.

Capítulo VI - Conclusões Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros

Finalmente, é apresentada neste capítulo uma discussão crítica dos principais resultados obtidos em cada um dos capítulos que compõem essa dissertação, ressaltando as contribuições científicas agregadas e indicações para continuidade de trabalhos futuros sobre o tema estudado.

ESTUDOS SOBRE O ARRANJO ELETROMAGNÉTICO DO REGULADOR DE TENSÃO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para implementar um sistema de controle de comutação de *taps*, é primordialmente necessário o desenvolvimento de um modelo computacional que represente com fidelidade os parâmetros elétricos e magnéticos do regulador de tensão. É também de vital importância que este modelo computacional seja capaz de reproduzir com pequena margem de erro, os fenômenos elétricos e magnéticos inerentes ao princípio de funcionamento do equipamento real. Neste capítulo, é apresentada a modelagem eletromagnética desenvolvida para um regulador de tensão convencional de 32 degraus com núcleo enrolado e envolvente, com a utilização do programa ATP e que será adotada nesta dissertação. A razão pela escolha desta modelagem justifica-se pelo fato de serem estes os reguladores de tensão mais utilizados nos sistemas de distribuição de energia e de se dispor dos dados construtivos fornecidos pelo fabricante [9].

A partir deste modelo é possível fazer a comparação dos diferentes tipos de arranjos magnéticos mais comumente utilizados e, através dos resultados de simulações computacionais, optar pelo modelo mais apropriado para a implementação do sistema de controle eletrônico de comutação.

A metodologia adotada para a modelagem do regulador de tensão está apresentada em detalhes na referência [1]. Partindo do modelo físico do

regulador determina-se o seu circuito magnético equivalente com base na distribuição dos fluxos magnéticos no núcleo. O circuito elétrico equivalente do regulador de tensão é obtido diretamente da resolução de equações matemáticas derivadas do circuito magnético. O modelo de regulador é completado com a inclusão das resistências dos enrolamentos. Outra vantagem desta modelagem adotada é que esta foi adequadamente desenvolvida para ser implementada no programa ATP. Como o programa ATP não trabalha com equações nem parâmetros magnéticos e sim com parâmetros elétricos, a utilização deste programa como plataforma computacional para a realização deste trabalho tornou-se possível somente com a aplicação do princípio da dualidade, princípio este que permite a obtenção de um circuito elétrico dual equivalente a partir de um circuito magnético fazendo as corretas correspondências entre parâmetros magnéticos e elétricos.

2.2. DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA PARA A MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO.

A escolha de uma modelagem apropriada para a implementação da lógica de controle baseou-se em extensa pesquisa bibliográfica nas referências citadas no texto. A característica fundamental que o modelo computacional do regulador deve ter é permitir que o estudo analítico dos transitórios de comutação de *taps*, através da análise dos resultados de simulações computacionais, ofereça suporte ao desenvolvimento de uma nova tecnologia de comutação automática de *taps*.

A base para a modelagem adotada é a distribuição de fluxos magnéticos no núcleo do regulador levando em consideração os possíveis caminhos pelos quais o fluxo magnético pode ser estabelecido.

O fluxo magnético associado a tais caminhos dá ori13.98 0 0 13.98 270.3803

associadas às fontes de forças magnetomotrizes (f.m.m.) produzidas pelos enrolamentos do regulador de tensão [8].

A estratégia da modelagem adotada consiste na obtenção do circuito elétrico equivalente do regulador de tensão através da transformação das relutâncias do circuito magnético em indutâncias e das fontes de f.m.m. em transformadores com relações de transformação apropriadas [6].

Para a obtenção do circuito magnético, os enrolamentos, nos quais circulam a corrente elétrica, são representados por sua força magnetomotriz (f.m.m.), e os caminhos magnéticos, por onde se estabelecem os fluxos magnéticos, estão representados por suas correspondentes relutâncias [1].

As relutâncias lineares são representativas do caminho pelo qual o fluxo magnético se estabelece através do ar existente entre: a bobina interna e a coluna do núcleo; entre as bobinas; e até mesmo pelo pequeno entreferro formado pela junção das chapas oriundas da montagem do núcleo [10]. O percurso do fluxo magnético estabelecido pelo material ferromagnético que constitui o núcleo do regulador é representado por relutâncias não-lineares. Tal material é geralmente do tipo aço-silício de grãos orientados e, usualmente, possui uma característica acentuadamente não-linear quando o fluxo supera o valor nominal [1].

O circuito elétrico equivalente precisa conter parâmetros elétricos que representem as perdas de potência elétrica que ocorrem no núcleo magnético, as chamadas perdas no ferro. Essas perdas são incluídas no circuito elétrico equivalente acrescentando-se resistências em

Um fenômeno característico dos materiais ferromagnéticos que, geralmente, constituem os núcleos de transformadores é o conhecido ciclo de histerese, o qual representa uma parte das perdas no ferro. A outra parte dessas perdas são oriundas das correntes parasitas ou correntes de “Foucault” que são minimizadas pela laminação do núcleo. Sabe-se que a partir de uma determinada intensidade de fluxo magnético (Ponto de Saturação), o ciclo de histerese se confunde com a curva de magnetização. Assim, para o objetivo proposto anteriormente, a curva de magnetização é suficiente para representar a não linearidade do circuito magnético, não sendo necessária a implementação do ciclo de histerese [1].

2.3. O MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO DE 9 DEGRAUS

O controle de comutação será implementado em um regulador de tensão com 9 degraus sendo 6 *taps* de elevação e 2 *taps* de redução. Embora a modelagem adotada tenha sido desenvolvida para um regulador de tensão com 32 degraus, nenhuma modificação na estratégia de modelagem é necessária para utilizá-la na representação do regulador de tensão com 9 degraus, além de reduzir o número de derivações na bobina de *taps*.

Os reguladores de tensão têm o princípio de funcionamento similar ao de um autotransformador com derivações, ou seja, além do acoplamento elétrico, existe também o acoplamento magnético entre os enrolamentos (bobina de *taps*, bobina de excitação e bobina de equalização). Segundo a referência [1], existem dois tipos de reguladores de tensão citados que constam nas normas atuais:

- **Tipo A** – chamado regulador com excitação variável porque a bobina de excitação sente qualquer variação que ocorra na tensão da fonte [13];
- **Tipo B** - chamado de regulador de excitação constante porque a bobina de excitação se localiza do lado da carga, não sentindo as variações de tensão da fonte [13].

As figuras 2.1 e 2.2 mostram o circuito elétrico equivalente dos reguladores de tensão dos tipos A e B, respectivamente. Essas figuras representam um caso geral onde a fonte de tensão alimenta o regulador e este tem como função manter o nível de tensão na carga o mais próximo o possível do seu valor nominal. Nestas figuras, os *taps* de elevação de tensão estão representados por 1E, 2E, 3E, 4E, 5E e 6E, enquanto que os *taps* de redução de tensão estão representados por 1A e 2A.

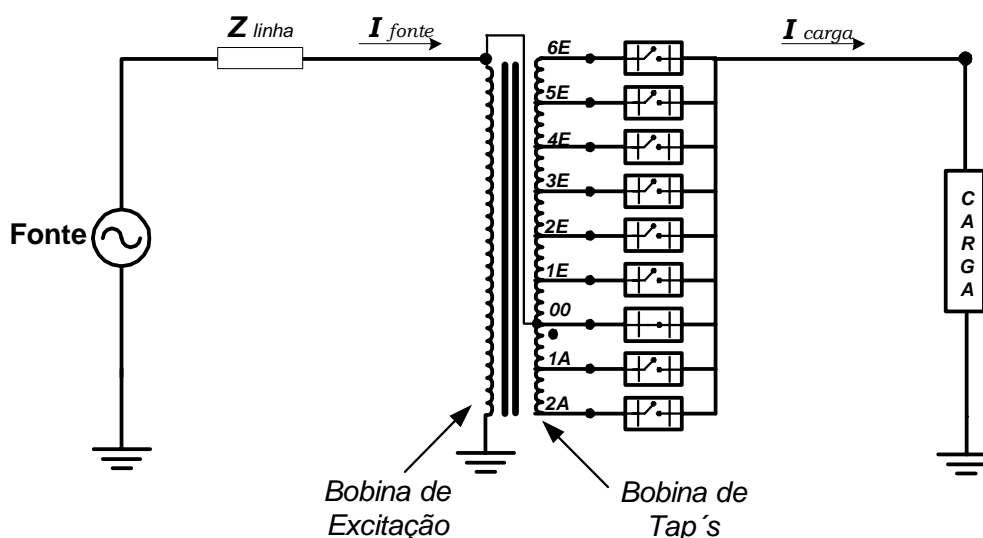


Figura 2.1: Arranjo magnético do regulador de tensão **Tipo A**.

Nos reguladores de tensão do tipo A, a variação do nível de tensão na fonte é diretamente percebida pela bobina de excitação. Por sua vez, a variação

do nível de tensão na bobina de excitação produz variação proporcional nos níveis de tensão de cada tap da bobina de *taps*.

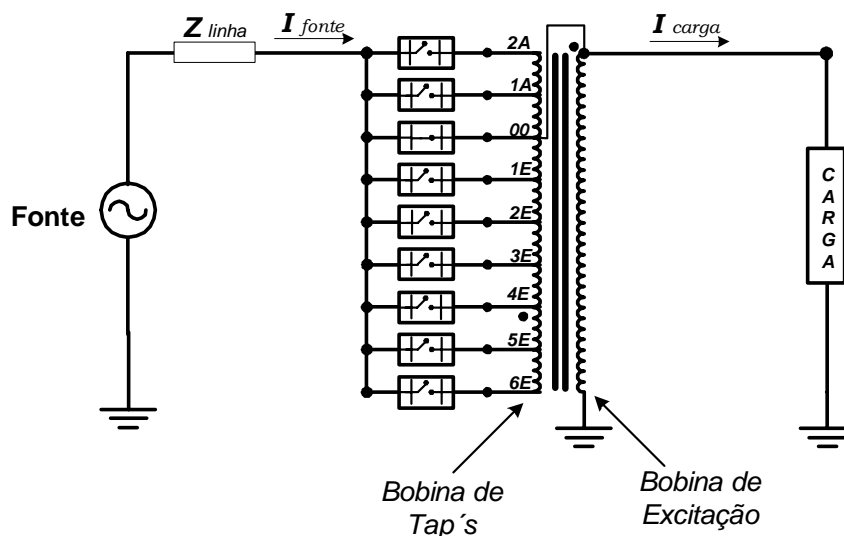


Figura 2.2: Arranjo magnético de reguladores de tensão do **Tipo B**.

Em ambos os tipos de reguladores, quando é necessário fazer uma comutação de *taps*, a corrente precisa ser interrompida até que o novo tap seja acionado. Com o intuito de impedir a interrupção de corrente na carga durante a operação de comutação de *taps* acrescenta-se aos modelos um reator de comutação, conforme mostrado na figura 2.3.

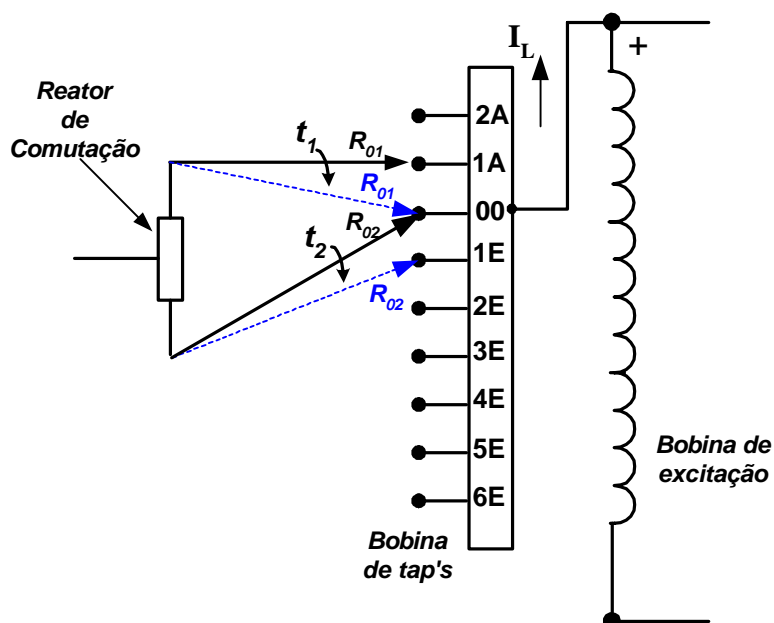


Figura 2.3: Atuação do reator de comutação evitando a interrupção do circuito.

As extremidades R_{01} e R_{02} do reator estarão sempre conectadas ao mesmo tap ou uma extremidade em um tap e a outra ligada ao tap imediatamente superior, ou inferior. Na figura 2.3, a extremidade R_{01} está inicialmente ligada ao tap 1A, enquanto que a extremidade R_{02} está ligada ao tap 00. No instante de tempo t_1 o terminal R_{01} é desconectado do tap 1A e conectado ao tap 00. Posteriormente, no instante de tempo t_2 o terminal R_{02} é desconectado do tap 00 e conectado ao tap 1E. A idéia é que durante uma operação de comutação, enquanto uma das extremidades do reator (por exemplo, R_{02}) é desconectada de um tap e direcionada para outro, a alimentação da carga (I_L) se faz através da outra extremidade do reator (extremidade R_{01}), como mostra a figura 2.4. Além disso, ao se aplicar uma tensão sobre os terminais do reator, uma corrente de circulação (I_c) é estabelecida [1] na malha elétrica formada pela porção do enrolamento de *taps* entre as duas extremidades do reator e pelo enrolamento do reator. Na figura 2.4, como a extremidade R_{02} está desconectada, a corrente de circulação é nula. Porém, no momento em que cada uma das extremidades do reator estiverem ligadas a diferentes *taps*, haverá uma corrente de circulação.

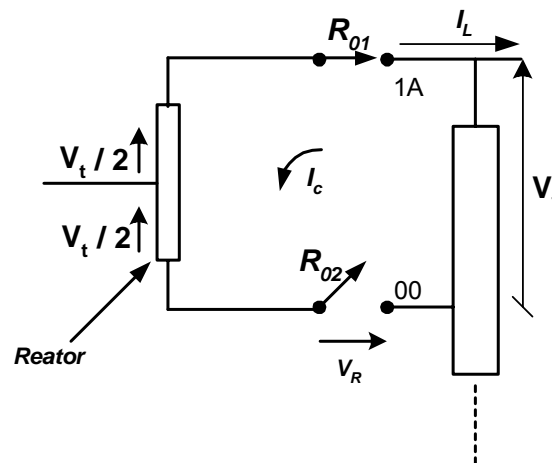


Figura 2.4: Operação do reator conduzindo a corrente de carga apenas por uma extremidade.

Sob este ponto de vista, duas situações de operação do regulador com o reator de comutação devem ser analisadas: sem a presença da corrente de circulação e com a corrente de circulação. A figura 2.5 apresenta as duas

condições mencionadas. Nessa figura, a letra (A) representa uma porção do enrolamento da bobina de *taps*. A alternância da corrente de circulação de zero a um determinado valor, comumente 50% da corrente de carga (I_L), causaria um elevado desgaste nos contatos do reator R_{01} e R_{02} , devido à sobretensão originada pela taxa de variação de corrente $\left(L \frac{di}{dt}\right)$.

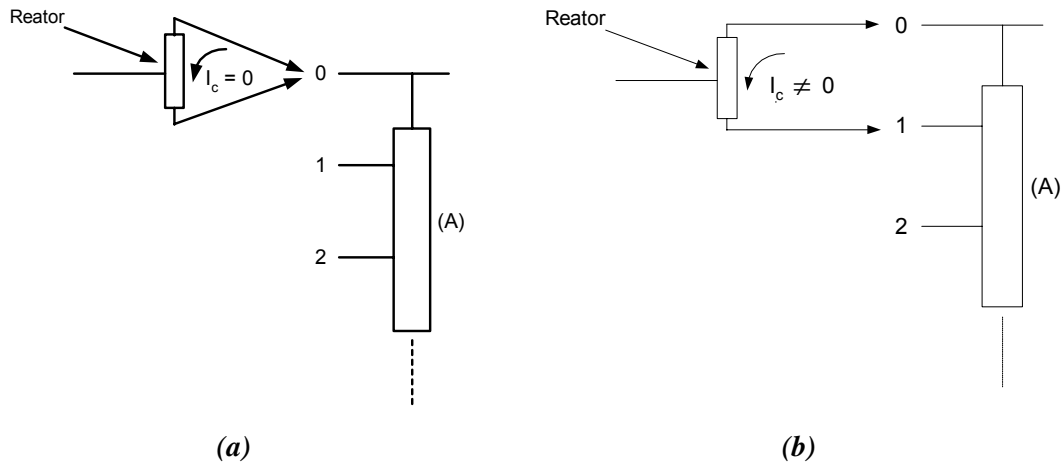


Figura 2.5: Circuitos: (a) onde o reator está com os dois contatos no mesmo tap e, portanto, não há tensão aplicada no reator e (b) onde o reator está com os dois contatos em tap's diferentes e, portanto, há tensão aplicada no reator.

Assim, nos modelos convencionais de reguladores, é instalada em conjunto com o reator de comutação, uma bobina de equalização. A principal razão do uso da bobina de equalização é reduzir os valores de tensão impostas aos enrolamentos do reator de comutação, uma vez que a bobina de equalização limita a corrente de circulação devido a sua reatância. Na figura 2.6 é apresentado um esquema onde a bobina de equalização já está inserida.

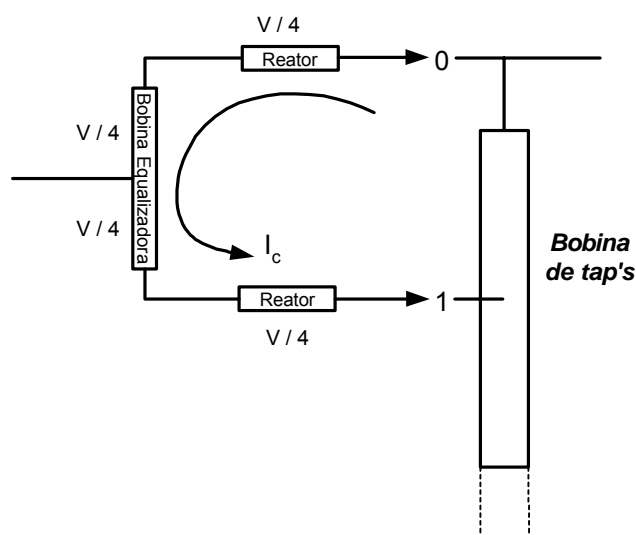


Figura 2.6: Circuito com a bobina de equalização inserida junto ao reator.

Com a bobina de equalização o valor da corrente de circulação no reator será constante independente da posição do comutador sendo que, no caso dos dois contatos estarem em um mesmo tap, a corrente de circulação muda o sentido, mas se mantém em módulo.

A figura 2.7 mostra o circuito elétrico que representa a correta ligação elétrica entre a bobina de equalização e o reator de comutação.

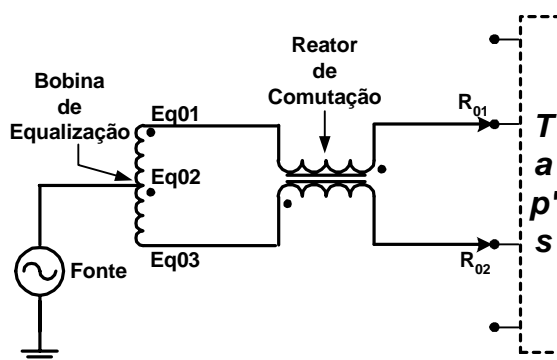


Figura 2.7: Ligação elétrica entre o reator de comutação e a bobina de equalização.

Com a colocação da bobina de equalização o arranjo eletromagnético do modelo convencional de regulador de tensão está completo. Observa-se que a inclusão da bobina de equalização neste arranjo justifica-se somente no caso de comutação seqüencial de *taps*, da forma como é tradicionalmente feita, ou seja, a regulação de tensão na carga é feita através do acionamento de um tap

adjacente após o outro, até que a tensão na carga seja regulada. É desejável que o novo sistema de controle de comutação de *taps* a ser estudado neste trabalho seja capaz de executar a comutação de forma imediata e não sequencial. Por exemplo, se o regulador estiver em um tap extremo para elevar a tensão (6E), e, em um dado momento, necessitar de comutar para o outro tap extremo para abaixar tensão (2A), essa comutação deverá ser feita de forma imediata, sem ter que passar pelos *taps* intermediários entre eles. A meta estipulada é que o tempo total de comutação seja de no máximo 3 ciclos, ou seja, aproximadamente 50 ms para a frequência fundamental.

A bobina de equalização e o reator de comutação são projetados de acordo com a tensão do enrolamento de *taps*. Para possibilitar o tipo de operação do controle de comutação da forma descrita anteriormente, tanto o dimensionamento da bobina de equalização como do reator de comutação deverão ser majorados em função da tensão entre os terminais de *taps* comutados, uma vez que a tensão entre os terminais de *taps* é variável de acordo com os *taps* que estiverem energizados. Para este tipo de operação, a bobina de equalização deve possuir uma potência aparente com tal magnitude que inviabilizaria sua utilização, devido ao seu alto custo de fabricação. Sendo assim, é necessário que a comutação de *taps* seja feita de forma abrupta, sem percorrer *taps* intermediários e, por conseguinte, a bobina de equalização pode ser dispensada na comutação não-sequencial proposta neste novo estudo.

2.4. IMPLEMENTAÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS DE FUGA DOS ENROLAMENTOS DO REGULADOR DE TENSÃO

Para que o arranjo magnético proposto seja capaz de representar com maior exatidão o funcionamento do regulador de tensão, tanto em regime permanente quanto em regime transitório, deve-se incorporar ao estudo realizado o efeito das capacitâncias de fuga das buchas e dos enrolamentos do

regulador. Levando-se em consideração a inclusão destas capacitâncias no modelo eletromagnético proposto, pode-se fazer uma análise bastante realista do comportamento transitório do equipamento em momentos de comutação, o que é de extrema importância para o desenvolvimento do controle inteligente de comutação, que será apresentado no capítulo III e também para o estudo de proteção das chaves estáticas contra sobretensões transitórias que será desenvolvido no capítulo V.

O transitório eletromagnético que ocorre nos enrolamentos de um regulador de tensão nos instantes de comutação de *taps* origina bruscas variações de tensão responsáveis por possíveis sobretensões ou sobrecorrentes transitórias, sendo um assunto que requer maiores preocupações. A investigação de tais transitórios inicia-se pela modelagem adequada de cada enrolamento. Neste sentido, esta seção tem por objetivo apresentar a representação das capacitâncias intrínsecas de cada bobina na modelagem dos enrolamentos de um regulador de tensão, seja ela em relação à terra, ou entre espiras. Essa representação é feita de forma a buscar a situação que se apresenta mais crítica com respeito aos transitórios de comutação de *taps*.

É sabido que toda bobina possui capacitâncias distribuídas ao longo de suas espiras que se apresentam como capacitâncias de fuga tanto para a terra (núcleo ou tanque do regulador) como também entre espiras, quer seja em um mesmo enrolamento ou entre enrolamentos diferentes.

A figura 2.8 a seguir mostra um enrolamento no qual se apresentam as capacitâncias de fuga. Nessa figura as capacitâncias são representadas por elementos concentrados para cada espira.

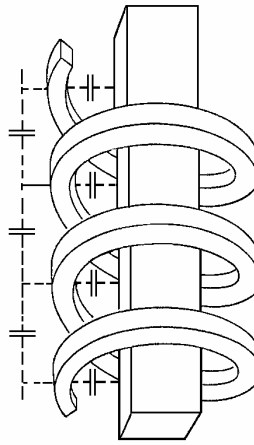


Figura 2.8: Capacitâncias intrínsecas de um enrolamento.

Em um capacitor, a sua capacitância depende da área de suas placas, da distância entre as mesmas e da permissividade dielétrica do material que as separam. Por isto, deve-se esperar, para os enrolamentos de uma mesma classe de tensão, que aqueles com a maior capacidade de transporte de corrente devam possuir capacitâncias intrínsecas mais elevadas, visto que suas espiras são formadas por condutores de maior bitola. Por outro lado, se os enrolamentos possuem a mesma capacidade de corrente, aqueles de maior classe de tensão deverão possuir capacitâncias intrínsecas de valores mais baixos, visto que as distâncias entre as espiras e entre a espira e o núcleo são maiores. Em adição às capacitâncias de fuga dos enrolamentos tem-se também a capacitância de fuga das buchas nas quais estes estão conectados. A questão então passa a ser: como determinar corretamente essas capacitâncias e como representá-las adequadamente em um modelo matemático? Esse é um assunto que tem preocupado muito os engenheiros e fabricantes de transformadores por vários anos, sendo que a experiência prática tem mostrado que a utilização de valores típicos para cada classe de equipamento tem apresentado resultados satisfatórios nas simulações computacionais.

Na referência [23] é apresentada uma metodologia para a medição da capacitância de fuga para a terra em enrolamentos de transformadores, considerando as seguintes aproximações simplificadoras: o enrolamento é

perfeitamente uniforme e ignoram-se as capacitâncias séries. Essa metodologia é baseada na frequência de ressonância do circuito formado pela bobina em questão, as suas capacitâncias de fuga para terra e um capacitor utilizado como referência. Várias medições foram efetuadas para diversos transformadores classe 15 kV, com diferentes classes de potência. Os resultados são apresentados em forma de gráficos, a partir dos quais pode-se estabelecer a capacitância para a terra típica de enrolamentos de transformadores na sua devida classe de potência. Analisando tais resultados, pode-se verificar que a capacitância medida para um transformador com ligação ΔY de 1.000 kVA está em torno de 7.000 pF. Essa mesma referência mostra que a capacitância para a terra é igual a três vezes o valor medido, ou seja, 21.000 pF. Essa capacitância deve ser distribuída ao longo do enrolamento, mas, quando isso não é possível, é comum fazer a distribuição da mesma entre seus terminais, ou seja, 50% para cada terminal. A esse valor deve ser adicionada a capacitância da bucha terminal, se for o caso. As capacitâncias de fuga das buchas são também apresentadas, nessa mesma referência, em forma de uma tabela, e para buchas de transformadores classe 15 kV com capacidades de corrente até 600 A, a capacitância de fuga para a terra está compreendida entre 160 a 180 pF.

Nesse trabalho, o objetivo maior é estudar os transitórios devido à comutação de *taps* do regulador de tensão, e, conseqüentemente, toda a atenção deverá estar voltada ao sistema de comutação de *taps* e o seu respectivo enrolamento. Assim sendo, representar-se-á a capacitância de fuga desse enrolamento distribuída em todos os terminais de *taps*. Para o enrolamento de excitação, visto que o mesmo possui somente dois terminais, representa-se somente a capacitância de fuga para a terra associada à capacitância da bucha terminal, sendo desconsiderado a capacitância entre espiras.

A figura 2.9 mostra a configuração dos enrolamentos do regulador de tensão com a representação de suas capacitâncias intrínsecas da forma como será utilizada nas simulações de transitórios de comutação de *taps*. Nessa figura,

a capacitância $C1$ representa a metade da capacitância para a terra relativa a um tap, ou seja, a capacitância do enrolamento de *taps* dividida por duas vezes o número de *taps*; $C2$ representa a capacitância entre espiras vista pelos terminais de cada tap; $C3$ representa a metade da capacitância para a terra do enrolamento de excitação mais a capacitância da bucha terminal.

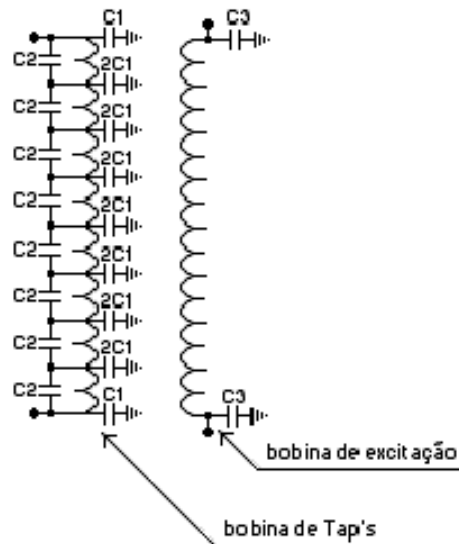


Figura 2.9: Representação das capacitâncias dos enrolamentos da bobina de taps e da bobina de excitação.

De acordo com o que foi relatado anteriormente, assumindo para o enrolamento de excitação o valor típico de 21.000 pF para a capacitância de fuga para a terra e 180 pF para cada bucha terminal, tem-se que o valor de $C3$ será: 10.680 pF. O enrolamento de *taps* possui características peculiares que o diferenciam dos enrolamentos comuns de transformadores e as que mais contribuem para modificar o valor de sua capacitância para a terra são:

- i - as suas espiras são enroladas sobre o enrolamento de excitação;
- ii - possui um número de espiras muito menor;
- iii - tem maior capacidade de transporte de corrente.

As duas primeiras características atuam no sentido de reduzir a sua capacitância de fuga para a terra quando comparada com a do enrolamento de

excitação, por outro lado, a terceira atua no sentido de aumentar esse valor, principalmente, se este enrolamento for feito com chapas de cobre como no caso do modelo convencional. Tendo-se em vista as dificuldades de ordem instrumental para se fazer as medidas das capacitâncias de terra e entre espiras do enrolamento de *taps*, adotou-se o seguinte posicionamento: a capacitância de terra típica de enrolamentos de transformadores (21.000 pF) será considerada a mesma para o enrolamento de *taps*; a capacitância série será considerada com o mesmo valor da capacitância de terra de cada seção de tap ($C2 = 2C1$). Com isto, tem-se o valor de 21.000 pF para a capacitância de terra do enrolamento de *taps*, a partir do qual serão calculados os demais valores. Ou seja, considerando, um regulador de tensão de nove degraus, com o enrolamento de *taps* dividido em oito seções (2 abaixar e 6 elevar), nove terminais, o valor de $C1$ será 1.167 pF e $C2$ será 2.340 pF. É possível que os reais valores para o enrolamento de *taps* sejam inferiores a esses, entretanto, valores mais elevados deverão contribuir para acentuar os fenômenos transitórios visto que eles armazenam maiores quantidades de energia. A figura 2.10 mostra o esquema do regulador de tensão, sem o reator de comutação e com a bobina de excitação do lado da carga, no qual estão incluídas as capacitâncias de fuga.

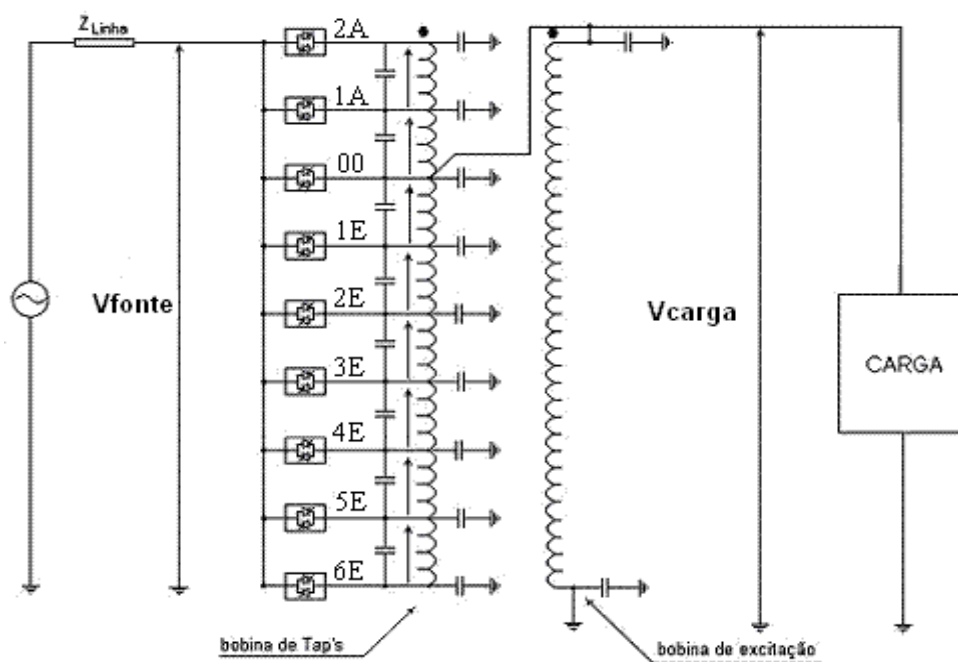


Figura 2.10: Representação das capacitâncias dos enrolamentos de um regulador de tensão

As capacitâncias adicionadas ao circuito elétrico do regulador de tensão, conforme mostra a figura 2.10, serão consideradas em todos os estudos realizados. Entretanto, para simplificar, tais capacitâncias serão omitidas nos diagramas elétricos do regulador.

2.5. TRANSITÓRIOS DE COMUTAÇÃO DE TAP'S NO REGULADOR DE TENSÃO

A operação de comutação de *taps* origina transitórios eletromagnéticos nos enrolamentos do regulador de tensão e nas chaves estáticas ligadas aos *taps*. A operação durante os períodos transitórios pode submeter as chaves estáticas a sobretensões capazes de danificá-las, comprometendo a continuidade de operação do regulador de tensão. O desenvolvimento de um controle de comutação capaz de comandar o chaveamento de *taps* somente sob condições ideais, que reduzam ou eliminem os efeitos indesejáveis dos transitórios, somente se torna possível através de uma análise detalhada da natureza destes transitórios de comutação, suas amplitudes e durações, para que então seja definida uma lógica de comutação que garanta a integridade operacional do equipamento.

Com o intuito de escolher o arranjo magnético mais adequado para a implementação do controle automático de comutação, procede-se uma etapa de estudos de chaveamentos através da análise de três casos de simulações do regulador de tensão, com os instantes de comutação das chaves definidos por observação de resultados simulados passo a passo, ou seja, comutação por tempo definido. Estes casos estão sucintamente descritos na tabela 2.1 a seguir.

Nos três casos simulados, utilizou-se um regulador de tensão de 6 degraus com tensão nominal de 13,8 kV, sendo 2 degraus de redução de tensão e 4 para

elevação de tensão, alimentando uma carga de 100 A com fator de potência 0,8 indutivo.

Tabela 2.1: Estudos de casos simulados do regulador sem o controle de comutação.

CASOS SIMULADOS	DESCRIÇÃO
CASO 1	Regulador de tensão de 6 degraus com o reator de comutação.
CASO 2	Regulador de tensão de 6 degraus sem o reator de comutação e com a bobina de excitação ligada à fonte.
CASO 3	Regulador de tensão de 6 degraus sem o reator de comutação e com a bobina de excitação ligada à carga.

2.5.1. CASO 1: REGULADOR DE TENSÃO DE 6 DEGRAUS COM REATOR DE COMUTAÇÃO

O modelo de regulador de tensão simulado com o reator de comutação possui as seguintes características:

- A corrente de circulação no reator é de 25A (0,25 pu), quando o mesmo está conectado entre os tap's extremos.
- Número de chaves: 14 - (duas chaves conduzindo ao mesmo tempo);
- Bobina de Excitação: considerada semelhante à do regulador convencional 13.800 V; 1.280 espiras;
- Bobina de *Taps*: composta por 6 derivações formadas por 64 espiras com tensão de 690 V cada uma, representando uma tensão total de 4.140 V (30% de capacidade de regulação) em 384 espiras (6 x 64 espiras);

Uma consideração importante deve ser feita a respeito do reator de comutação: a potência em regime permanente é praticamente desprezível, devido ao acoplamento magnético entre os enrolamentos do reator. Porém, no

momento da comutação a potência do reator de comutação pode atingir 103,5 kVA (4.140 V x 25 A), se a comutação for feita do tap 2A para o tap 4E.

A figura 2.11 abaixo mostra o esquema elétrico de ligação do regulador de tensão para o caso simulado.

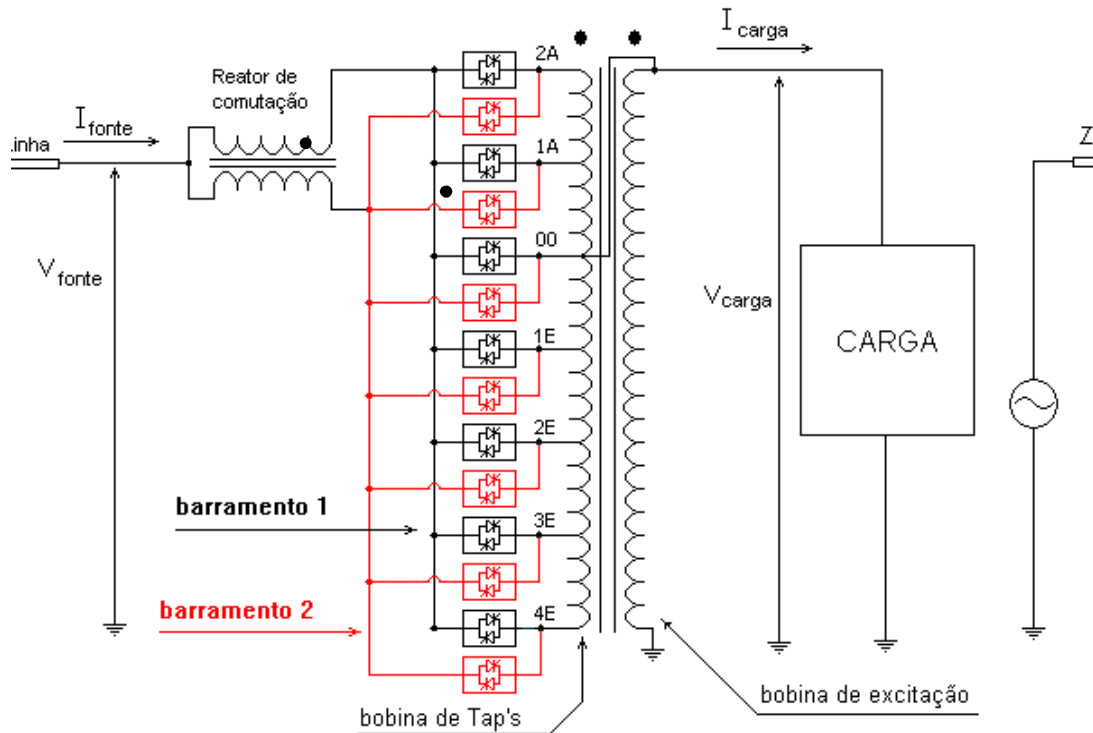
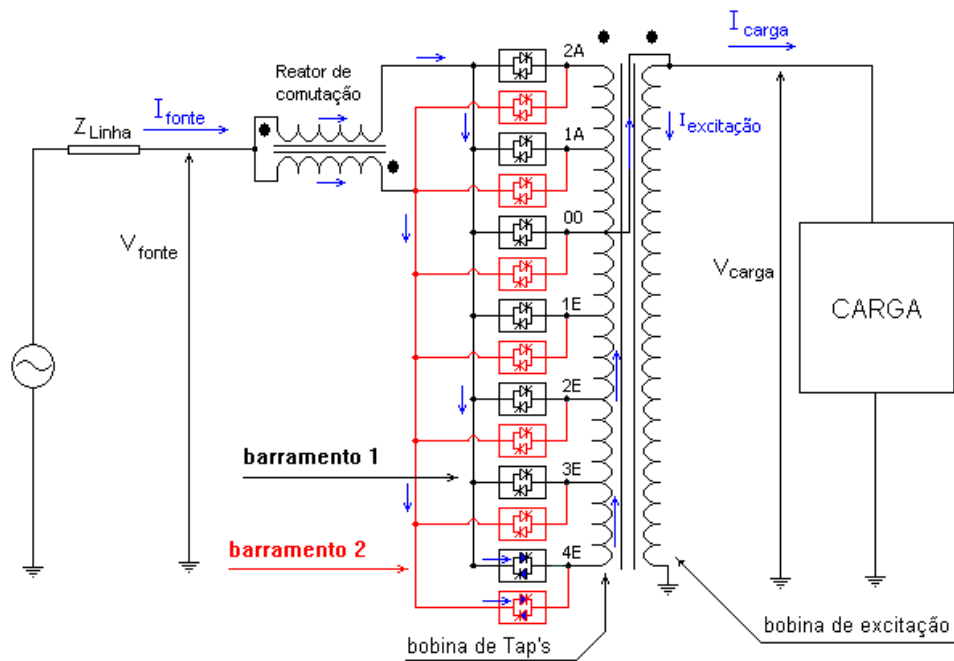


Figura 2.11: Caso 1: Regulador de tensão com 6 degraus e reator de comutação.

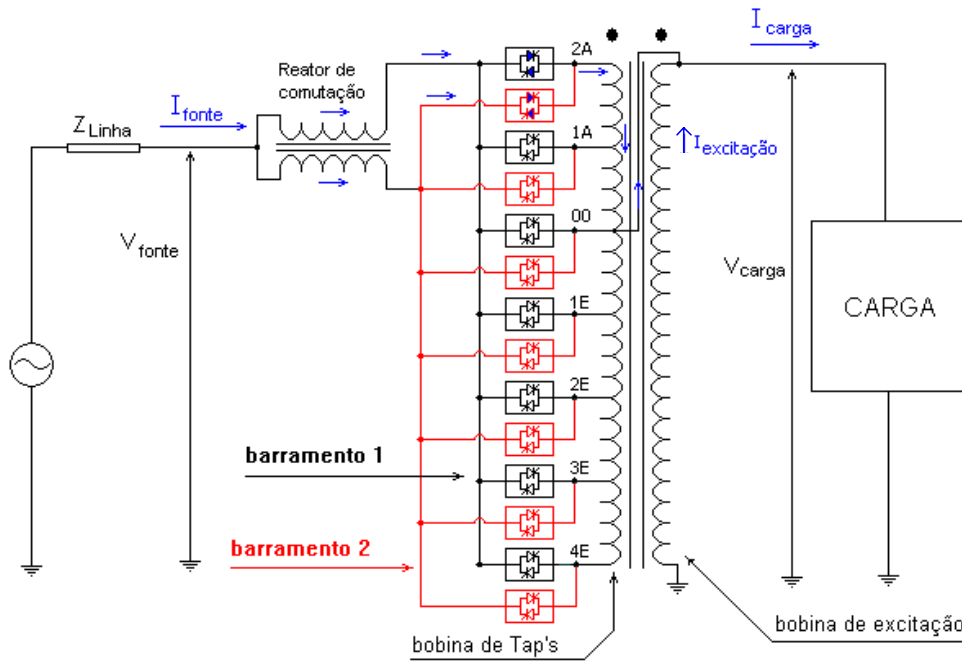
É notório, por simples observação da figura acima, que, para a instalação do reator de comutação no regulador de tensão, são necessários dois barramentos de chaves, pois a corrente da fonte se divide no reator de maneira que cada ramo conduza uma parcela desta corrente. A energização de um tap é completada quando uma chave de cada barramento estiver conduzindo para o tap, ao mesmo tempo.

O modelo de regulador utilizado na simulação computacional possui chaves com operação de abertura e fechamento comandadas em tempos definidos, sendo que as chaves estáticas com operação comandada por pulso de controle ainda não foram implementadas da maneira como mostra a figura 2.11. O motivo pelo qual foram representadas as chaves estáticas no lugar das chaves

com tempo definido é demonstrar que os resultados das simulações computacionais empregando as chaves com tempo definido serão utilizados para estimar, por exemplo, os níveis de sobretensão a que as chaves estáticas estarão igualmente sujeitas. Os casos 2 e 3 também representam as chaves estáticas nos diagramas elétricos mas utilizam, neste capítulo, chaves com tempo definido para as simulações computacionais. As chaves com operação comandada por tempo definido disponíveis no programa ATP somente são abertas nos instantes de passagem da corrente pelo zero, e fechadas nos instantes de passagem da



(a)



(b)

Figura 2.12: (a) - Regulador de tensão na posição 20% para elevação (tap 4E).
 (b) - Regulador de tensão na posição 10% para redução (tap 2A).

O processo de comutação de tap's para este modelo é semelhante ao convencional e a figura 2.13 mostra a seqüência de operação para realizar a comutação do tap 2A para o tap 4E. A descrição da comutação do tap 2A para o 4E é a operação de comutação mais genérica uma vez que seu entendimento exemplifica todas as outras comutações possíveis.

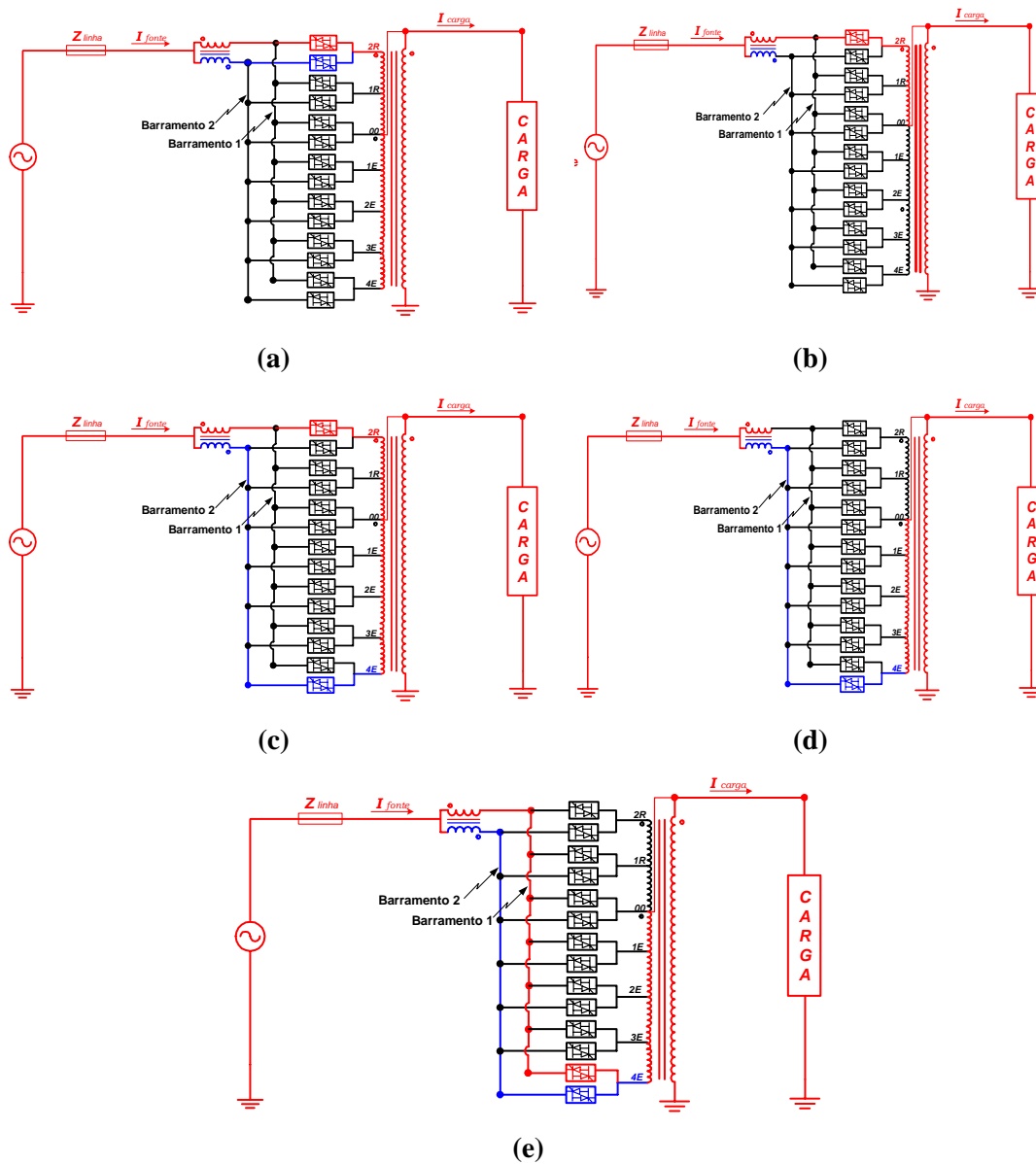


Figura 2.13: Seqüência operacional para a comutação de *taps*.

A seqüência para a comutação do tap 2A para o tap 4E segue os seguintes passos:

- 1) As chaves dos barramentos 1 e 2 que conectam esses barramentos ao tap 2A estão conduzindo - figura 2.13(a) ;
- 2) A chave do barramento 2 , posição 2A, é aberta e entra em condição de bloqueio – figura 2.13(b);
- 3) CoTTT0 1 Tf0.00211 28a2 313.98 54117 Tm(2))Tj399da-0 1 Tf0.00211 28a2

5) Comanda-se o fechamento da chave do barramento 1, posição 4E - figura 2.13(e), completando a comutação.

É importante lembrar que para a comutação ser efetuada rapidamente, é preciso que as condições de bloqueio das referidas chaves sejam atingidas brevemente.

Além da seqüência de comandos das chaves, a figura 2.13 mostra o caminho percorrido pela corrente no enrolamento de tap's nas diferentes condições apresentadas, ou seja, a parte em vermelho do enrolamento de tap's é o caminho de circulação da corrente.

No instante da comutação, o fechamento do circuito formado pelo reator de comutação, pelo enrolamento de *taps* e pelas chaves, pode dar origem a uma componente de corrente contínua (DC) na corrente de circulação (I_c) nas chaves em condução, cuja amplitude depende do valor instantâneo da tensão no momento de fechamento do circuito.

Essa componente contínua na corrente de circulação pode ser expressa pelas equações (2.3) e (2.4) que representam a corrente transitória de energização de reatores:

$$i(t) = \frac{Vm}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) - \text{sen}(\theta - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (2.3)$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad e \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (2.4)$$

onde:

- φ é o ângulo do fator de potência da carga ;
- τ é o constante de tempo transitória do circuito;
- θ é o ângulo da tensão associado ao instante do fechamento da chave.

Graficamente a equação (2.3) é representada pela figura 2.14. Nesta figura a componente contínua tem amplitude negativa sendo esta dependente do instante de fechamento das chaves.

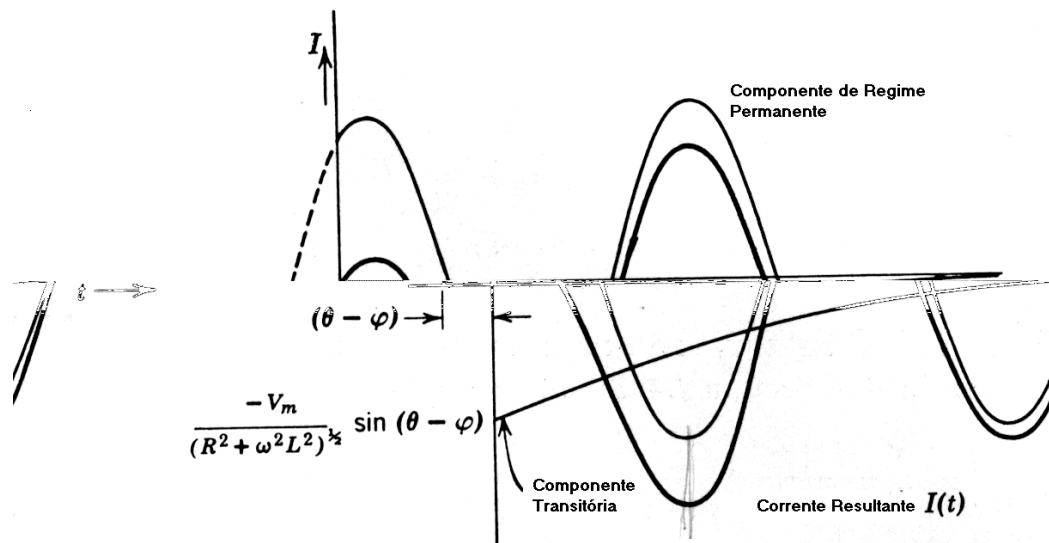


Figura 2.14: Corrente transitória de energização de reatores.

Portanto, para este modelo de regulador de tensão, deve-se sempre comandar o fechamento das chaves num instante próximo à passagem da tensão da carga pelo seu valor de pico, o que resulta num menor valor de componente DC nas correntes de circulação das chaves.

Caso o fechamento ocorra em outros instantes que não sejam os correspondentes ao valor de pico da tensão na carga, a corrente de circulação adicionada à corrente de carga, que deverá circular pela próxima chave a ser desligada, poderá não passar por zero periodicamente devido à componente DC. Este fato não permitirá a abertura da chave até que a componente DC decaia a valores bem baixos e a corrente na mesma se anule, o que poderá levar vários ciclos. Se for feito o comando de fechamento da próxima chave antes que a anterior entre em condição de bloqueio, pode-se estabelecer um curto-circuito entre o barramento dessas chaves e o enrolamento dos tap's em comutação. Sobre este aspecto, observando-se a necessidade de minimizar o tempo de comutação e ainda evitar a possibilidade de curto-circuito, deve-se estabelecer

como via de regra que, após a abertura de uma chave, a próxima chave somente será fechada quando a tensão na carga estiver passando pelo seu valor de pico.

A seguir são apresentadas duas figuras que mostram as duas situações de corrente nas chaves, uma sem a componente DC na corrente da chave e outra com a presença da componente DC.

A figura 2.15 mostra as correntes nas chaves durante a comutação do

O procedimento de comutação pode ser finalizado comandando a abertura da chave (R01 – 1TAP2A) e, após o bloqueio desta, assim que a tensão na carga passar pelo seu valor de pico, deve-se comandar o fechamento da chave (R01– 1TAP4E).

Na figura 2.16 apresenta-se um chaveamento, no qual procura-se obter o maior valor de componente DC, para enfatizar a impossibilidade de se fazer o bloqueio da chave por não haver inversão de sentido na corrente. Pela figura verifica-se que iniciado o processo de comutação em $t = 0,05$ s, somente será possível a chave R01-1TAP2A entrar em condição de bloqueio em tempos superiores a 0,250 s, a não ser que se utilize uma outra estratégia, que consiste em fazer o bloqueio da chave por tensão reversa.

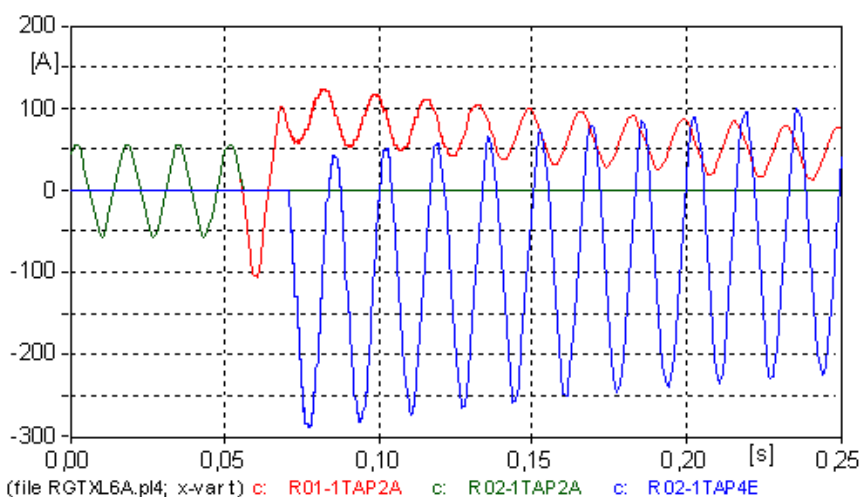


Figura 2.16: Corrente nas chaves no instante de comutação com a máxima componente DC

Pode-se verificar que, no caso de a chave R01-1TAP4E ser colocada em condução no instante correspondente ao semiciclo positivo da tensão na bobina de *taps* (ou tensão na carga), é possível utilizar a própria tensão da bobina de *taps* como tensão reversa para fazer o bloqueio da chave R01-1TAP2A, obrigando a inversão de corrente na mesma. Nesse caso, a componente DC não inviabiliza o processo de comutação. A figura 2.17 mostra a condição de bloqueio da chave R01-1TAP2A pela tensão reversa. Observa-se nessa figura o nível DC nas correntes das chaves, após ter-se completado a comutação de *tap*'s.

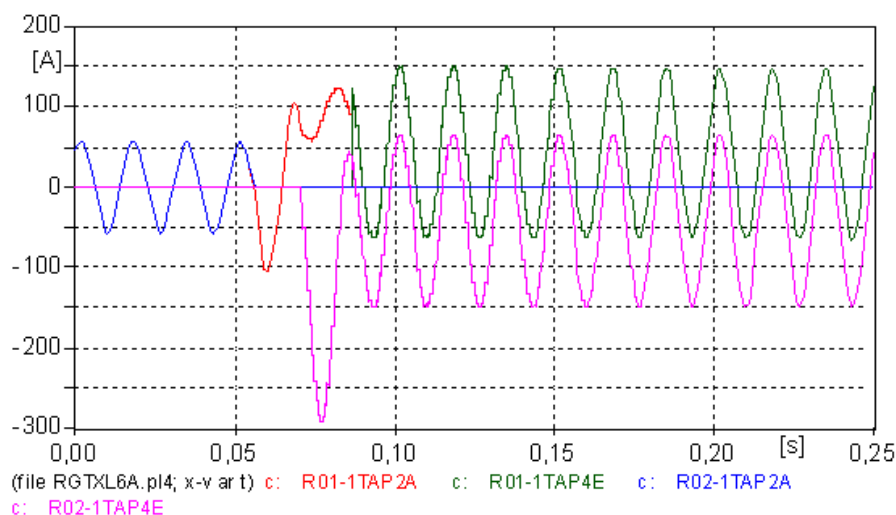


Figura 2.17: Bloqueio da corrente nas chaves no instante de comutação com componente DC

Porém, se o instante em que a chave R01-1TAP4E for colocada em condução corresponder ao semiciclo negativo, ter-se-á um curto-circuito entre o barramento, as duas chaves e o enrolamento de *taps*. A figura 2.18 mostra essa situação.

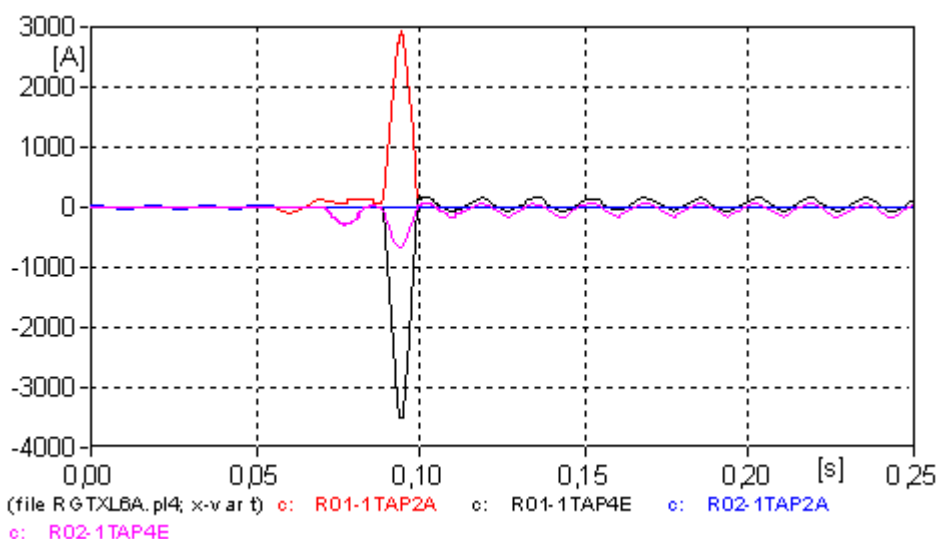


Figura 2.18: Curto-circuito provocado pelo disparo da chave no semiciclo negativo da tensão.

Analisando a corrente de carga, observa-se que a componente DC fica restrita ao circuito de comutação.

Levando em consideração os fatos descritos acima, os tempos de comutação de tap's nas simulações realizadas com este modelo de regulador de tensão foram determinados da seguinte maneira:

- i. A partir do comando de abertura da chave, esta ocorre somente na próxima passagem da corrente pelo valor nulo;
- ii. O fechamento da chave subsequente deverá ocorrer sempre no instante em que a tensão na carga atingir o valor máximo, impondo a ocorrência de um menor nível DC nas correntes das chaves em condução.

Os tempos para abertura e fechamento das chaves são definidos como instantes ótimos para a realização da comutação de *taps*, sendo dependentes da amplitude e do fator de potência da corrente de carga e, ainda, do instante no qual se inicia o processo de comutação.

(A) - SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO CONECTADO A UMA CARGA DE 100 A E FATOR DE POTÊNCIA 0,8 INDUTIVO

Para analisar os transitórios ocorridos durante a operação de comutação, realizou-se a simulação computacional do regulador de tensão com reator de comutação alimentando uma carga de 100 A e fator de potência 0,8 indutivo. Os tempos de comutação (abertura e fechamento das chaves) foram determinados através de simulações passo a passo de acordo com a condição de não ocorrência de componente DC na corrente de circulação.

A simulação deste caso procedeu da seguinte forma: no instante de tempo correspondente a 50 ms, é comandada a abertura da chave do barramento 2 (R02-1TAP2A). Após o seu bloqueio, aguarda-se o instante em que a tensão na carga atinge o valor de crista, para, só então, comandar o fechamento da chave R02-TAP4E. Imediatamente após o fechamento dessa chave, comanda-se a abertura da chave R01-1TAP2A, que entrará na condição de bloqueio quando a corrente na mesma passar pelo valor nulo. Em seguida, quando a tensão da carga passar pelo seu valor de crista, a chave R01-1TAP 4E entra em condução. A

figura 2.19 mostra a forma de onda da corrente nas chaves. Inicialmente, as correntes nas duas chaves são idênticas (R01-1TAP2A em vermelho e R02-1TAP2A em azul). Em $t = 50$ ms, a corrente representada em azul é interrompida após a abertura da chave R02-1TAP2A, ficando a chave R01-1TAP2A responsável pela condução da corrente de carga. Quando a chave R02-TAP4E representada na cor rosa é fechada, a corrente passa por um transitório e aumenta sua amplitude devido ao aparecimento da corrente de circulação do reator que é de 25A neste caso. Finalmente a chave R01-1TAP2A é aberta na passagem da corrente pelo zero e a chave R01-1TAP4E somente é fechada no instante de pico de tensão na carga.

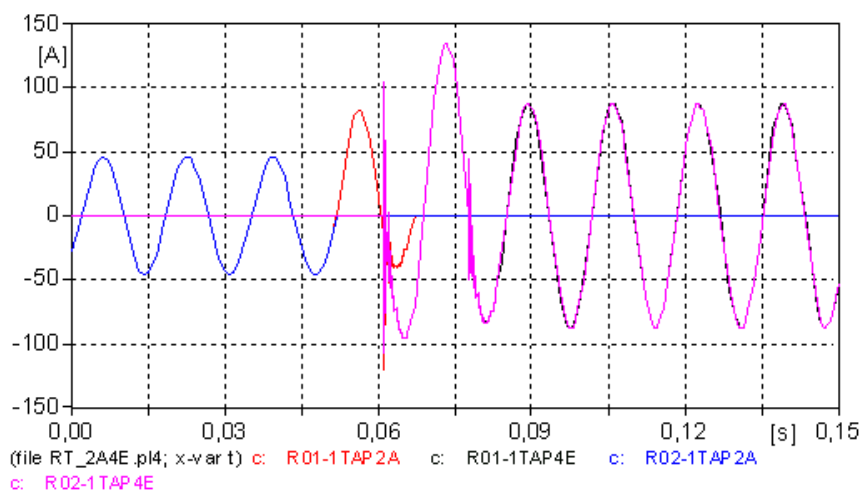


Figura 2.19: Corrente nas chaves durante o processo de comutação.

A forma de onda da corrente de carga é mostrada na figura 2.20.

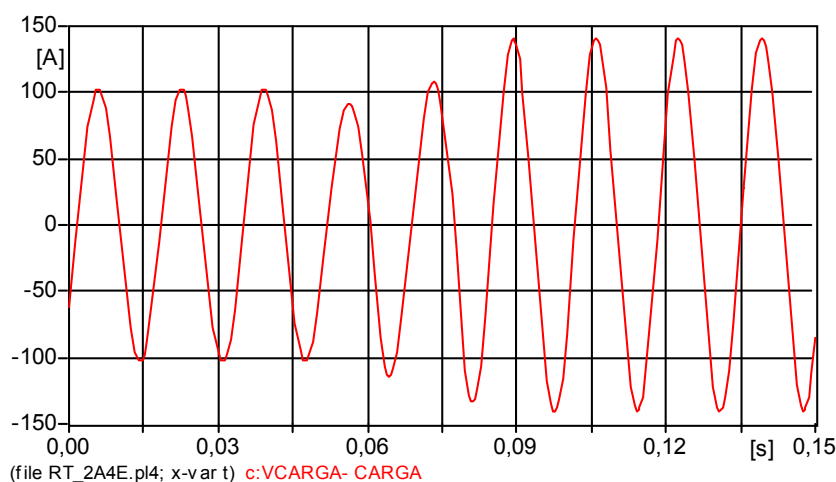


Figura 2.20: Forma de onda da corrente de carga.

A forma de onda da tensão na carga é mostrada na figura 2.21. A forma de onda da tensão não sofre alterações consideráveis durante a comutação de *taps*.

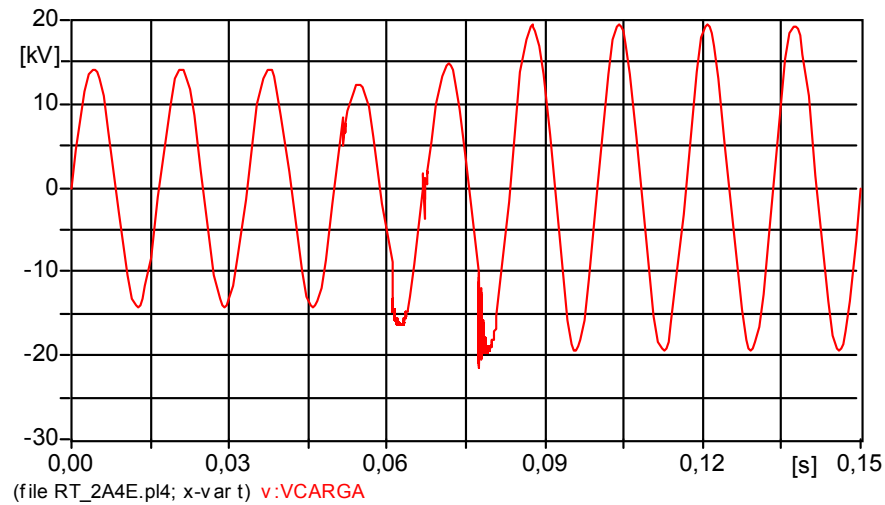


Figura 2.21: Tensão na carga.

Na figura 2.22 é mostrado o valor eficaz da tensão, o qual é calculado de duas maneiras distintas: em uma delas, plotada em vermelho, o valor eficaz é calculado a cada meio ciclo e mantido constante durante o meio ciclo seguinte; na outra, em verde, o valor eficaz é calculado de forma contínua empregando o ciclo imediatamente anterior.

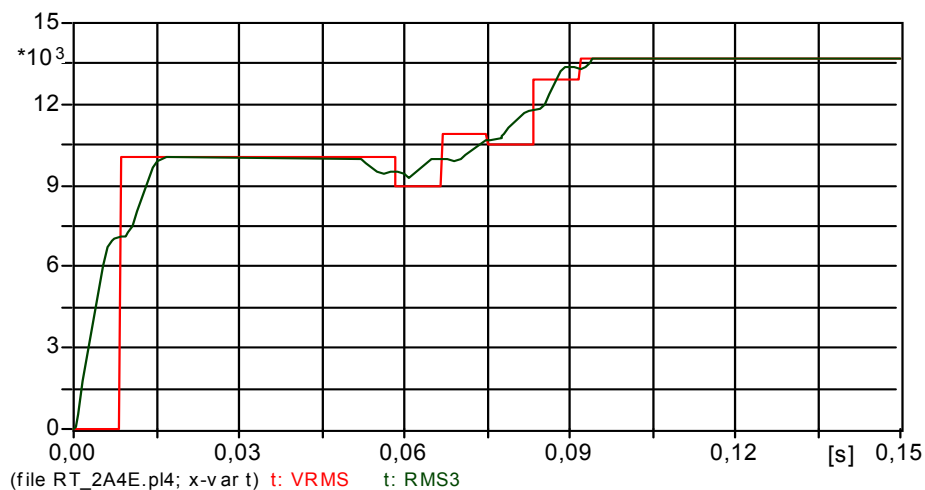


Figura 2.22: Valor eficaz da tensão na carga.

Observando os resultados alcançados, os seguintes comentários são pertinentes:

- O tempo total de comutação fica em torno de 2,0 ciclos sem contar o tempo necessário para o sistema de controle tomar a decisão e definir para qual tap deve-se fazer a comutação;
- É possível reduzir o tempo de comutação se o controle permitir nível DC no circuito de comutação e utilizar a tensão dos tap's para fazer o bloqueio, mas isto pode ser aleatório dependendo do instante inicial;
- Observa-se que quanto menor for a corrente de circulação, menor será a componente DC máxima que poderá surgir no instante de comutação e, conseqüentemente, a sua composição com a corrente de carga é menos expressiva. Entretanto, uma menor corrente de circulação no reator, no momento da comutação, significa maior queda de tensão nesse momento.
- Cada carga, com o seu respectivo fator de potência, definirá instantes ótimos para a comutação. Entretanto, no intervalo de tempo menor que 3,0 ciclos, é possível estabelecer uma seqüência fixa de chaveamentos admitindo níveis de corrente contínua (DC) parciais, para determinados valores de carga. Nesse caso, a definição da amplitude da corrente no circuito de comutação é fundamental;
- Os instantes ótimos para a comutação das chaves são dependentes da amplitude e fator de potência da corrente de carga, entretanto, essa dependência não é tão rigorosa que possa tornar o processo inexequível;
- Se acontecer de uma chave de um mesmo barramento ser disparada enquanto outra estiver em condução, poderá ocorrer um curto circuito;
- A corrente na carga não apresenta transitórios de chaveamento, sendo apenas amplificada em função da elevação de tensão;
- As oscilações na forma de onda da tensão na carga, devido à comutação de *taps*, são pequenas e rapidamente amortecidas, não apresentando nenhum risco para a carga.

- Em vista desses resultados, é mais seguro adotar o seguinte procedimento para efetuar a comutação de *taps* para este modelo de regulador:
 - i - comandar o bloqueio da chave em condução do barramento 2 para iniciar o processo de comutação;
 - ii - certificar que essa chave entrou em condição de bloqueio;
 - iii - comandar a condução da chave relativa ao tap desejado desse mesmo barramento quando a tensão nos enrolamentos de *taps* passar pelo seu valor de crista - condição para obter componente DC nula;
 - iv - repetir o procedimento para as chaves do barramento 1.

Agindo dessa forma, é muito provável que o tempo de comutação fique em torno de 3,0 ciclos, no máximo.

2.5.2. CASO 2: REGULADOR DE TENSÃO COM 6 DEGRAUS SEM O REATOR DE COMUTAÇÃO E COM A BOBINA DE EXCITAÇÃO LIGADA À FONTE

As características deste modelo de regulador de tensão sem o reator de comutação são:

- Número de degraus igual a 6 (4 para elevação e 2 para redução);
- Número de chaves estáticas: 7 (apenas uma conduzindo de cada vez);
- Bobina de Excitação considerada semelhante à do regulador convencional 13.800 V; 1.280 espiras;

Neste arranjo, a bobina de excitação é submetida diretamente à tensão da fonte, que pode variar entre +10% e -20% da tensão na carga, e, conseqüentemente, a tensão induzida em cada tap também terá uma variação na mesma proporção. Para uma tensão de 13.800 V na bobina de excitação, tem-se

na bobina de *taps* uma tensão total de 4.140 V, com derivações a cada 690 V (6 x 690 V) - 384 espiras (6 x 64 espiras). Quando houver, por exemplo, uma redução de 20% na tensão da fonte a compensação do regulador não será total, pois cada tap será também reduzido na mesma proporção, ou seja, ter-se-á a seguinte situação:

- Tensão da fonte → 11.040 V ;
- Tensão na carga → 13.248 V, ou seja, (11.040 + 4 x 552);

É importante observar que a bobina de excitação poderá ser submetida a uma tensão de 15.180 V e a mesma não deverá atingir condições indesejáveis de saturação.

A figura 2.23 apresenta o esquema com a configuração do regulador de tensão sem o reator de comutação.

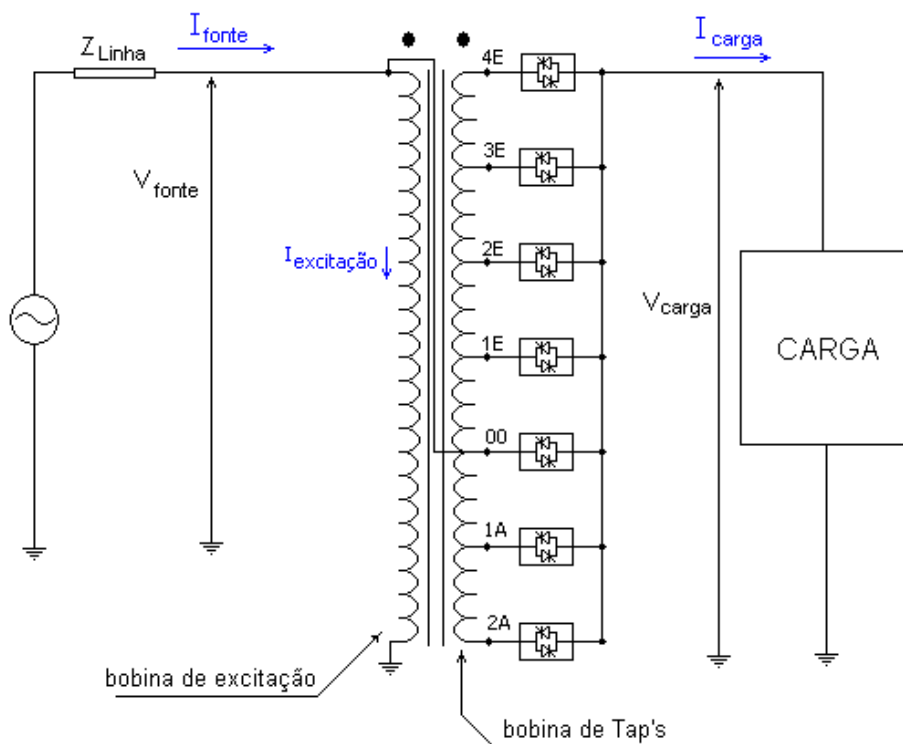


Figura 2.23: Esquema do regulador de tensão sem o reator de comutação.

Se for desejável que a compensação do regulador seja total em qualquer situação (-10% e +20%), pode-se calcular os números de espiras específicos para cada tap de forma a atender a essa necessidade. Para essa situação

apresenta-se na tabela 2.2 uma sugestão elaborada considerando a bobina de excitação com 1.280 espiras e fazendo-se os arredondamentos convenientes nos números de espiras de cada tap.

Tabela 2.2: Dimensionamento dos tap's para diferentes números de espiras

ENROLAMENTO DE TAP'S		
BOBINA	NÚMERO DE ESPIRAS	TENSÃO (V)
2A – 1A	55	593
1A - 00	61	657
00 – 1E	67	723
1E – 2E	75	809
2E – 3E	84	906
3E – 4E	94	1.013
TOTAL	436	4.701

Utilizando-se tal procedimento, a tabela 2.3 mostra a característica de operação do regulador de tensão nos seus diversos *taps*.

Tabela 2.3: Tensão na carga em cada tap

TENSÃO NA BOBINA DE EXCITAÇÃO (V)	CHAVE QUE ESTÁ CONDUZINDO	TENSÃO NA CARGA (V)
15.180	2A	13.805
14.490	1A	13.800
13.800	00	13800
13.110	1E	13.797
12.420	2E	13.799
11.730	3E	13.802
11.040	4E	13.801

A seguir apresenta-se a simulação computacional da operação de comutação extrema entre os *taps* 2A e 4E do regulador com a bobina de excitação ligada à fonte. O regulador de tensão alimenta uma carga nominal de 100 A com fator de potência 0,8 indutivo, com as mesmas características elétricas consideradas no CASO 1, para fins de comparação entre os resultados analisados nos dois casos.

(A) - SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO CONECTADO A UMA CARGA DE 100 A E FATOR DE POTÊNCIA 0,8 INDUTIVO

Neste item, a simulação é realizada para mostrar a comutação da chave 2A para a chave 4E, ou seja, o acionamento dos *taps* extremos do regulador. A tensão da fonte é de 11,04 kV aplicada na entrada do regulador. Considera-se ainda, que o intervalo de tempo para a chave 4E entrar em condução, após a abertura da chave ligada ao tap 2A, é de 4,167 ms e que isso só ocorrerá após um sensor do sistema de controle certificar que a chave do tap 2A entrou em condição de bloqueio.

Na figura 2.24 pode ser visualizada a forma de onda da tensão na carga para a simulação em questão.

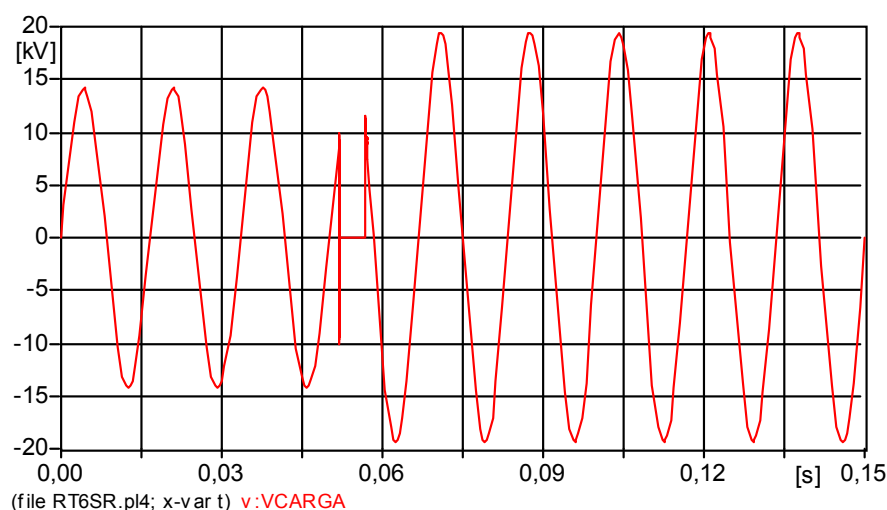


Figura 2.24: Forma de onda da tensão na carga.

Na figura 2.25 pode ser observado, também, o comportamento da tensão em termos de valores eficazes. Nota-se que o valor inicial da tensão é de 10.029 V e que, após a comutação de taps, a tensão eficaz alcança um valor de 13.696 V. A ausência de oscilações transitórias nas figuras anteriores é devido às condições de amortecimento impostas pela representação da carga.

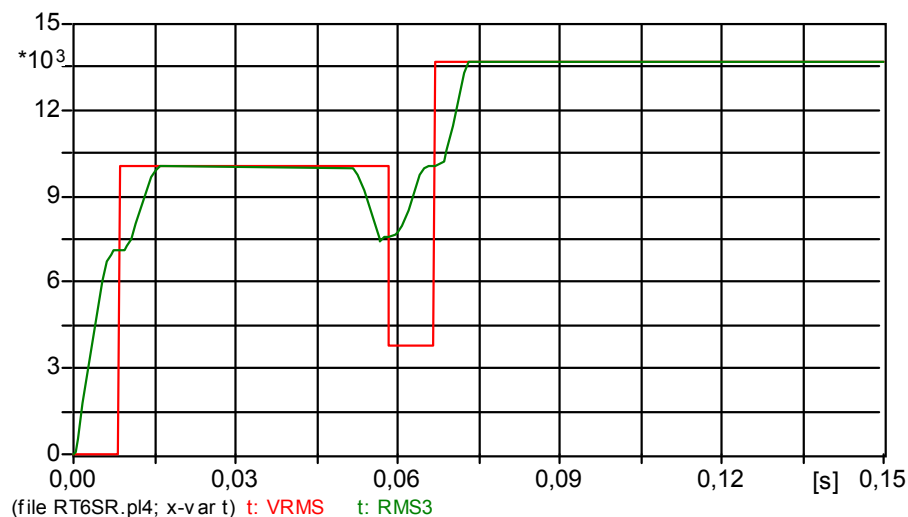


Figura 2.25: Valores eficazes da tensão na carga.

Nesse arranjo, observou-se que a queda de tensão na carga é bastante acentuada no instante em que o regulador está fazendo a comutação. De fato, dependendo do critério para o cálculo do valor eficaz da tensão, isto será mais ou menos evidenciado, porque neste caso, durante o processo de comutação, existe um período de interrupção de tensão para a carga.

Na figura 2.26 é mostrada a forma de onda obtida da corrente na carga.

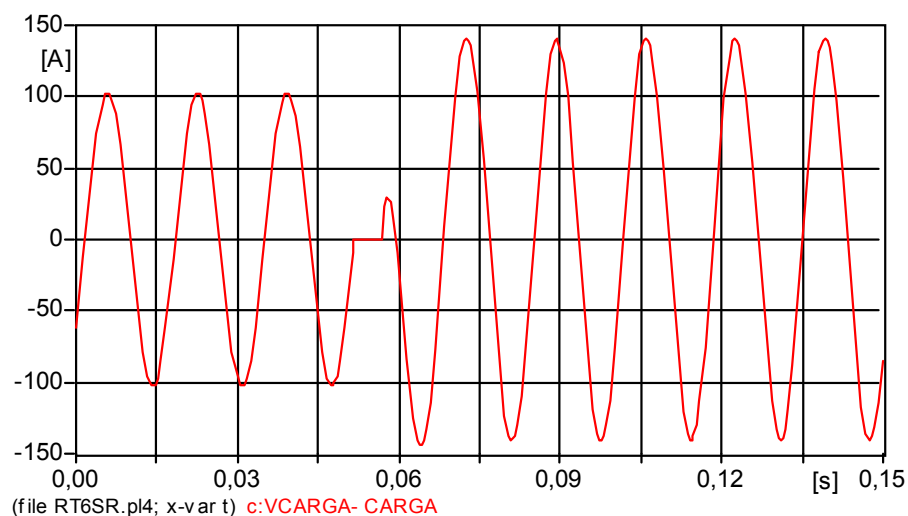


Figura 2.26: Forma de onda da corrente na carga.

A corrente de carga representada na figura 2.26 foi interrompida por um intervalo de tempo de 4,167 ms, isto é, o intervalo de tempo necessário para o bloqueio da chave do tap 2A e o fechamento da chave do tap 4E. A duração da interrupção é função do fator de potência da carga alimentada pelo regulador de tensão e do sistema de controle de comutação. De acordo com o instante de tempo em que se inicia a operação de comutação de *taps*, o valor máximo dessa duração será de 1 ciclo, uma vez que a chave que está em condução somente entra em bloqueio na próxima passagem da corrente pelo zero enquanto que a outra chave será fechada somente na passagem da tensão pelo seu valor máximo seguinte. Soma-se a esta duração da interrupção o tempo de processamento do controle de comutação (sensores de corrente e tensão) a ser implementado. Pode-se fazer uma projeção de tempo de interrupção máximo de 1,5 ciclos.

A interrupção da corrente na carga pode restringir o uso deste modelo de regulador de tensão visto que existem limites de duração da interrupção de corrente na carga, previstos pela legislação do setor elétrico. Cada tipo de carga possui uma suportabilidade específica quanto à duração da interrupção de corrente. Em geral, considera-se que interrupções com duração de até 3 ciclos não produzem danos a alguns tipos de cargas mais sensíveis como por exemplo computadores.

2.5.3. CASO 3: REGULADOR DE TENSÃO COM 6 DEGRAUS SEM O REATOR DE COMUTAÇÃO E COM A BOBINA DE EXCITAÇÃO LIGADA À CARGA

(A) - SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO CONECTADO A UMA CARGA DE 100 A E FATOR DE POTÊNCIA 0,8 INDUTIVO

Diferentemente do modelo de regulador anterior, ao invés da bobina de excitação estar submetida diretamente à tensão da fonte, a mesma está ligada à carga, sendo a bobina de tap's conectada à fonte. Portanto, as chaves eletrônicas que deverão fazer a comutação de *taps* estarão também energizando e desenergizando o regulador de tensão a cada operação de comutação.

A principal diferença deste arranjo para o arranjo anterior consiste no fato de a bobina de excitação estar submetida a uma tensão regulada, e isto acarreta, como conseqüência, que os valores de tensão para cada tap são iguais. As demais características são semelhantes ao caso 2. Neste arranjo também existem 7 chaves onde somente uma está em condução a cada instante, o que faz com que a corrente na carga seja interrompida durante a comutação. A figura 2.27 mostra o esquema de conexão para este caso.

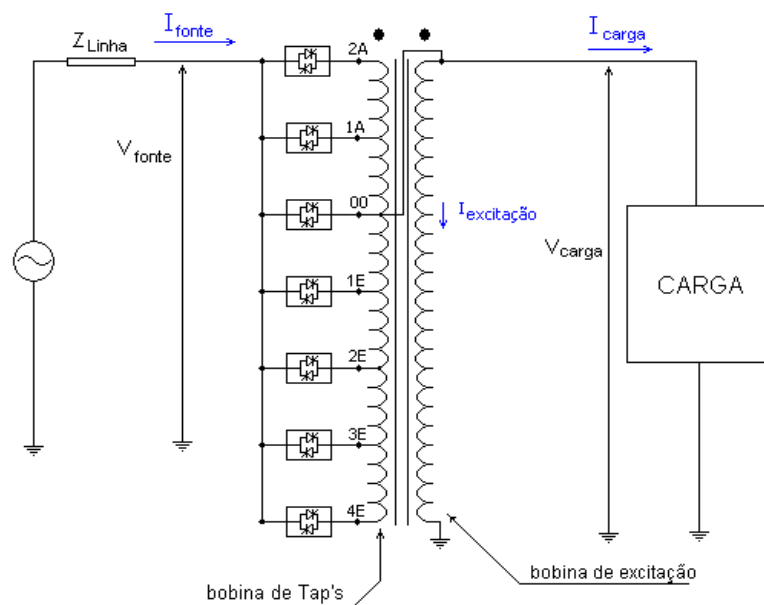


Figura 2.27: Esquema elétrico do regulador de tensão com a bobina de excitação ligada à carga.

As simulações para este arranjo obedeceram às mesmas condições e requisitos anteriores, com exceção do intervalo de tempo durante o qual a corrente na carga é interrompida, este foi reduzido para 2 ms, o que atenua significativamente a queda de tensão na carga durante a comutação. A figura 2.28 apresenta a forma de onda da corrente na carga.

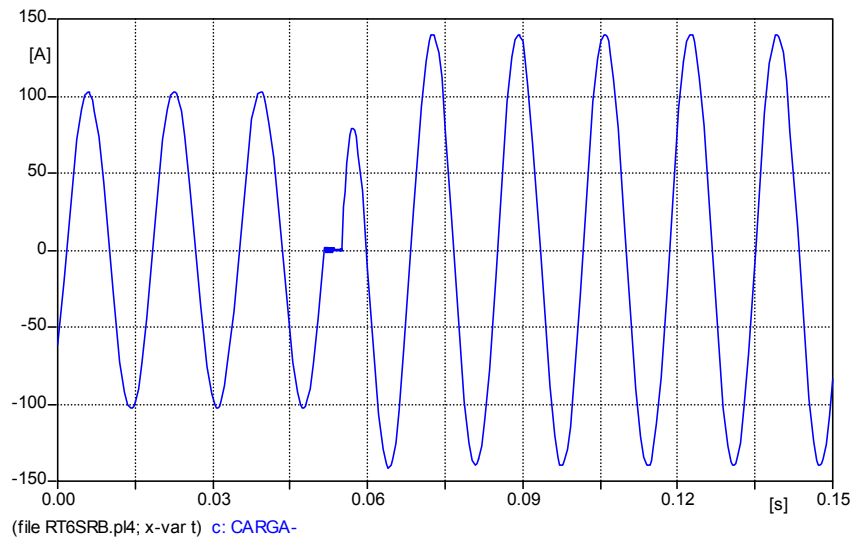
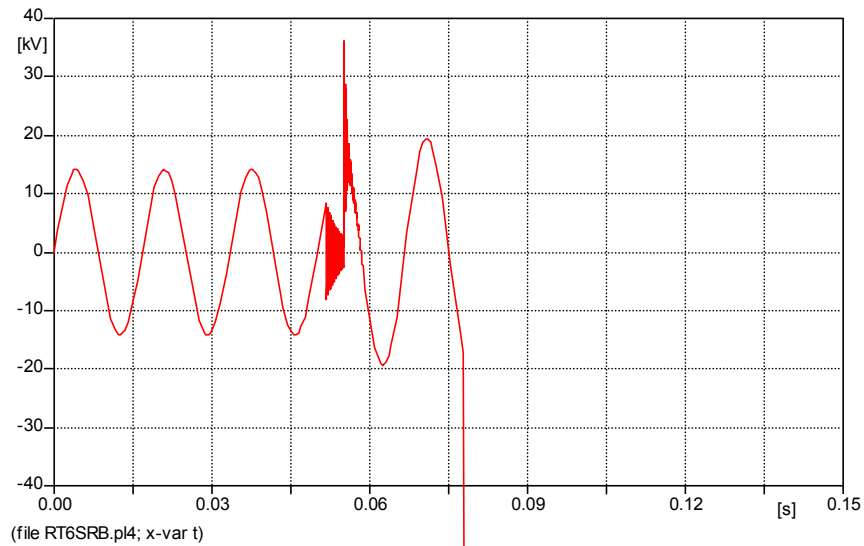


Figura 2.28: Forma de onda da corrente na carga

A forma de onda da tensão na carga é mostrada na figura 2.29.



instante de corte de tensão, conforme mostrado na figura 2.29. A carga utilizada neste caso é composta por um único ramo RL série, sendo que uma representação de dois ou mais ramos RL série, associados em paralelo produziria o amortecimento dessas oscilações transitórias, além de representar uma configuração de carga mais comumente encontrada nos sistemas de distribuição.

O perfil dos valores eficazes da tensão na carga é mostrado na figura 2.30.

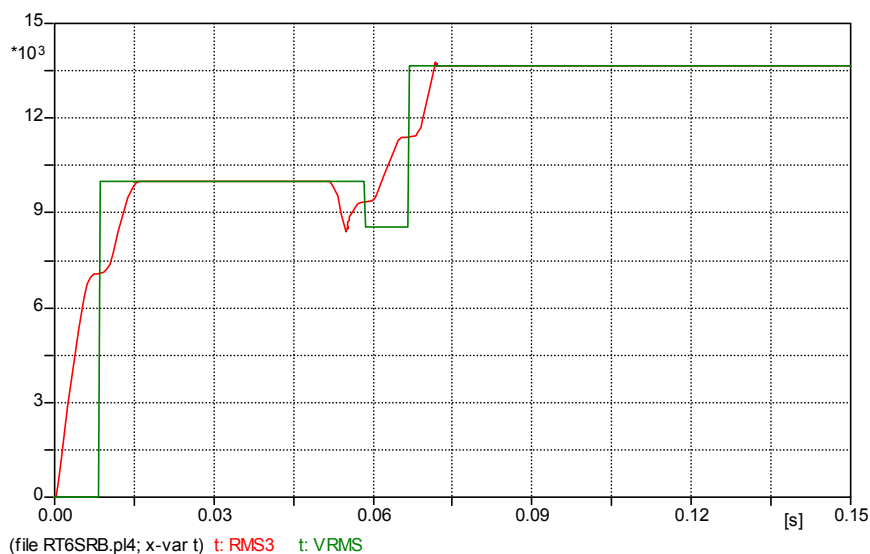


Figura 2.30: Valores eficazes da tensão na carga.

Para evitar a oscilação transitória de tensão ocorrida no instante de fechamento da chave, este deve ocorrer somente no instante em que a tensão da fonte passa pelo seu valor nulo. A figura 2.31 mostra o resultado da simulação para esta condição.

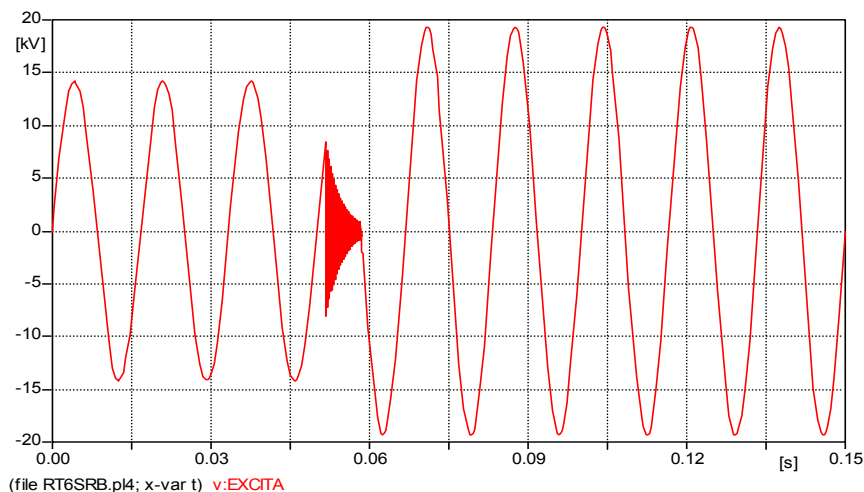


Figura 2.31: Oscilação transitória de tensão na carga.

Contudo, este procedimento resulta em um maior afundamento do valor eficaz da tensão devido ao maior tempo de interrupção da corrente de carga. A figura 2.32 mostra a corrente na carga, onde pode ser verificado o intervalo de tempo em que ela se anula.

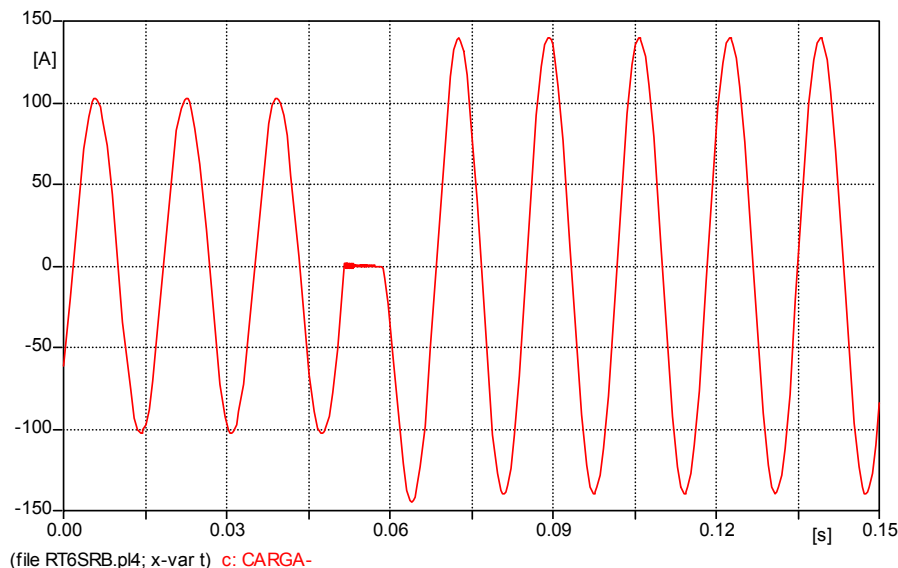


Figura 2.32: Forma de onda da corrente na carga.

A figura 2.33 mostra o afundamento ocorrido no perfil da tensão eficaz.

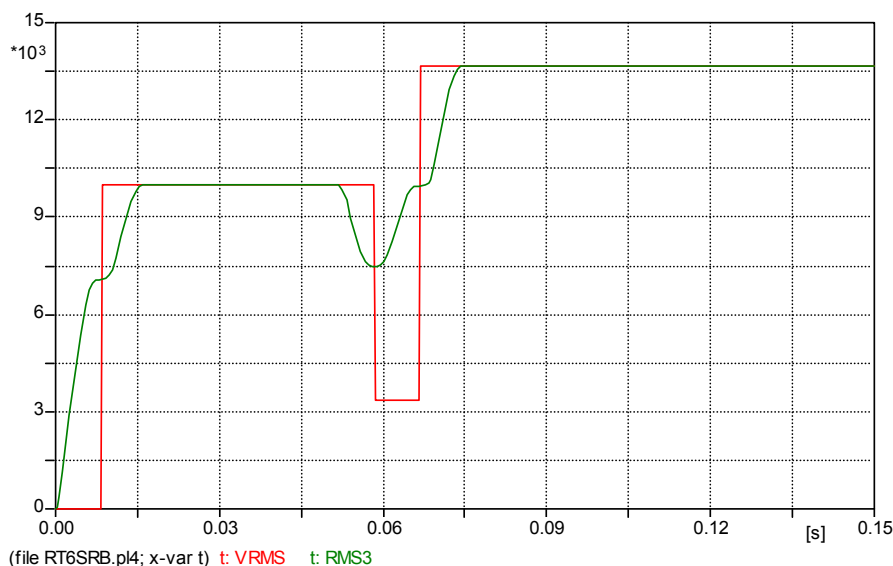


Figura 2.33: Valores eficazes da tensão na carga.

Analisando os dois últimos casos apresentados, verifica-se que o arranjo sem reator apresenta também uma interrupção da corrente na carga, porém, a duração dessa interrupção pode ser muito pequena e não comprometer a carga.

Ressalta-se também que, principalmente, devido ao fato de haver apenas duas chaves para serem comandadas durante a comutação de *taps*, o tempo final de comutação é menor.

2.6. ESCOLHA DO ARRANJO MAGNÉTICO DO REGULADOR DE TENSÃO

Os estudos computacionais realizados no item 2.5 servirão de base para a escolha do arranjo magnético do regulador que será adotado para a implementação do controle eletrônico de comutação de *taps*. Analisando-se os resultados obtidos nas simulações computacionais, pode-se fazer uma comparação entre as vantagens e desvantagens de cada arranjo magnético considerado, buscando aquele que seja mais adequado para a implementação do controle de comutação.

- **Quanto ao modelo de regulador de tensão com o reator de comutação :**

O regulador de tensão com o reator de comutação tem como desvantagem principal a necessidade de construção de dois barramentos de chaves estáticas, um para cada terminal do reator. Relembrando que o objetivo de implementação do reator de comutação no regulador de tensão foi evitar a interrupção de corrente na carga, torna-se prudente a avaliação do custo para a implementação das chaves estáticas em função de continuidade de alimentação da carga. As chaves estáticas possuem alto custo, elevando o custo final de fabricação do equipamento.

Outro fator importante diz respeito à possibilidade de ocorrência de curto-circuito entre duas chaves quaisquer de um mesmo barramento. Um controle de comutação implementado neste arranjo magnético de regulador

requer a construção de uma lógica de comutação que elimine essa possibilidade, garantindo a integridade operacional das chaves.

A possibilidade de curto-circuito entre chaves descrita anteriormente, associada ao aparecimento da componente contínua da corrente no circuito do reator, no instante de comutação de *taps*, exige um procedimento a ser seguido pela lógica do controle de comutação que defina instantes ótimos para a realização da comutação, considerando a amplitude e o fator de potência da carga. Porém, ressalta-se que essas condições para a comutação automática de *taps* não impossibilitam a implementação de um controle inteligente de comutação, embora requeiram uma lógica mais complexa que satisfaça às condições descritas.

A operação de comutação de *taps* com o reator de comutação aumenta o tempo de duração da comutação, uma vez que é necessário o comando de quatro chaves para finalizar uma operação de comutação.

- **Quanto ao modelo de regulador de tensão sem o reator de comutação e com a bobina de excitação ligada à fonte:**

Durante a comutação de *taps*, este arranjo magnético do regulador submete a carga a um afundamento de tensão acentuado, que fica ainda mais evidenciado pelo método de cálculo do valor eficaz da tensão na carga utilizado nas simulações. Nos estudos realizados neste capítulo, o valor eficaz é calculado a cada meio ciclo, o que destaca o afundamento de tensão que ocorre durante o intervalo de tempo no qual a tensão na carga é interrompida, entre o instante de abertura da chave que está em condução e o instante de tempo de fechamento da chave ligada ao tap que irá restaurar a tensão na carga.

A exclusão do reator de comutação tem como benefício a utilização de somente um barramento de chaves, se traduzindo na redução do custo final do equipamento e principalmente, na possibilidade de construção de uma lógica de comutação de *taps* mais simples.

A bobina de excitação do regulador de tensão está sujeita às mesmas variações de tensão da fonte e requer um número específico de espiras para que cada tap permaneça com a sua capacidade de regulação de tensão em 5% da tensão nominal da carga. Esta característica deve ser considerada na implementação da lógica de comutação de *taps* para este arranjo magnético.

- **Quanto ao modelo de regulador de tensão sem o reator de comutação e com a bobina de excitação ligada à carga:**

Uma característica principal que diferencia este arranjo magnético dos outros dois anteriormente descritos é que a bobina de excitação ser desenergizada durante a comutação de *taps*. A ligação da bobina de excitação à carga cria uma sobretensão transitória na carga durante a comutação de *taps*, devido ao comportamento do circuito elétrico formado pela indutância desta bobina e pelas suas capacitâncias de fuga. A lógica de controle para a comutação de *taps* deste modelo de regulador deve eliminar esta situação de sobretensão, comandando o disparo das chaves somente no instante de tempo em que a tensão da fonte passa pelo valor nulo.

Outra característica deste arranjo consiste no fato da bobina de excitação estar submetida a uma tensão regulada, garantindo valores iguais de tensão para todos os *taps* e excluindo a necessidade de *taps* com números específicos de espiras, conforme observado no arranjo anterior.

Sendo assim, analisando-se as principais características reveladas nos resultados de simulação computacional dos 3 arranjos magnéticos apresentados, optou-se pela escolha do arranjo magnético do regulador sem o reator de comutação e com a bobina de excitação ligada à fonte. Esta escolha justifica-se pela necessidade de construção de uma lógica de comutação de *taps* mais simples, com uma menor quantidade de condições a serem satisfeitas para a realização da operação de comutação, tendo, como consequência, um tempo menor de comutação de *taps* e uma operação mais eficiente do regulador de

tensão minimizando a duração das oscilações de tensão na carga. Este modelo elimina a ocorrência da componente contínua de corrente que circula pelo reator de comutação e a possibilidade de curto circuito entre chaves presentes no modelo de regulador com o reator. Comparado ao arranjo magnético com a bobina de excitação ligada à carga, o modelo adotado tem como vantagem a eliminação da ocorrência de sobretensão transitória na carga. O arranjo com bobina de excitação ligada à carga ainda está sujeito a efeitos dos fenômenos de ferroressonância e corrente de “Inrush”, uma vez que a bobina de excitação está inclusa no circuito que é chaveado. Estes efeitos indesejáveis são evitados buscando condições ideais de chaveamento, as quais podem incorrer no aumento do tempo de duração da operação de comutação, além de exigir um controle de comutação de *taps* com uma lógica mais complexa devido às condições a serem atendidas para a realização da comutação.

2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados relativos às simulações de três tipos de arranjos magnéticos do regulador de tensão para a implementação do controle eletrônico, controle este que busca uma operação rápida e segura do equipamento.

Os estudos foram realizados com o regulador de tensão operando sem o controle automático, isto é, com as chaves de comutação de *tap's* controladas por tempos definidos manualmente. Para esta situação foram realizados os estudos com três configurações para o equipamento, Primeiramente analisou-se a situação com um reator de comutação e depois sem a utilização do mesmo, sendo que para esta última situação apresentaram-se duas possíveis configurações: bobina de excitação conectada à fonte ou à carga.

Dentro deste contexto podem-se extrair as seguintes conclusões:

(a) Quanto ao modelo que utiliza o reator de comutação:

- A conexão do reator de comutação requer a presença de dois barramentos de chaves, o que eleva o custo do investimento;
- No instante da comutação, o chaveamento do reator de comutação produz uma componente de corrente contínua (DC) na corrente de circulação (I_c), cuja amplitude depende do valor instantâneo da tensão no momento de fechamento da chave, sendo que, o menor nível DC ocorre quando a chave é fechada no instante de pico da tensão da bobina do reator de comutação;
- Se acontecer de uma chave de um mesmo barramento ser disparada enquanto a outra estiver em condução poderá ocorrer um curto-circuito na malha do barramento. Isto poderá ser controlado verificando a condição de tensão na bobina de tap's, pois se a tensão estiver no semiciclo positivo, a mesma será aplicada na chave em condução como uma tensão reversa fazendo o bloqueio da chave em condução. Caso contrário, tem-se um curto-circuito;
- Reatores de comutação que permitem elevadas correntes de circulação poderão ter maiores níveis de componente de corrente contínua (DC), exigindo um controle mais preciso das chaves que entram em condução. Quanto maior for a corrente de circulação, maior será a potência do reator. Um reator com maior impedância limita mais a corrente de circulação, reduz o nível de componente de corrente contínua e possui uma menor potência, contudo, produz uma grande queda de tensão na carga, no instante de comutação.

(b) Quanto ao modelo sem o reator de comutação:

- Na configuração sem reator de comutação, o número de chaves se reduz à metade do que é necessário para a configuração que utiliza o reator de comutação;

- O arranjo sem reator de comutação pode apresentar interrupção da corrente de carga durante o processo de comutação, porém, a duração dessa interrupção pode ser muito pequena e não comprometer a operação das cargas, representando um pequeno afundamento no valor eficaz da tensão da carga.
- As oscilações mostradas, quer sejam de corrente ou de tensão, na realidade poderão ser muito mais amortecidas em função de valores reais das perdas do sistema, as quais não foram eficientemente representadas, além da modelagem adequada das cargas, uma vez que estas foram representadas por uma única associação RL em série. Como se sabe, a carga de um regulador deverá ser o resultado de uma composição em paralelo de diversos tipos de cargas, sendo cada uma representada por uma associação conveniente de parâmetros R, L e C. A representação adequada das cargas poderá amortecer significativamente as oscilações transitórias mostradas nos instantes de comutação;

(c) Quanto ao arranjo magnético escolhido:

Levando-se em conta os resultados das simulações e as considerações finais, adotou-se, para a implementação da lógica de controle o seguinte arranjo magnético para o regulador de tensão:

- Regulador sem reator de comutação com a bobina de excitação do lado da fonte, para evitar o seu chaveamento, e bobinas de tap's dimensionadas de forma a compensar a variação de tensão na bobina de excitação;
- Tensão nominal de $\left(\frac{13,8}{\sqrt{3}}\right)$ kV, 100 A e faixa de regulação de tensão de 10% para redução e 30% elevação;
- Bobina de tap's com 9 derivações de 5% cada uma;

- O sistema de controle deverá levar em consideração os valores diferenciados dos *taps* para tomar a decisão para qual tap comutar, a fim de evitar instabilidade em determinadas situações (comutações repetitivas).

A figura 2.34 a seguir apresenta a configuração do regulador de tensão monofásico proposto.

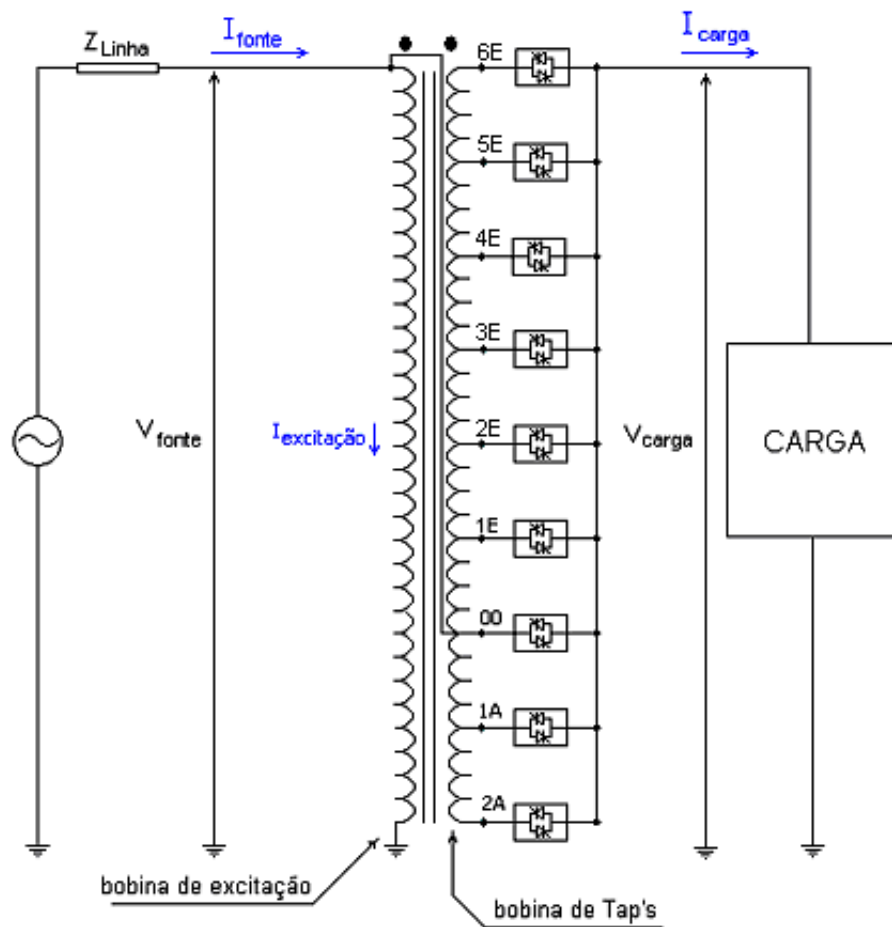


Figura 2.34: Arranjo magnético adotado para o regulador de tensão.

CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO DE *TAPS*

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os estudos sobre o arranjo magnético do regulador de tensão realizados no capítulo II definiram o modelo de regulador de tensão que será utilizado neste capítulo, para a implementação do controle de comutação automática de *taps*.

O controle de comutação automática de *taps* foi desenvolvido com o objetivo de reduzir o tempo de comutação dos modelos tradicionais de reguladores de tensão, aumentando assim a eficiência da operação do equipamento frente ao comportamento dinâmico da tensão na carga.

Inicialmente será apresentado neste capítulo um controle primário com uma lógica simples de comutação. Basicamente, este controle monitora constantemente o nível de tensão na carga e após ser detectada uma mudança no perfil desta tensão, quer seja elevação, quer seja redução, este controle comanda o bloqueio da chave que está em condução e o disparo da chave do tap adequado, a fim de retornar a tensão da carga ao seu valor nominal ou próximo a este.

Com esta lógica de controle, algumas situações de instabilidade operacional (comutações repetitivas) ocorrem quando, por exemplo, o acionamento de um tap adjacente para elevação de tensão ultrapassa o limite de

sobretensão admissível na carga e o acionamento do tap adjacente, para redução de tensão, reduz a tensão na carga a um valor abaixo do nível de subtensão permitida por norma. Nesta situação o controle executa comutações sucessivas entre estes dois *taps*, criando uma situação de má operação do regulador de tensão, contribuindo para o desgaste excessivo do equipamento (contatos, terminais, chaves eletrônicas, etc). Estas situações de operação devem ser evitadas, adotando estratégias de tomada de decisão bem definidas que eliminem estas condições de operação do equipamento.

Outra característica do controle primário de comutação é que existem situações nas quais ocorrem comutações intermediárias de *taps* até que o tap adequado para a regulação da tensão seja acionado. Por exemplo, para realizar a operação de comutação entre os *taps* extremos do regulador (*taps* 2A e 6E), o controle não comanda a comutação imediata do tap 2A para o tap 6E, sendo necessário realizar comutações para *taps* intermediários até que a chave do tap 6E seja disparada. O acionamento de um tap intermediário está diretamente ligado à velocidade de atuação do controle eletrônico e também à taxa de variação da tensão na carga. A primeira característica diz respeito ao tempo de atuação do controle, ou seja, quanto tempo após ser detectada uma variação de tensão na carga, o controle comanda o início de uma operação de comutação. Um controle com um tempo de atuação de, por exemplo, 1 ciclo estará mais sujeito à ocorrência de comutações intermediárias do que um controle com um tempo de atuação de 2 ciclos. Pode-se concluir que quanto mais rápido seja o tempo de resposta do controle de comutação, maiores serão as chances de ocorrência de comutações intermediárias. Já a segunda característica é extremamente dependente do fenômeno da rede elétrica que originou a variação de tensão, ou seja, está ligada à constante de tempo do transitório eletromagnético que gerou o desvio da tensão na carga do seu valor nominal. Se o controle possui um tempo de atuação rápido e a taxa de variação da tensão na carga for pequena, o controle poderá comandar comutações intermediárias.

Assim um controle com tempo de atuação rápido acarretará possíveis comutações intermediárias de *taps*. Estas duas características presentes no controle primário de comutação constituem as adaptações realizadas na lógica do sistema de controle de comutação para a implementação de um controle inteligente de comutação.

O controle primário constitui a base para a implementação de um controle inteligente de comutação. As adaptações implementadas no controle primário dizem respeito à velocidade de atuação do regulador e ao número de comutações necessárias para restabelecer a tensão na carga. O controle inteligente deve ser capaz de executar a mesma operação do controle primário porém em menor tempo e com o acionamento do menor número possível de *taps* intermediários (comutações intermediárias).

3.2. A METODOLOGIA DO CONTROLE PARA COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAP'S

De maneira primordial, a lógica do sistema de controle deve monitorar constantemente a tensão na carga, e, a partir de um determinado desvio em relação ao valor de referência, comandar a comutação do tap atual para um tap previamente determinado, a fim de eliminar o desvio de tensão. Ou seja, o sistema de controle deve ter o conhecimento do tap atual, no qual se encontra o regulador de tensão, e determinar para qual tap deve ser feita a comutação, em função do desvio de tensão da carga.

Deve-se observar que durante as operações de bloqueio e de disparo das chaves dos *taps* ocorrem transitórios eletromagnéticos de comutação, submetendo as chaves a alguns efeitos indesejáveis, como por exemplo, sobretensões, sobrecorrentes e esforços eletromecânicos. Para minimizar o efeito destes transitórios de comutação, o controle de comutação identifica as

condições ideais de chaveamento de maneira a manter a integridade operacional de todos os dispositivos do regulador (chaves, enrolamentos, terminais de conexão, isoladores, etc.). Nesse sentido, o controle automático impõe duas condições de operação das chaves:

- i. o bloqueio de corrente nas chaves ocorre somente no instante de passagem da corrente de carga pelo valor nulo;
- ii. o disparo das chaves ocorre somente no instante de passagem da tensão na bobina de excitação pelo valor nulo.

Garantindo que o controle de comutação de *taps* comande a operação das chaves somente nestas duas condições de chaveamento, reduz-se as sobretensões originadas pelos transitórios de comutação de *taps*, impostas às chaves. A operação do controle de comutação, de maneira geral, deve seguir uma seqüência de comandos de tal forma que após uma variação da tensão na carga, o controle eletrônico de comutação deve decidir qual o tap adequado a ser acionado e disparar a chave estática do referido tap, aplicando a tensão nominal na carga.

Porém, deve-se observar que o modelo de regulador de tensão definido para utilização do controle eletrônico de comutação possui valores específicos de espiras em cada tap e por conseguinte, cada tap possui valores específicos de ajuste de tensão, de maneira que o controle dispara a chave estática do tap que mantém a tensão na carga num valor o mais próximo possível do valor nominal. Obviamente, existirá uma faixa de variação de tensão na carga para a qual o controle não tomará nenhuma ação considerando que a tensão da carga está dentro de valores aceitáveis de operação. De acordo com os limites de variação de tensão definidos pela resolução normativa nº 505 da ANEEL, que trata da conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica, estes devem situar-se entre **95% e 105%** da tensão nominal de operação do sistema. Para que esta resolução seja atendida, o sistema decisório do controle automático de

comutação deverá considerar para cada operação, as tensões específicas de cada tap da bobina de *taps* e energizar o tap adequado, garantindo assim que a tensão da carga fique dentro desses limites estabelecidos pela resolução.

3.3. DESCRIÇÃO DA LÓGICA DO CONTROLE DE COMUTAÇÃO DE TAP'S.

Nesta seção será apresentada a lógica do controle primário de comutação de *taps*, ou seja, as adaptações citadas no item 3.1 não foram ainda implementadas. A razão de descrever este controle com uma lógica mais simples, antes de apresentar o controle inteligente de comutação, é justificada pelo processo de aprimoramento pelo qual passou o sistema de controle de comutação desde a lógica que será aqui descrita até a construção de um sistema de controle adaptado e por isso considerado inteligente.

Toda a lógica de controle foi desenvolvida e implementada empregando-se os dispositivos de controle estabelecidos na TACS (Transient Analysis of Control System) do programa ATP (Alternative Transients Program), que permite a utilização de diversos dispositivos de processamento lógico e algébrico para representação de um sistema elétrico.

Utilizando esses dispositivos pode-se montar uma rede de processamento similar a um sistema de controle elétrico composto por diferentes dispositivos, no qual os sinais lógicos são transportados entre seus elementos, podendo ser aplicados aos nós de uma fonte de tensão ou corrente da rede elétrica, ou ainda utilizar estes sinais para controlar a operação de chaves eletrônicas.

Dessa forma, a utilização da TACS permite a simulação computacional com uma representação bastante real do modelo de regulador de tensão com comutação eletrônica de *taps* que será implementado. Dispositivos como: comparadores, seletores de sinais, registradores de sinal, medidores de máximo

e mínimo, chaves controladas por pulso de comando, contadores, etc, todos suportados pela TACS foram utilizados na construção da lógica de comutação.

A seguir, na figura 3.1, é apresentado o algoritmo que representa a lógica do controle eletrônico de comutação de *taps*. O diagrama de blocos mostrado na figura 3.1 apresenta a seqüência de passos seguidos pelo controle eletrônico para a realização de uma operação de comutação de *taps*. Os blocos foram numerados para que a lógica possa ser descrita através da especificação da função de cada um dos blocos do diagrama geral. As setas indicam a seqüência de passos e o direcionamento da informação lógica através dos blocos que constituem o controle de comutação. Deve-se atentar para o fato de que cada bloco constituinte do diagrama geral mostrado na figura 3.1 é formado por vários dispositivos da rotina TACS do ATP.

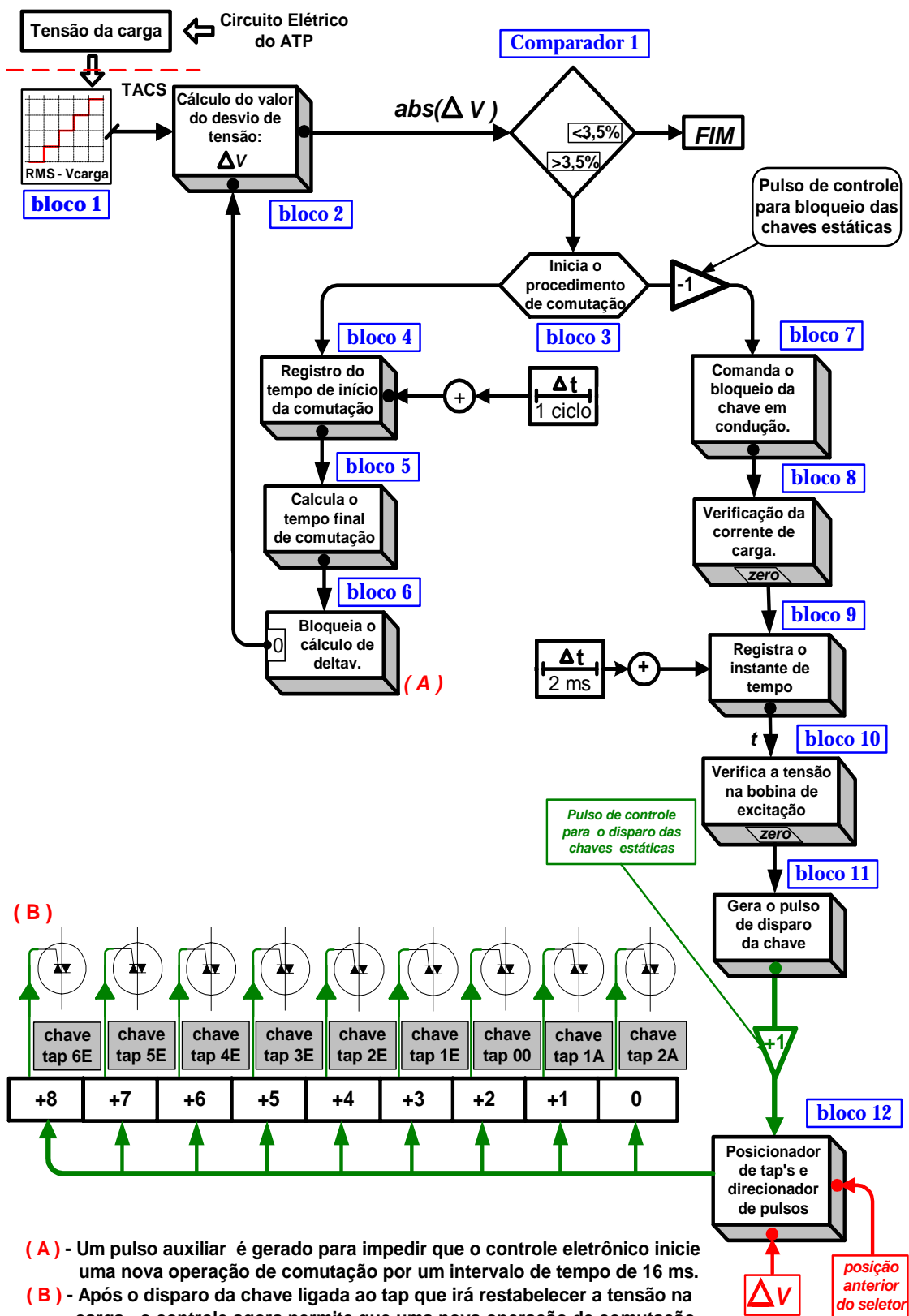


Figura 3.1: Digrama de blocos representando a lógica do controle eletrônico de comutação.

Cada um dos blocos representados na figura 3.1 serão, a seguir descritos, com a finalidade de esclarecer as particularidades de cada um para atender às exigências do controle.

i. (bloco 1) - MEDIÇÃO DO VALOR EFICAZ DA TENSÃO NA CARGA

O cálculo do valor eficaz da tensão na carga é feito no *bloco 1* representado na figura 3.1. Qualquer operação de comutação de *taps* é iniciada a partir da identificação de uma variação do valor eficaz da tensão na carga. O controle de comutação determina a diferença entre o valor eficaz de tensão na carga e um valor de referência e então gera um sinal de erro proporcional a esse desvio. Assim é necessário que a tensão da carga seja monitorada constantemente para que o controle de comutação decida o momento exato de iniciar uma operação de comutação de *taps* e também qual o tap correto a ser acionado, para restabelecer a tensão na carga ao seu valor nominal ou a um valor o mais próximo possível do nominal.

A rotina TACS do ATP possui um dispositivo que calcula de forma contínua o valor eficaz da tensão em um ponto do sistema elétrico simulado. Nesse dispositivo, o valor rms da tensão na carga é calculado de forma contínua, a cada passo de integração definido pelo usuário do ATP na simulação computacional. Este método de cálculo produz um valor eficaz da tensão calculado utilizando uma taxa de amostragem da forma de onda da tensão no nó do sistema elétrico escolhido. O número de pontos amostrados é função da frequência do sistema elétrico simulado e do passo de integração utilizado na simulação computacional [5], de acordo com a equação (3.1):

$$P = 1 + \frac{1}{fr \cdot \Delta t} \quad (3.1)$$

onde:

- P é o número de pontos da amostrados da forma de onda da tensão;

- f_r é a frequência do sistema elétrico
- Δt é o passo de integração da simulação computacional ;

Os valores instantâneos de tensão lidos no circuito elétrico são armazenados numa lista por ordem de amostragem. A cada passo de integração este método de cálculo amostra um novo valor da tensão no nó elétrico e descarta o primeiro valor da lista de pontos armazenados no passo de integração anterior. Dessa forma, as variações de tensão na carga são percebidas pelo medidor de rms de forma contínua e gradual, de acordo com os valores instantâneos lidos no sistema elétrico, determinando várias comutações sucessivas de *taps* à medida que o valor eficaz da tensão na carga é informado ao controle. Assim, por exemplo, para a situação de comutação entre os *taps* extremos do regulador, o controle comandaria 8 comutações de *taps*, ou seja, variação do valor eficaz da tensão na carga, determinaria comutações seqüenciais para cada um dos *taps* do regulador até que a tensão nominal seja restabelecida na carga. Este tipo de operação determina não somente o desgaste operacional do equipamento como também aumenta o tempo de operação do regulador de tensão, reduzindo a sua eficiência operacional.

Para evitar esta situação de má operação e com a intenção de manter a tensão nominal na carga, foi desenvolvido um medidor de valor eficaz, utilizando o programa ATP. Neste medidor de valor rms com níveis discretos, os valores instantâneos da tensão na carga são lidos a cada passo de integração e armazenados durante um semiciclo da tensão. O valor rms é calculado utilizando os valores armazenados e então fornecido em um nível em degrau no semiciclo seguinte. Este medidor de valor rms reduz a possibilidade de ocorrência de comutações sucessivas do controle eletrônico pelo fato de discretizar os desvios da tensão na carga em degraus de variação. Por este motivo, utilizou-se este método para a medição do valor eficaz da tensão na carga. A figura 3.2 ilustra as duas formas de cálculo do valor eficaz da tensão na carga. A curva em *verde*

mostra o valor eficaz calculado de forma contínua, e a curva em *vermelho*, o cálculo de forma discreta.

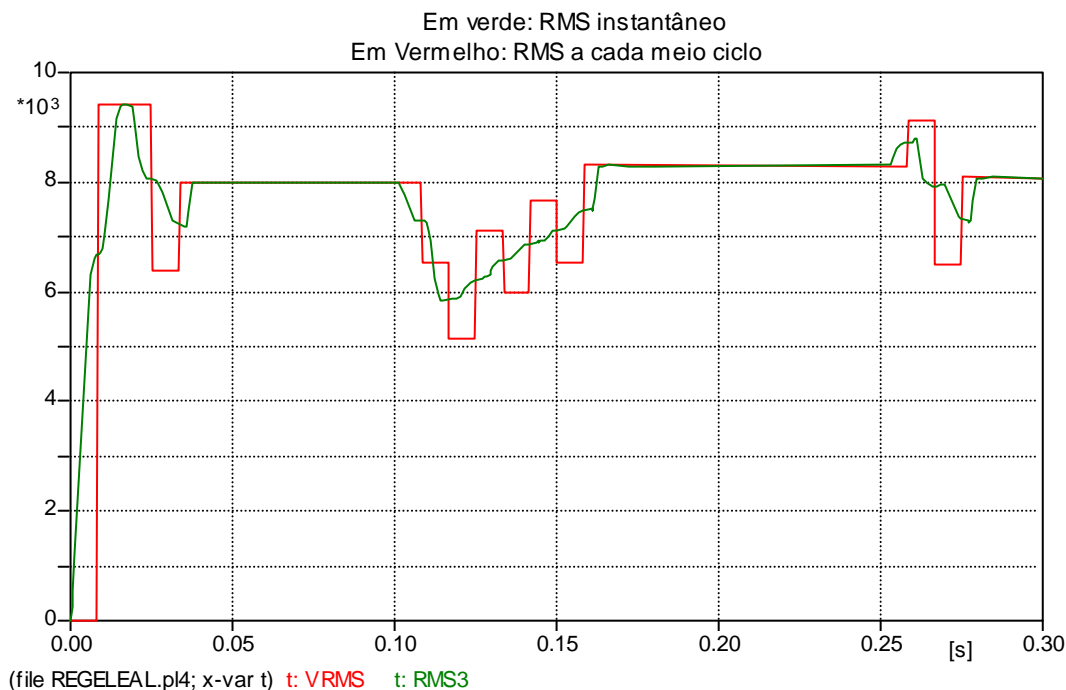


Figura 3.2: Medição do valor rms da tensão na carga

Esta figura mostra uma situação em que a carga alimentada pelo regulador opera com sobretensão no início da simulação. A tensão nominal na carga é de 7,97 kV. O controle de comutação executa uma comutação de *taps* no regulador de tensão e restabelece a tensão nominal na carga. No instante de tempo $t = 100$ ms, ocorre um afundamento instantâneo do valor eficaz da tensão na carga. Pode-se perceber que o medidor de rms instantâneo identifica a queda de tensão na carga de forma mais lenta e contínua, a partir do instante de tempo $t = 100$ ms enquanto que o medidor de rms em valores discretos somente percebe a variação de tensão no instante de tempo $t = 108,34$ ms, meio ciclo depois de ocorrer a variação de tensão na carga. Durante o intervalo de tempo em que as chaves estão bloqueadas o valor eficaz da tensão na carga sofre um afundamento de grande amplitude. Em $t = 250$ ms, há uma elevação instantânea da tensão na carga, e o controle de comutação comanda a comutação de *taps* para reduzi-la, num intervalo de tempo de meio ciclo após a elevação de tensão.

ii. (bloco 2) – CÁLCULO DO VALOR DO DESVIO DE TENSÃO.

O cálculo do desvio da tensão na carga do seu valor nominal é uma informação de fundamental importância dentro da lógica de comutação, pois é a tensão na carga que identifica e determina a necessidade de iniciar uma operação de comutação de *taps*. Este cálculo é realizado pelo **bloco 2** e pelo comparador 1 do diagrama de blocos mostrado na figura 3.1.

O desvio de tensão é calculado através da diferença entre os valores de tensão nominal na carga e o valor eficaz da tensão na carga fornecido pelo **bloco 1**, descrito anteriormente. A expressão que realiza o cálculo pode ser descrita por:

$$\Delta V = ((7970 - V_{\text{rms}}) / 279) \quad (3.2)$$

onde:

- ΔV é o desvio de tensão ;
- V_{rms} é o valor eficaz da tensão da carga fornecido pelo **bloco 1** ;

O **bloco 1** determina o valor absoluto do desvio de tensão e fornece esta informação ao **Comparador 1**. O **Comparador 1** compara o sinal de desvio de tensão com o numerador 279, que representa 3,5% da tensão nominal da carga. Se o valor absoluto do desvio for menor ou igual a 3,50% da tensão nominal, o controle não toma nenhuma atitude. Caso o valor absoluto de desvio seja maior do que 3,5%, o controle inicia imediatamente uma operação de comutação de *taps*. Assim, garante-se que a maior discrepância entre a tensão da carga e a tensão de referência admitida pelo regulador de tensão seja de 3,5%.

O fato de o **Comparador 1** não utilizar um valor de referência de 2,5% da tensão nominal, que é a metade da tensão de regulação de cada tap, ao invés dos 3,5% adotado, justifica-se pelo fato de que uma variação de 2,5% no valor eficaz da tensão na carga, identificada pelo **Comparador 1**, já determinaria o início de uma operação de comutação de *taps* na qual o controle pode comandar o

acionamento contínuo de dois taps adjacentes. Por exemplo, se a variação de tensão na carga for de 2,5% e o controle comanda a comutação de *taps*, a energização do tap adjacente, esta ação regulará a tensão na carga em 5%, que é a tensão entre *taps*, ou seja, o desvio de tensão na carga continuaria sendo de 2,5%. Nessa situação o controle faz o acionamento do tap imediatamente superior e volta ao tap imediatamente inferior. O valor de referência de 3,5 % adotado no Comparador 1 evita essa operação indesejável do controle de comutação.

iii. (bloco 3) – STARTUP DA OPERAÇÃO DE COMUTAÇÃO.

Após o controle identificar a necessidade de comandar uma comutação de *taps*, duas ações são executadas simultaneamente:

- O controle aciona o ***bloco 4*** para que ele registre o instante de tempo do início da comutação e;
- O controle ativa o ***bloco 7*** para que este comande o bloqueio da chave estática que está em condução.

É importante destacar que a rotina TACS do ATP faz o processamento dos dispositivos de diferentes blocos simultaneamente, de forma análoga ao processamento de diferentes tarefas que são executadas simultaneamente em um computador.

iv. (bloco 4 e bloco 5) – REGISTRO DO TEMPO DE INÍCIO DE COMUTAÇÃO E CÁLCULO DO TEMPO FINAL DE COMUTAÇÃO.

O ***bloco 4*** bloco recebe o comando do ***bloco 3*** do controle para registrar o tempo de início de comutação. Então, este bloco soma um intervalo de tempo de 1 ciclo ao instante de tempo do início da comutação e fornece essa informação

ao **bloco 5**. Este por sua vez, faz o cálculo do tempo total necessário para a comutação de *taps*, levando em consideração os intervalos de tempo exigidos para o bloqueio da chave, que ocorre na passagem da corrente pelo zero, e para o disparo, no instante seguinte de passagem da tensão pelo valor nulo e transmite essa informação ao **bloco 6**.

v. (bloco 6) – BLOQUEIO DO CÁLCULO DE DELTAV.

O **bloco 6** tem a função de impedir que o controle comande sucessivas comutações. É fundamental que, após o início de uma operação de comutação, o controle aguarde até que essa operação seja finalizada sem comandar outra operação concorrente, de maneira a impedir o comando de comutações sucessivas. Após ser iniciada uma comutação de *taps*, o **bloco 6** recebe a informação do **bloco 5** de quanto tempo será necessário para finalizar essa operação. Durante este intervalo de tempo, o **bloco 6** zera o cálculo do desvio de valor eficaz da tensão na carga, realizado no **bloco 2**. Um ciclo depois de ter sido iniciada uma operação de comutação, o controle permite que o **bloco 2** recomece a fazer o cálculo do desvio de tensão na carga e inicie outra operação de comutação de *taps* quando for necessário.

vi. (bloco 7) – BLOQUEIO DA CHAVE EM CONDUÇÃO.

Assim que o **bloco 3** transmite a informação de início de comutação ao **bloco 7**, este procede ao comando de bloqueio das chaves estáticas que estão em condução.

As chaves utilizadas neste modelo de regulador de tensão são as chaves do tipo 12 presentes na biblioteca do ATP, que são acionadas por um sinal de comando gerado com as fontes de pulso disponíveis na TACS. Este tipo de chave opera sob o comando de um sinal de gatilho de maneira que, e se for igual

a +1 (ou maior do que zero) a chave será fechada e se o sinal de gatilho for igual a -1 (ou menor do que zero) a chave será aberta. Há que se considerar que as chaves estáticas reais operam também sob dois estados: condução na presença de um pulso de gatilho da chave e bloqueio na ausência deste. Contudo, para a implementação de um sistema de controle real, pode-se facilmente converter o sinal de gatilho utilizado no controle inteligente da TACS em um pulso de gatilho das chaves estáticas reais, através da utilização, por exemplo, de um comparador que gera um pulso com amplitude nula, quando o sinal da TACS for -1, e outro pulso com amplitude maior do que zero, quando o sinal da TACS for +1. Esse é um dos motivos pelo qual pode-se afirmar que todos os dispositivos disponíveis na TACS podem ser facilmente implementados numa malha de controle de operação das chaves estáticas do regulador de tensão.

vii. (bloco 8) – VERIFICAÇÃO DA CORRENTE DE CARGA.

A partir do comando de bloqueio da chave estática que está em condução, esta somente entrará em condição de bloqueio na próxima passagem da corrente pelo valor nulo. As chaves utilizadas no ATP possuem esta característica operacional. Essa é uma das duas condições básicas de operação do controle de comutação descritas no item 3.2. Para certificar-se de que a chave está realmente aberta, o circuito de controle verifica, através de um dispositivo da rotina TACS que define o “status” (aberta ou fechada) das chaves eletrônicas, se a chave está realmente em condição de bloqueio antes de enviar o pulso de disparo para outra chave.

O registro do instante de tempo em que a corrente na carga é nula é feito utilizando variáveis do tipo 93 da TACS. Estas variáveis amostram a condição de operação das chaves dos *taps*, sendo que atribuem valor 0, à condição de chave aberta e valor 1, à condição de chave fechada, conforme ilustra a figura 3.3.

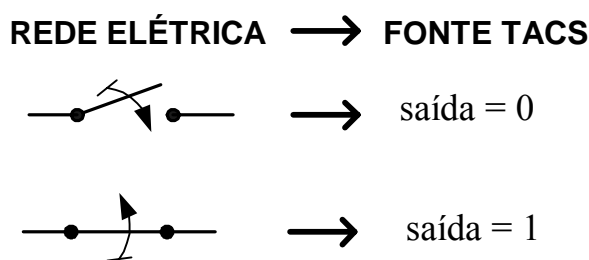


Figura 3.3: Variável tipo 93: Condição de operação da chave

O nome da variável do tipo 93 deve ser o mesmo nome do tap do circuito elétrico ao qual a chave está ligada. Assim, estas variáveis funcionam como fontes da TACS que possuem sempre amplitude unitária ou nula, dependendo do estado da chave. Dessa forma, o instante de tempo de corrente nula na carga é identificado quando as saídas de todas as fontes da TACS forem nulas, ou seja, instante de tempo em que todas as chaves estão abertas.

viii. (bloco 9) – REGISTRADOR DO INSTANTE DE TEMPO EM QUE A CORRENTE DE CARGA É NULA.

O ***bloco 9*** tem a função de registrar o instante de tempo em que a corrente na carga é nula. Obviamente, a partir deste instante de tempo, todas as chaves dos *taps* estarão em condição de bloqueio. Este registrador aguarda um retardo de tempo de 2 ms, após o instante de tempo em que todas as chaves estão abertas, para evitar a possibilidade de ocorrência de curto-circuito entre chaves ligadas a dois *taps* diferentes. Este retardo de tempo de 2 ms representa uma condição de segurança operacional do controle de comutação.

ix. (bloco 10) – SENSOR DE TENSÃO NA BOBINA DE EXCITAÇÃO.

Assim que o ***bloco 10*** recebe a informação de que as chaves estão todas abertas, procede-se uma monitoração da tensão na bobina de excitação a fim de registrar o instante de tempo em que essa tensão passa pelo valor nulo. A

segunda característica operacional do controle de comutação é que o fechamento das chaves estáticas ocorre somente nos instantes de passagem da tensão da bobina de excitação pelo zero.

Utilizando uma variável interna do tipo 90 da TACS, é possível amostrar a tensão da bobina de excitação a cada passo de integração. Essa variável funciona analogamente a um sensor de tensão fazendo a interface entre o circuito elétrico simulado no ATP e o sistema de controle inteligente de comutação modelado na TACS. O nome da variável tipo 90 é o mesmo nome do nó da rede elétrica no qual se deseja amostrar a tensão. A tensão amostrada é a tensão do nó em relação à referência interna de potencial elétrico do ATP.

A cada passo de integração, a tensão da bobina de excitação amostrada é comparada com o valor zero de modo que:

$$V_{\text{excita}} \begin{cases} > 0 \rightarrow \text{saída} = -1 \\ < 0 \rightarrow \text{saída} = +1 \end{cases}$$

O registro da passagem pelo zero da tensão na bobina de excitação é feito utilizando dispositivos comparadores do tipo 60 da TACS. A saída do comparador, conforme mostrada acima, é registrada a cada passo de cálculo. O sensor de tensão soma a saída do comparador, registrada no passo de integração anterior, com a saída do passo atual, de forma que, quando o valor absoluto da soma for zero, a tensão na bobina de excitação é nula e o bloco 10 pode então registrar este instante de tempo para que o controle de comutação ordene o fechamento da chave do tap adequado.

x. (bloco 11) – GERADOR DO PULSO DE DISPARO DAS CHAVES

Conforme descrito anteriormente, neste modelo de regulador de tensão, o controle automático de comutação somente comanda a abertura das chaves quando a corrente de carga é nula e o fechamento das chaves apenas no instante

de passagem da tensão da bobina de excitação pelo zero. Assim, estas duas condições devem ser atendidas para que o controle de comutação comande o disparo das chaves eletrônicas.

A geração do pulso de disparo das chaves está então sujeita a satisfação de duas condições:

- i. comandar o fechamento das chaves somente após o **bloco 8** transmitir a informação de que a corrente de carga está interrompida;
- ii. comandar o fechamento das chaves no instante de passagem da tensão na bobina de excitação pelo valor nulo.

É importante observar que essas duas condições devem ser satisfeitas antes que o controle comande o disparo de uma chave e, ainda, que a primeira condição é prioritária em relação à segunda, ou seja, somente após a corrente de carga ser interrompida é que o controle monitora a tensão na bobina de excitação e dispara a chave no instante de tensão nula.

xi. (bloco 12) – SELETOR DE TAP'S E DIRECIONADOR DE PULSO DE COMANDO PARA AS CHAVES.

O **bloco 12** tem a função de selecionar o tap adequado para regular a tensão na carga ao seu valor nominal ou ao valor o mais próximo possível deste. Além de selecionar o tap, este bloco também tem a função de direcionar o pulso de disparo para a chave ligada ao tap. A seleção do tap adequado para regular a tensão na carga é feita através de um dispositivo tipo 61 da TACS usado como seletor de *taps*. O seletor de *taps* possui 9 posições, sendo que cada uma está direcionada respectivamente a um dos *taps*, desde o tap 2A de redução até o tap 6E de elevação. A figura 3.4 ilustra o princípio de funcionamento do dispositivo do tipo 61 da TACS operando como seletor de *taps* do controle de comutação.

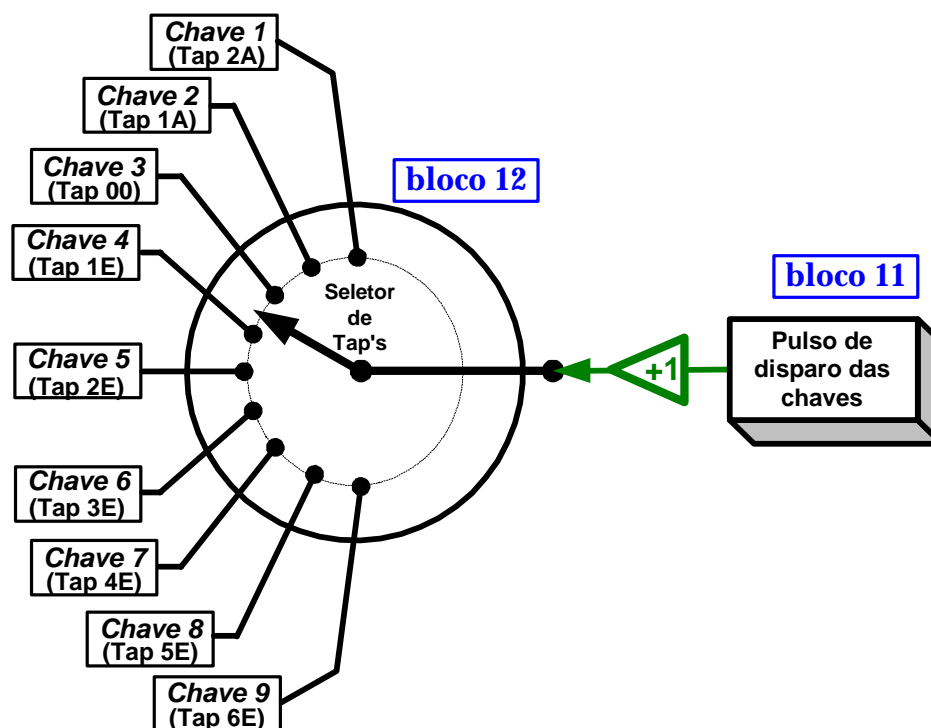


Figura 3.4 – Dispositivo tipo 61 da TACS - Seletor de *taps* e Direcionador de pulso para o disparo das chaves.

Para selecionar o tap que deverá ser acionado, o seletor utiliza duas informações:

- i. O *bloco 2* fornece a informação do valor de desvio de tensão. Através deste valor, o seletor de *taps* define o sentido de comutação (abaixar ou elevar) e o tap que deve ser acionado.
- ii. O controle de comutação registra a posição atual do seletor, a cada passo de integração.

Logo, o dispositivo seletor recebe a informação de quanto é o desvio de tensão na carga e a partir da sua posição atual, seleciona o tap adequado para restabelecer a tensão na carga. A definição de qual o tap que deve ser acionado é feita levando-se em conta a tensão entre *taps*. A figura 3.5 mostra o direcionamento de informações entre os *blocos 11* e *12*. É importante observar que, tanto o dispositivo posicionador quanto o dispositivo seletor de *taps* estão

inseridos dentro do *bloco 12*, representado no diagrama geral da lógica de comutação mostrado na figura 3.1.

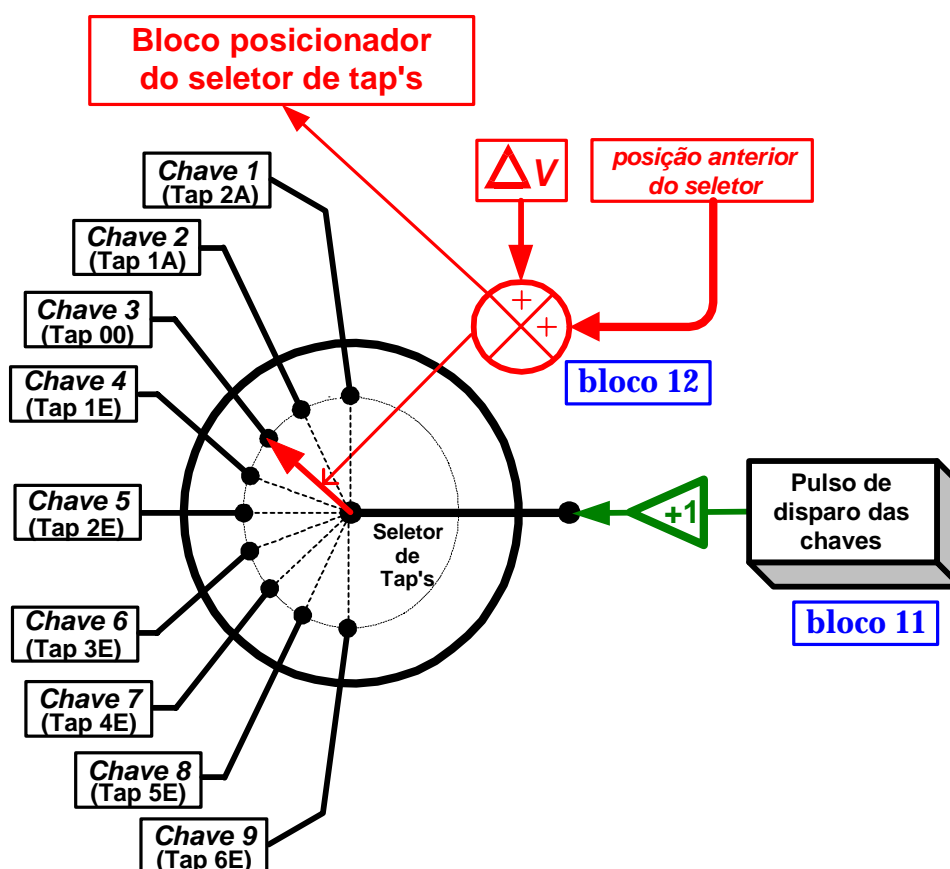


Figura 3.5 – Dispositivo tipo 61 da TACS - Direcionamento do pulso de controle para o disparo das chaves.

De maneira geral, o *bloco 12* recebe o pulso de disparo das chaves, e através do posicionador de *taps*, que utiliza as informações de desvio de tensão e posição anterior do tap, seleciona o tap que deve ser acionado. O *bloco 12* então direciona o pulso de disparo para a chave ligada a este tap.

Para o modelo de regulador com 9 *taps* aqui descrito, a capacidade de regulação de tensão é de 30% de elevação de tensão e 10% de redução de tensão. Sendo assim, duas condições extremas de operação do seletor de *taps*, devem ser observadas com atenção:

- Caso o seletor já esteja na posição de máxima elevação, ou seja, no tap 6E (30 % de queda de tensão na carga) e seja necessário elevar

ainda mais a tensão na carga, a lógica mantém o seletor na mesma posição;

- Caso o seletor esteja na posição de máxima redução de tensão, ou seja, no tap 2A (10% de sobretensão na carga), e seja necessário reduzir ainda mais a tensão na carga, a lógica também mantém o seletor na mesma posição.

Com o comando de disparo da chave, o processo de comutação é finalizado. O controle de comutação permite agora que o bloco 2 volte a fazer o cálculo do desvio da tensão da carga do seu valor nominal, a cada passo de integração, para que uma nova comutação seja iniciada caso ocorra uma variação de tensão na carga.

3.4. ADAPTAÇÕES DO CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO

O modelo de regulador de tensão com controle primário de comutação de *taps*, conforme descrito anteriormente, permite a ocorrência de comutações intermediárias, para algumas situações de simulação computacional que serão estudadas no capítulo V. Uma destas situações, por exemplo, trata-se de quando o regulador de tensão opera no tap 2A e ocorre um afundamento de tensão de 40% sendo necessário acionar o tap 6E para restabelecer a tensão na carga. Nesta situação de comutação entre os *taps* extremos, ocorre a energização de *taps* intermediários até que o tap 6E seja acionado. Essas comutações intermediárias são indesejadas pelo fato de reduzirem a eficiência do controle, aumentando o seu tempo de resposta. Dois são os motivos de ocorrência dessas comutações:

- O método de cálculo do valor rms da tensão da carga implementado no ATP é feito a cada meio ciclo. Os medidores de rms disponíveis

no mercado, utilizam métodos de medição que exigem de 3 a 8 ciclos de amostragem dos valores instantâneos para gerar um valor rms. É claro que neste tempo está incluído o tempo de processamento do equipamento. De qualquer maneira, conclui-se que estes medidores são muito mais lentos do que o método de cálculo implementado no ATP.

- O controle faz o cálculo do desvio de tensão (ΔV) a cada passo de integração sem levar em conta as diferentes taxas de variação da tensão na carga em relação ao tempo ($\Delta V / \Delta t$), ou seja, o controle primário de comutação não leva em consideração a velocidade com que a tensão na carga está variando no tempo.

Como o objetivo de implementar o controle inteligente de comutação de *taps* é reduzir o tempo de resposta do regulador para 3,0 ciclos, no máximo, o método de cálculo do valor rms da tensão na carga deve ser adequado ao objetivo almejado.

Assim, a estratégia adotada para evitar as comutações intermediárias de *taps* foi adaptar o controle automático para gerar um retardo de tempo após a

atuação do controle de comutação deve ser determinado através de um levantamento e estudo das cargas elétricas que serão conectadas ao regulador de tensão. O retardo de tempo de 25 ms para iniciar uma comutação de *taps* permite ao controle definir com mais precisão qual é o tap correto a ser acionado para restabelecer a tensão na carga. A idéia básica é de que durante o retardo de tempo de 25 ms a carga já tenha sofrido o afundamento de tensão nominal, permitindo que o controle execute um cálculo mais preciso do desvio de tensão total a ser corrigido com somente uma comutação de tap.

Após o início da comutação de *taps*, o controle bloqueia o cálculo de V por mais 25 ms até que a comutação iniciada seja finalizada sem que o controle comande outra nova comutação. Assim, o tempo total de comutação passa a ser de 50 ms.

Na lógica de controle primário anterior, que permite a ocorrência de comutações intermediárias, após o desvio de tensão identificado, o controle gera um pulso que bloqueia o cálculo de V por um tempo de 16,67 ms (1 ciclo). Simultaneamente ao bloqueio do cálculo de V , o controle comanda o bloqueio da chave que está em condução e determina a mudança de posição do seletor de *taps* para o tap que será acionado. Logo, o controle primário executa três comandos a partir do cálculo de V :

- Gera o pulso de bloqueio do cálculo de V por um ciclo, até que a comutação de tap seja finalizada;
- Torna o pulso de comando das chaves negativo e igual a -1 para bloquear a chave eletrônica que está em condução;
- Muda a posição do seletor de *taps* para direcionar o pulso de disparo da chave ligada ao tap que deve ser acionado a fim de restabelecer a tensão da carga ao seu valor nominal.

Agora, no controle inteligente adaptado para evitar as comutações para *taps* intermediários, após o primeiro cálculo de V , um dispositivo do controle

registra este instante de tempo e soma a este valor um retardo de tempo de 25 ms. O cálculo de V é zerado durante este retardo de tempo e somente após transcorrido o tempo de retardo é que o controle verifica novamente o valor de V . Se na segunda verificação do cálculo de V ainda houver variação de tensão na carga, o controle inicia imediatamente a operação de comutação de *taps*:

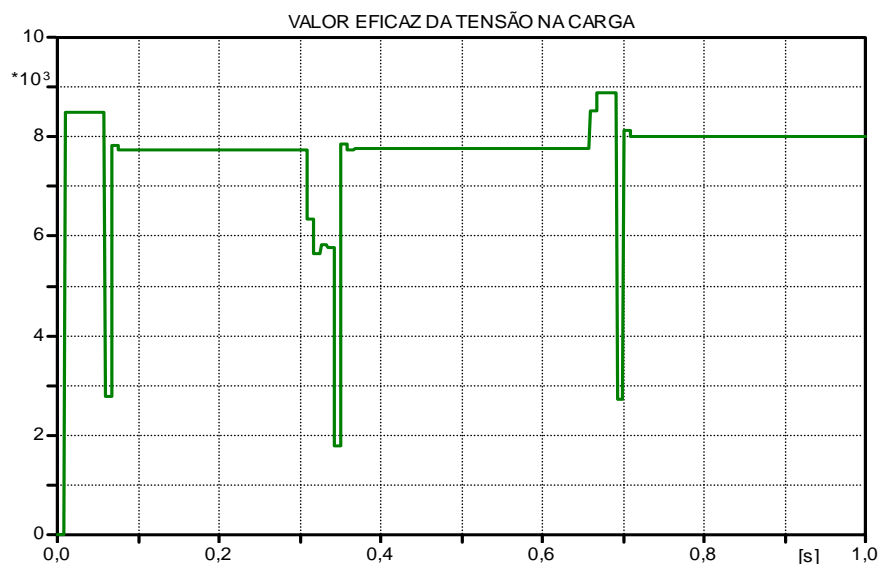
- Gera o pulso de bloqueio das chaves;
- Muda a posição do seletor de *taps*.

Se por outro lado, na segunda verificação do cálculo de V não houver mais a necessidade de comutação ($V < 3,5\%$), nenhuma ação é tomada pelo controle, e o cálculo do desvio de tensão prossegue normalmente.

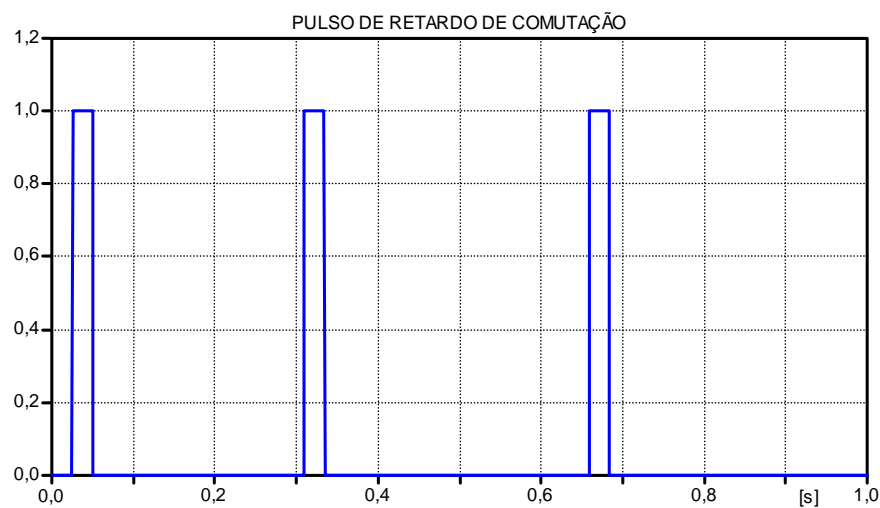
O retardo de 25 ms antes de iniciar a comutação de *taps*, é feito através de um pulso de retardo de comutação. Este pulso de retardo tem amplitude controlada pelo valor eficaz da tensão na carga. Este pulso possui amplitude igual a zero ou igual a 1, sendo que esta amplitude é controlada pelo medidor de rms do controle de comutação. Quando o pulso de retardo possui amplitude nula, o controle está pronto para iniciar uma operação de comutação. Porém quando o pulso de retardo possui amplitude unitária, o controle fica impedido de iniciar a comutação. Quando o medidor de rms informa um desvio de tensão maior do que 3,5% da tensão nominal, o pulso de retardo muda de estado. Por exemplo, no primeiro registro de $V > 3,5\%$, o valor inicial do pulso auxiliar era igual a zero e passa a ser unitário. No segundo registro de $V > 3,5\%$, realizado 25 ms depois do primeiro cálculo, o pulso de retardo tinha amplitude unitária e passa a ser nulo, permitindo o início do processo de comutação.

A figura 3.6 mostra as formas de onda da tensão eficaz da carga, do pulso de retardo de comutação e do pulso de controle das chaves. Nesta figura pode-se perceber o comportamento de cada uma dessas 3 variáveis e suas interdependências. Após uma variação da tensão eficaz na carga, o pulso de

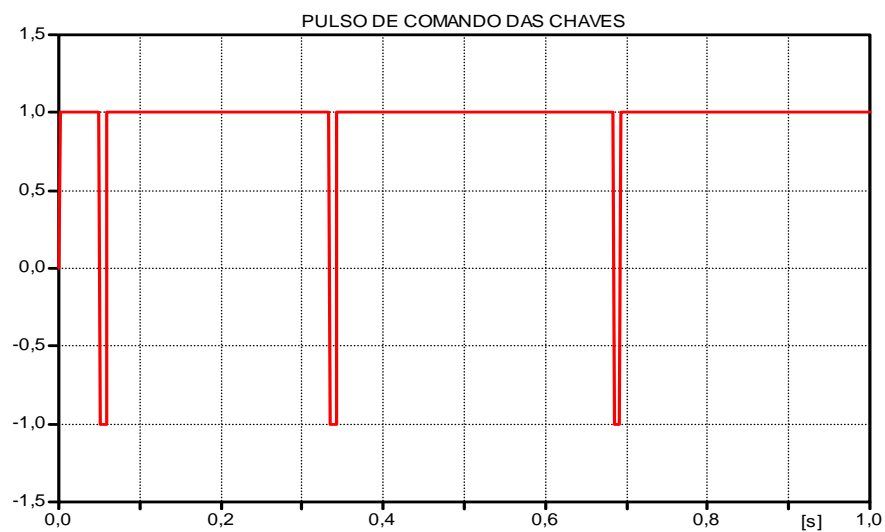
retardo de comutação muda de amplitude unitária para amplitude nula e permite uma nova verificação do desvio de tensão somente 25 ms após o cálculo inicial. Quando o pulso de retardo de comutação torna-se igual a zero, o pulso de comando das chaves muda de amplitude +1 para -1, comandando a abertura da chave que está em condução. Essa seqüência de passos compõe a lógica do controle inteligente.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6 - Condições para iniciar a operação de comutação de taps.

Um outro possível motivo de ocorrência das comutações intermediárias é a maneira como o controle eletrônico atua no seletor de *taps* e define para qual tap se deve fazer a comutação. O controle primário utiliza o bloco posicionador de *taps* para mudar a posição do seletor de *taps* e disparar a chave do tap adequado para restaurar a tensão na carga. Através do valor do desvio de tensão e da posição atual do seletor, determina-se para qual tap é feita a comutação.

Além da adaptação implementada na lógica do controle inteligente de comutação, ligada ao retardo no início da operação de comutação, uma segunda adaptação, e não menos importante, foi também acrescentada. Esta adaptação está ligada ao sistema de seleção de *taps*. O controle inteligente de comutação utiliza um sistema de seleção de *taps* que leva em consideração o arranjo magnético do modelo de regulador de tensão adotado.

O modelo de regulador de tensão aqui adotado possui para cada tap um número específico de espiras determinado de forma a compensar a variação da tensão na bobina de excitação, conforme apresentado no capítulo 2.

No arranjo adotado, como a bobina de excitação é submetida diretamente à tensão da fonte, que pode variar entre +10% e -30% da tensão nominal, conseqüentemente, a tensão induzida em cada tap também terá uma variação na mesma proporção, sendo então necessário um número de espiras diferenciado para cada tap a fim de que se possa obter a regulação de tensão desejada.

Com estas considerações feitas acerca do arranjo magnético do regulador de tensão, pode-se agora explicar a segunda adaptação implementada no método de seleção de *taps* feito pelo controle inteligente de comutação. Com as tensões induzidas específicas em cada tap, pode-se determinar os fatores de correção de tensão para cada um dos *taps*, conforme mostrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dimensionamento dos tap's para diferentes números de espiras.

I	TAP'S	TENSÃO NA CARGA [VOLTS]	FATOR DE CORREÇÃO DOS TAP'S.
1	TAP 2A	7245,0	0,9091
2	TAP 1A	7590,0	0,9523
3	TAP 00	7970	1,0000
4	TAP 1E	8389,0	1,0526
5	TAP 2E	8856,0	1,1111
6	TAP 3E	9376,0	1,1765
7	TAP 4E	9963,0	1,2500
8	TAP 5E	10627,0	1,3333
9	TAP 6E	11386,0	1,4286

Para uma melhor compreensão dos fatores de correção de tap apresentados na tabela 3.1, apresenta-se a seguir o exemplo de cálculo do fator de correção de tensão do tap 1A. Os fatores de correção de tensão dos *taps* são calculados quando a tensão nominal está aplicada na bobina de excitação do regulador, ou seja, a tensão no tap 00 é de 7970 V. A tensão entre os *taps* 1A e 00 é de 380 Volts. Logo, a tensão aplicada na carga, quando o tap 1A for acionado será dada pela diferença entre a tensão do tap 00 e a tensão entre os *taps* 1A e 00, ou seja, $7970 - 380 = 7590$ Volts. A razão entre a tensão aplicada na carga e a tensão nominal fornece o fator de correção de *taps* do tap 1A, conforme mostra a equação 3.3.

$$fc_{1A} = \frac{7590}{7970} = 0,9523 \quad (3.3)$$

De maneira geral, os fatores de correção de *taps* são calculados pela equação 3.4. Esta equação permite o cálculo dos fatores de correção para os *taps* de elevação (1E, 2E, 3E, 4E, 5E e 6E) e redução de tensão (1A e 2A).

$$fc_i = \left(\frac{V_i}{7970} \right) \Bigg|_{i=1}^{i=9} \quad (3.4)$$

onde:

- fc_i é o fator de correção de tensão do tap i ;
- V_i é o valor da tensão no tap i ;

Os fatores de correção de tensão dos *taps* representam a relação entre a tensão que cada tap aplica na carga em por unidade da tensão na bobina de excitação, conforme mostra a figura 3.7.

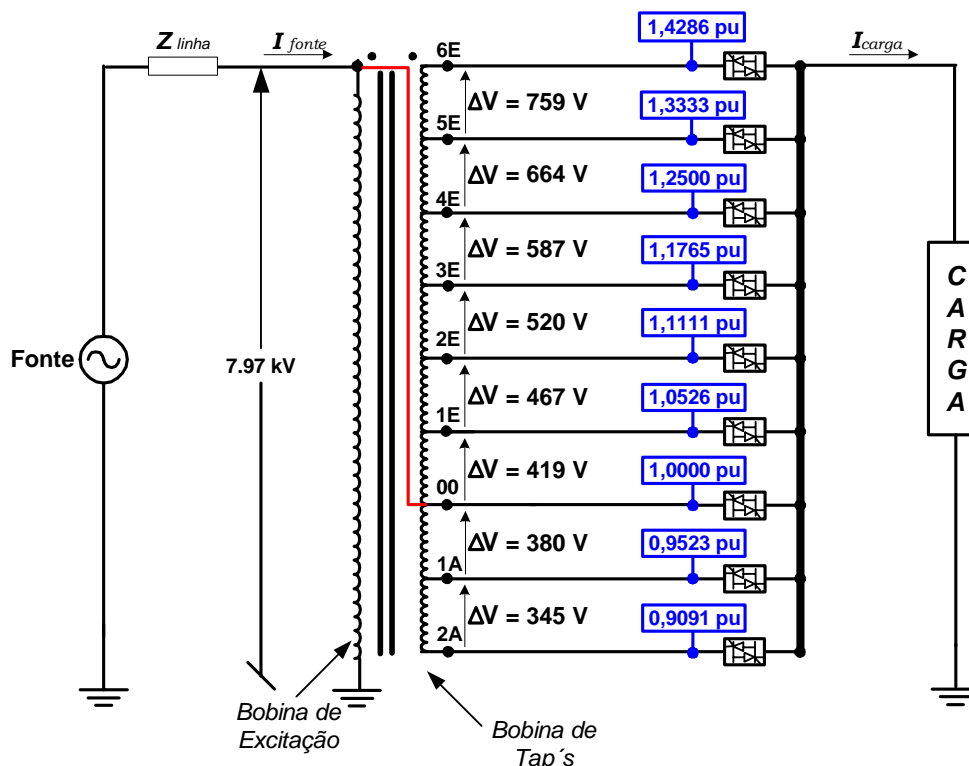


Figura 3.7 - Regulador de tensão com 9 degraus, com tensões induzidas específicas para cada tap e fatores de correção de *taps*.

No controle inteligente de comutação, a seleção de *taps* é feita da seguinte maneira:

- Primeiro, calcula-se o valor eficaz da tensão na carga;
- Verifica-se qual é o tap que está conduzindo e o seu respectivo fator de correção de tensão.
- Calcula-se o valor eficaz da tensão na bobina de excitação através da razão entre o valor eficaz da tensão na carga pelo fator de correção do tap que está conduzindo.
- Determina-se o tap para o qual deverá ser feita a comutação.

Um diagrama de blocos representativo da lógica de seleção de *taps* do regulador de tensão com controle inteligente de comutação é mostrado na figura 3.8.

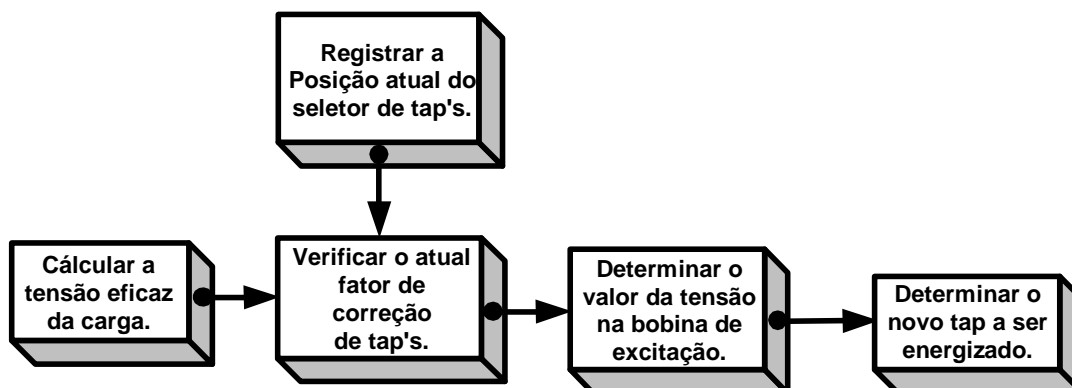


Figura 3.8 – Lógica de seleção de *taps* no controle inteligente de comutação.

O cálculo do valor eficaz da tensão na carga é feito utilizando o mesmo método do controle primário, sem nenhuma modificação. Quando o controle inteligente identifica um desvio de tensão na carga, um dispositivo verifica qual é o tap que está em condução, registra a posição atual do seletor de *taps* e identifica o fator de correção de tensão deste tap, utilizando os valores mostrados na tabela 3.1. Em seguida o controle de comutação calcula o valor da tensão na bobina de excitação do regulador através da razão entre o valor eficaz da tensão da carga e o fator de correção do tap que está acionado.

$$V_{\text{ENTRADA}} = \frac{V_{\text{CARGA}}}{f_{c_i}} \quad (3.5)$$

onde:

- V_{ENTRADA} é o valor eficaz da tensão na bobina de excitação ;
- V_{CARGA} é o valor eficaz da tensão da carga;
- f_{c_i} é o atual fator de correção de tensão do tap i , que está em condução.

De posse do valor da tensão na bobina de excitação, determina-se qual é o tap que deve ser acionado. O tap a ser acionado é aquele que possuir um fator de

correção de tensão de modo a aplicar a tensão nominal na carga, sendo calculado pela equação 3.5, fazendo a variável V_{CARGA} igual a 7970. Uma vez determinado qual deve ser o fator de correção do tap adequado para restaurar a tensão na carga, o controle compara este fator de correção com as médias dos fatores de correção entre os *taps* e define qual o tap que deve ser acionado.

Cada porção de enrolamento entre dois tap's consecutivos possui um valor médio dos fatores de correção de tensão dos *taps*, conforme mostrado na tabela 3.2. O controle de comutação utiliza os valores médios dos fatores de correção de tensão mostrados na coluna 3 da tabela 3.2 para definir qual é o tap a ser acionado. Assim, se o fator de correção de tensão calculado pelo controle for maior do que o fator de correção médio da porção de enrolamento, o controle aciona o tap superior da porção de enrolamento. Se o fator de correção calculado pelo controle for menor ou igual do que o fator de correção médio, o controle aciona o tap inferior. Por exemplo, se o novo fator de correção de tap calculado pelo controle inteligente for igual a 1,2132 o controle selecionará o tap 3E. Já para um fator de multiplicação de 1,0820, o tap selecionado será o tap 2E.

Essa se constitui na última adaptação necessária para a implementação do controle inteligente de comutação. Esse controle inteligente de comutação será utilizado no capítulo IV para avaliar os resultados de simulação computacional do modelo de regulador com comutação eletrônica de *taps* em contrapartida ao modelo de regulador com comutação mecânica.

Tabela 3.2: Médias dos fatores de correção entre *taps* adjacentes.

PORÇÃO DE ENROLAMENTO	FATOR DE CORREÇÃO DOS TAPS.	MÉDIA DOS FATORES DE CORREÇÃO DE TAPS
TAP 2A	0,9091	0,9308
TAP 1A	0,9523	
TAP 1A	0,9523	0,9762
TAP 00	1,0000	
TAP 00	1,0000	1,0263
TAP 1E	1,0526	
TAP 1E	1,0526	1,0819
TAP 2E	1,1111	
TAP 2E	1,1111	1,1438
TAP 3E	1,1765	
TAP 3E	1,1765	1,2133
TAP 4E	1,2500	
TAP 4E	1,2500	1,2917
TAP 5E	1,3333	
TAP 5E	1,3333	1,3810
TAP 6E	1,4286	

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou inicialmente uma proposta de controle de comutação primário cuja lógica permitia a ocorrência de comutações intermediárias de *taps*, aumentando o tempo de resposta do regulador de tensão. A partir dessas observações, algumas adaptações foram implementadas na lógica deste sistema de controle primário promovendo o seu aprimoramento para um sistema de controle inteligente.

A eficiência do controle inteligente com as adaptações necessárias para permitir o acionamento do tap correto com o menor número possível de

comutações será analisada no capítulo V, através de simulações computacionais do regulador de tensão alimentando diferentes tipos de cargas com fatores de potência típicos das redes de distribuição. Os resultados das simulações serão também utilizados para demonstrar a redução do tempo de atuação do controle de comutação e analisar a operação antes e após a implementação das adaptações descritas neste capítulo.

A lógica de controle de comutação implementada no regulador de tensão teve suas características operacionais definidas com a finalidade de impedir que a tensão na carga permaneça fora dos limites de variação de tensão estabelecidos pela legislação e aumentar a eficiência de operação do regulador de tensão. Porém, o tipo de controle inteligente de comutação descrito permite que outros ajustes sejam feitos na sua lógica, a fim de atender a aplicações mais específicas do regulador de tensão. Percebe-se que há uma relação direta entre a velocidade de atuação do controle e o número de comutações de tap necessário para restaurar a tensão na carga e, ainda, que o tempo de atuação do controle de comutação deve ser ajustado levando-se em consideração as constantes transitórias de tempo das cargas que estão sendo alimentadas pelo regulador de tensão. Logo, este tipo de equipamento com controle eletrônico precisa disponibilizar ao seu usuário um menu de opções, definidas, por exemplo, através de um *display*, que permita ao usuário ajustar os parâmetros da lógica do controle de comutação às características do nó do sistema elétrico onde o regulador de tensão será instalado.

Foram apresentados ainda alguns dos dispositivos da rotina TACS disponíveis no programa ATP, utilizado como plataforma computacional para o desenvolvimento da lógica do controle inteligente de comutação.

CAPÍTULO IV

SIMULAÇÕES DO REGULADOR DE TENSÃO COM SISTEMA DE CONTROLE PARA COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE *TAPS*

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o objetivo de avaliar o desempenho do controle inteligente de comutação de *taps* desenvolvido no capítulo III, apresenta-se neste capítulo os resultados de simulações computacionais, utilizando o modelo de regulador de tensão de 9 degraus com o arranjo magnético adotado no capítulo II. De forma mais objetiva, o presente capítulo destina-se à análise dos resultados de simulação da operação do regulador de tensão com o controle inteligente de comutação alimentando cargas com diferentes fatores de potência. A análise dos resultados contempla os aspectos relacionados à forma de onda da tensão e da corrente na carga e a forma de onda da tensão nas chaves, bem como as sobretensões transitórias às quais as chaves estarão submetidas no momento de comutação de *taps*.

As oscilações transitórias, quer sejam de corrente ou de tensão, originadas nas comutações, são dependentes das perdas elétricas nos sistemas e da modelagem que, originalmente, foi representada por um único ramo RL em série, apresentou oscilações de grande amplitude na tensão das chaves e conseqüentemente, maiores solicitações de tensão (dv/dt), devido

ao fato de não considerar o amortecimento desses transitórios de comutação proporcionado por arranjos de cargas que são mais comuns nos sistemas elétricos.

Como é sabido, a carga de um regulador comumente será o resultado de uma composição em paralelo de diversos tipos de cargas, sendo cada uma representada por uma associação conveniente de parâmetros R, L e C. A representação adequada das cargas poderá modificar significativamente as oscilações transitórias mostradas nos instantes de comutação.

Durante as comutações do regulador, a chave do tap 6E estará sempre sujeita à maior solicitação de tensão, independente da operação de elevar ou reduzir a tensão na carga. Dessa forma, a tensão sobre esta chave servirá para estabelecer os limite de tensão de bloqueio das chaves ligadas aos demais *taps*. Por este motivo, somente a tensão sobre a chave do tap 6E será analisada neste capítulo.

Outro objetivo proposto é buscar identificar a melhor e a pior condição de operação deste modelo de regulador de tensão, bem como determinar as solicitações de tensão sob as quais as chaves poderão estar submetidas, sendo que essa característica é fundamental para a especificação das chaves eletrônicas que devem ser utilizadas na possível construção do equipamento.

Este capítulo está estruturado da seguinte maneira: inicialmente, serão mostrados os resultados da operação do regulador de tensão monofásico alimentando uma carga representada por um único ramo RL ligado em série, para a análise das sobretensões transitórias nas chaves. Posteriormente, são apresentados os resultados da operação do regulador de tensão monofásico alimentando arranjos de cargas mais reais, comumente encontrados nos sistemas elétricos, com o controle primário de comutação e com o controle inteligente de comutação a fim de comparar o desempenho de ambos.

Finalmente, realiza-se a simulação do regulador de tensão trifásico ligado em delta fechado com controle de comutação.

A tabela 4.1 mostra um resumo dos casos a serem estudados neste capítulo.

Tabela 4.1: Casos de operação do regulador de tensão considerados neste capítulo

CASOS SIMULADOS	DESCRIÇÃO
CASO 1	Simulação do regulador de tensão de 9 degraus com o controle primário de comutação
CASO 2	Simulação do regulador de tensão de 9 degraus com o controle inteligente de comutação
CASO 3	Simulação do regulador de tensão trifásico de 9 degraus com controle de comutação

A comparação entre os sistemas de controle de comutação primário e inteligente leva em conta critérios de desempenho como o tempo total de comutação e o número de comutações necessárias para restabelecer a tensão na carga. O objetivo primordial é realizar a operação de comutação de *taps* com uma duração máxima de três ciclos.

A topologia do controle primário de comutação utiliza uma lógica muito semelhante à dos sistemas de controle de comutação existentes atualmente, ou seja, o bloqueio das chaves estáticas ocorre somente nos instantes de passagem da corrente pelo valor nulo e o disparo das chaves ocorre somente nos instantes de passagem da tensão da bobina de excitação pelo zero. Estas duas condições de operação estão presentes na grande maioria dos controles de comutação disponíveis atualmente. Desta forma, os resultados obtidos para a operação do regulador com o controle primário retratam o desempenho dos atuais sistemas de controle e permitem a comparação destes com o controle inteligente de comutação desenvolvido neste trabalho.

O controle automático de comutação implementado neste modelo de regulador de tensão foi desenvolvido com o objetivo de definir o tempo mínimo

necessário para a comutação de *taps*, partindo-se do princípio de que o mesmo deverá operar com um controle adequado.

Observa-se que, devido ao fato de ter-se elaborado um sistema de controle com resposta imediata a qualquer distúrbio de tensão, o mesmo, por vezes, tomará a decisão de comutar para um determinado tap antes mesmo que a tensão na carga tenha se estabelecido em um patamar definitivo. Caso isso ocorra, o sistema de controle fará uma nova comutação até que a tensão na carga fique dentro dos limites pré-estabelecidos.

4.2. SIMULAÇÕES DO REGULADOR COM

das cargas de 1,87 MVA é desligada do sistema, provocando uma elevação súbita da tensão na carga. O regulador de tensão, que estava operando no tap 6E (posição 30% de elevação de tensão da fonte), comanda a comutação para os *taps* de redução de tensão a fim de manter a tensão nominal na carga. A figura 4.1 apresenta a forma de onda da tensão na bobina de excitação do regulador, conforme as características do distúrbio de tensão descritas acima. Destaca-se que a tensão na bobina de excitação mostrada na figura 4.1 é a mesma para todos os casos simulados e portanto não será repetida posteriormente.

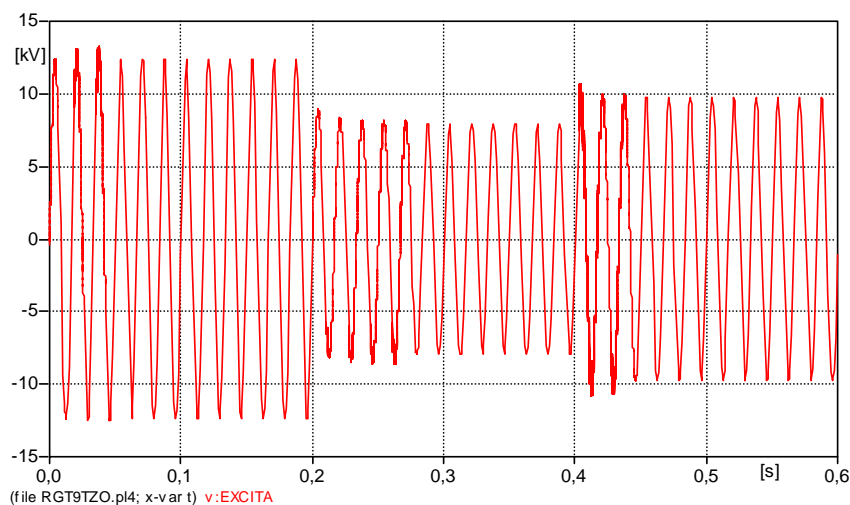


Figura 4.1: Forma de onda da tensão na bobina de excitação do regulador.

A seguir apresentam-se os resultados dos casos simulados enfocando os transitórios de comutação e as variações de tensão às quais as chaves ficam sujeitas.

4.3. CASO 1: OPERAÇÃO DO REGULADOR COM CONTROLE PRIMÁRIO DE COMUTAÇÃO

Neste item apresentam-se os resultados de operação do regulador com o controle primário de comutação em dois casos considerados, conforme mostra a tabela 4.2:

Tabela 4.2: Estudos de casos simulados do regulador com o controle primário

CASOS SIMULADOS	DESCRIÇÃO
CASO 1.1	Regulador de tensão alimentando uma carga de 100 A e fator de potência 0,707 indutivo – Ramo RL série.
CASO 1.2	Regulador de tensão alimentando uma carga de 100 A e fator de potência 0,94 indutivo – Arranjo formado por cinco cargas em paralelo.

4.3.1. **CASO 1.1: REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100 A REPRESENTADA POR UM ÚNICO RAMO RL SÉRIE, COM FATOR DE POTÊNCIA 0,707 ATRASADO**

Neste caso, o regulador de tensão alimenta uma carga RL série concentrada em um único ramo, ou seja, quando acontecer o desligamento da carga, as sobretensões transitórias observadas nas chaves são mais acentuadas devido ao fato de o circuito elétrico formado pela carga e a capacitância de fuga da bucha de carga apresentar a menor condição de amortecimento do transitório.

A forma de onda da tensão na carga apresenta oscilações transitórias de grandes amplitudes e pouco amortecidas nos instantes de comutação conforme pode ser observado na figura 4.2.

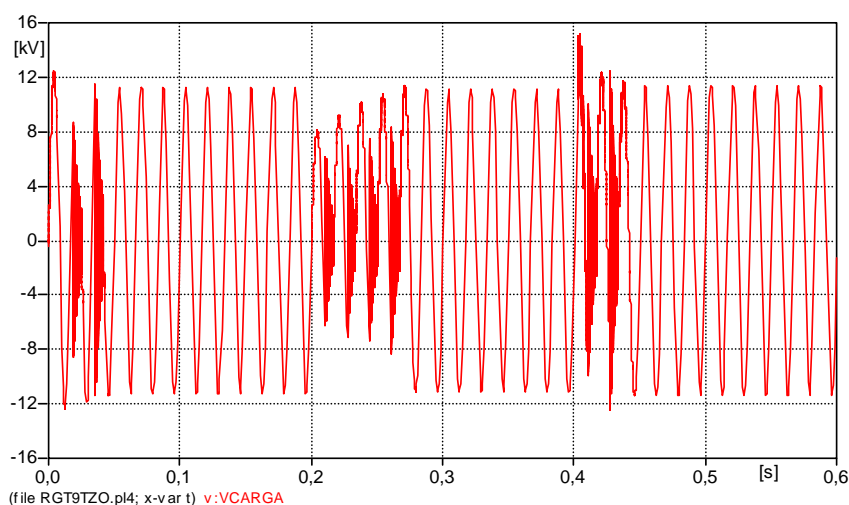


Figura 4.2: Forma de onda da tensão na carga.

Uma ampliação da figura 4.2 durante as duas primeiras comutações é mostrada na figura 4.3 e evidencia as oscilações transitórias que ocorrem durante a operação de comutação de *taps*.

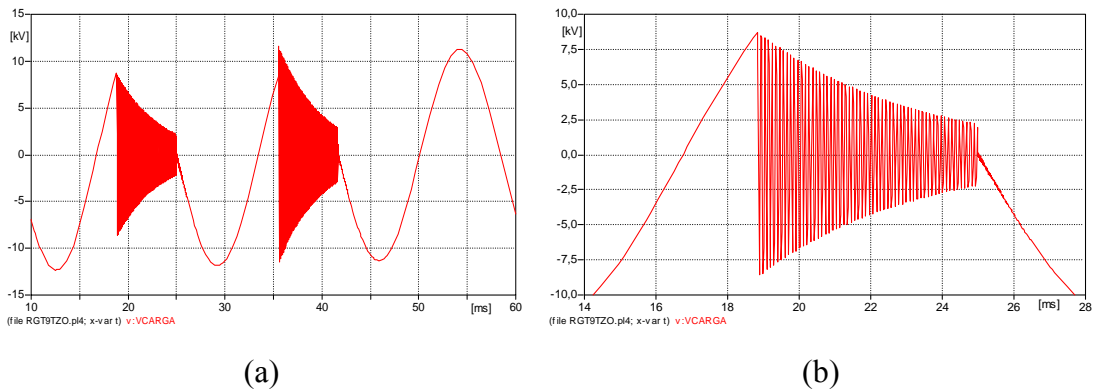


Figura 4.3: Oscilações transitórias na tensão da carga durante a comutação de *taps*

(a) Oscilações durante as duas primeiras comutações;

(b) Zoom da primeira comutação de *taps*.

A figura 4.4 apresenta o perfil de tensão eficaz na carga. Nesse caso o valor eficaz da tensão na carga é calculado a cada meio ciclo e apresentado no meio ciclo seguinte, conforme descrito no capítulo III.

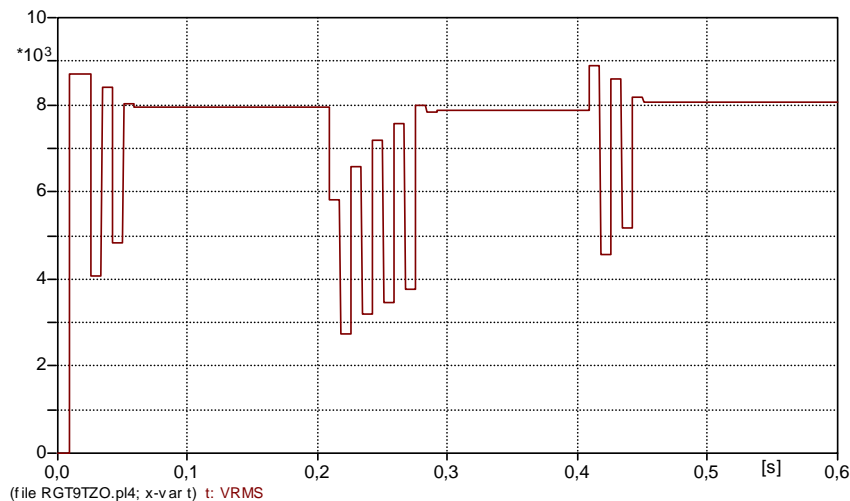


Figura 4.4: Tensão eficaz na carga.

Conforme relatado anteriormente no item 4.2, a figura 4.4 mostra a sobretensão na fonte de alimentação do regulador com um valor inicial de 10%, que, após ser identificada pelo controle primário, determina a comutação do

regulador de tensão para o tap 2A, restabelecendo a tensão nominal na carga (7.970 V). Em $t = 200$ ms são energizadas as impedâncias que simulam o afundamento momentâneo da tensão na carga. Nesse instante, o valor eficaz da tensão na carga cai subitamente, forçando o controle primário de comutação a realizar quatro operações de comutação sucessivas através dos *taps* de elevação de tensão, comutando do tap 2A para o tap 2E, do tap 2E para o tap 4E, do tap 4E para o tap 5E e finalmente do tap 5E para o tap 6E. O valor nominal da tensão eficaz na carga é então restabelecido novamente em 7,8 kV. Em $t = 400$ ms, uma das impedâncias que causam o afundamento de tensão é desligada do sistema, provocando uma elevação do valor eficaz da tensão na carga, novamente o controle do regulador comanda a comutação para a redução da tensão na carga, comutando do tap 6E para o tap 4E, e em seguida comutando do tap 4E para o tap 3E. Dessa forma, a tensão eficaz na carga retorna novamente a um valor próximo do nominal. Através da figura 4.4 é possível ainda concluir que o valor eficaz da tensão na carga é reduzido drasticamente durante os instantes de comutação, devido ao tempo de bloqueio das chaves.

Para que o controle primário de comutação realizasse a comutação entre os *taps* extremos (tap 2A para o tap 6E) foram necessárias quatro comutações para *taps* intermediários. A forma de onda da corrente na carga é mostrada na figura 4.5. A corrente de carga possui uma componente DC que é rapidamente amortecida.

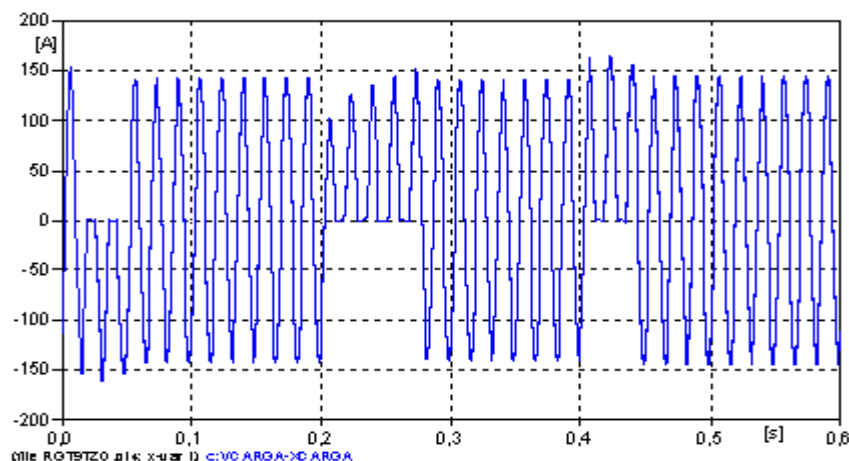


Figura 4.5: Forma de onda da corrente na carga.

A figura 4.6 ilustra a forma de onda da tensão entre os terminais da chave do tap 6E onde se pode observar as sobretensões transitórias nas chaves.

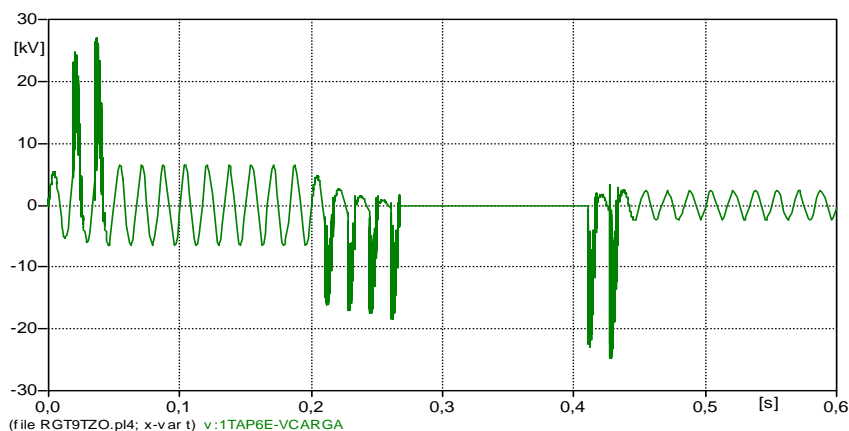


Figura 4.6: Forma de onda da tensão na chave do tap 6E.

A figura 4.7 mostra uma ampliação da figura 4.6, focalizando o ponto de ocorrência da maior sobretensão na chave do tap 6E, correspondente o instante de comutação do tap 1A para o tap 2A.

Nessa figura, observa-se que, no período em que a corrente na carga é interrompida, a tensão entre os terminais da chave do tap 6E oscila numa alta frequência e com um pequeno amortecimento. Esse fato é devido ao circuito oscilante formado pela capacitância de fuga da bucha de saída do regulador, que é muito pequena, e o circuito RL da carga. Após o fechamento da chave do tap 2A nota-se uma oscilação em uma frequência ainda maior e mais amortecida, que é devido às capacitâncias entre os enrolamentos do regulador.

O perfil de sobretensão originada durante os transitórios de comutação, são apresentadas em detalhe na figura 4.7.

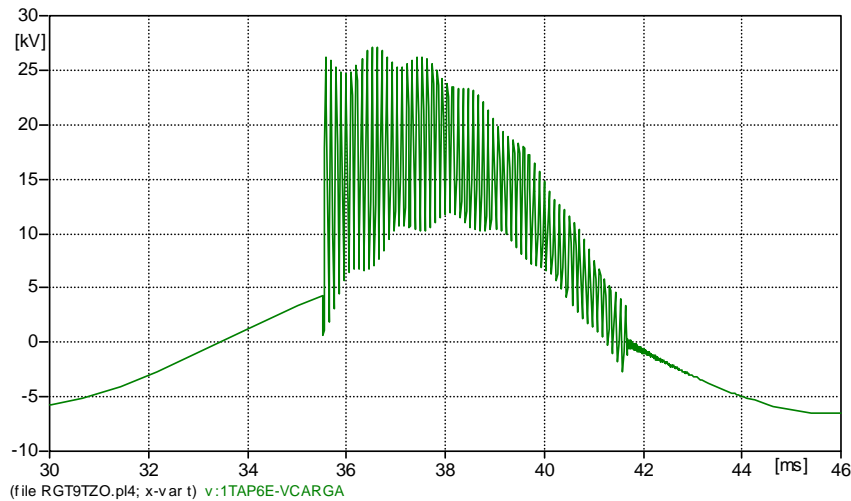


Figura 4.7: Sobretensões transitórias na chave do tap 6E durante a comutação entre os *taps* 1A e 2A.

Portanto, durante a comutação, as chaves ficam sujeitas a sobretensões transitórias que oscilam em frequências definidas pelas características do regulador de tensão, como a capacitância de fuga das buchas e dos enrolamentos e as características da carga, levando-se em consideração a forma como esta é representada.

Considerando a carga representada pela impedância RL série, a figura 4.8 a seguir mostra o circuito oscilante formado no momento da interrupção da corrente na carga. Nesse circuito, a tensão no capacitor oscila com a frequência ω_0 e Z_0 é a sua impedância característica.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.2)$$

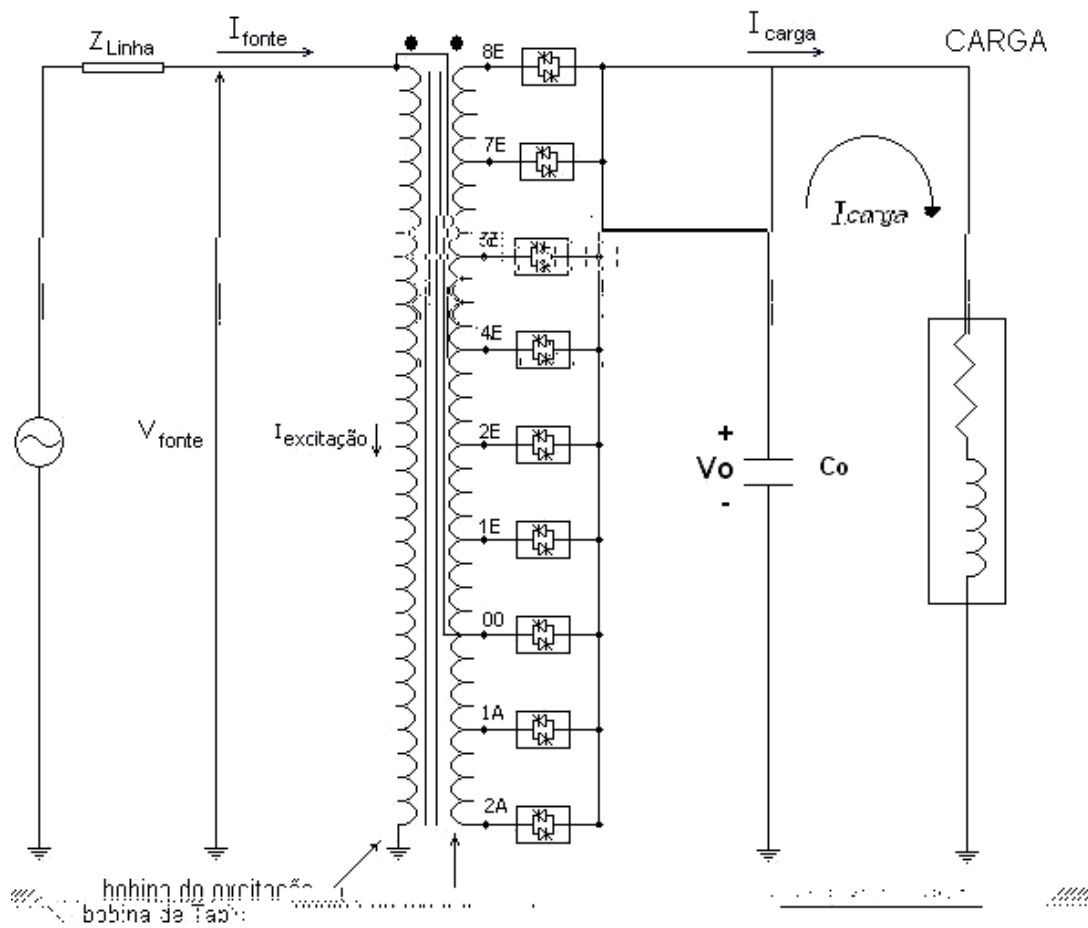


Figura 4.8: Circuito oscilante formado no momento de interrupção da corrente de carga.

Como C_0 é muito pequeno, ambos ω_0 e Z_0 são muito elevados e, comumente, $R \ll Z_0$, o que torna as oscilações levemente amortecidas.

Todavia, se a carga fosse representada por um circuito RL paralelo, a condição na qual $R \ll Z_0$ seria favorável a um maior amortecimento das oscilações.

A tensão entre os terminais das chaves é mais crítica para o tap 6E e o seu valor de crista pode ser determinado considerando-se a situação extrema (sem nenhum amortecimento), dada por:

$$V_{pico} = 1,3V_m + V_0 \quad (4.3)$$

onde:

V_m é o valor de crista da tensão da fonte da alimentação;

V_0 é a tensão no capacitor no instante da interrupção da corrente.

Observando que nas condições simuladas o valor de pico da tensão na fonte é $(1,1 \times 2 \times 7.970)$, a tensão na chave do tap 6E poderia ultrapassar a 27 kV, dependendo do tipo de carga.

4.3.2. CASO 1.2: REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100 A E FP = 0,94 ATRASADO, FORMADA PELA ASSOCIAÇÃO DE CINCO CARGAS EM PARALELO

Nesta simulação, o regulador de tensão está conectado a um barramento de carga que alimenta cinco cargas:

- Quatro cargas indutivas: 25 A - fp = 0,92; 25 A - fp = 0,95;
25 A - fp = 0,97 e 23,7 A - fp = 0,078 ;
- Uma carga capacitiva de 25A e fator de potência 0,85.

O objetivo de simular uma situação em que a carga suprida pelo regulador de tensão seja composta pela associação de cinco cargas com diferentes fatores de potência, de tal forma que a impedância equivalente dessa composição represente uma carga de 100A e fator de potência 0,94 atrasado, é justificado pelo fato de que, em sistemas elétricos, dificilmente ocorrerá a situação em que o regulador alimentará uma única carga, como analisado no caso anterior. Normalmente, o regulador estará conectado a um barramento de cargas formado por uma composição aleatória de várias cargas. O arranjo de cargas simulado neste caso permitiu o amortecimento das oscilações transitórias observadas na forma de onda da tensão nas chaves e na tensão da carga, originadas nos momentos de comutação, representando de maneira mais fiel as perdas nos sistemas elétricos reais. Este caso representa um tipo de arranjo de cargas normalmente encontrado nos sistemas de transmissão e distribuição de energia

elétrica, com diversos consumidores. A figura 4.9 mostra a forma de onda da tensão na carga.

A análise da forma de onda da tensão na carga, apresentada na figura 4.9, permite concluir que o efeito da composição de cargas é amortecer de forma significativa as oscilações de tensão originadas pela comutação do regulador. O banco de capacitores que compõe o arranjo de cargas mantém a tensão no barramento de cargas em condição superamortecida.

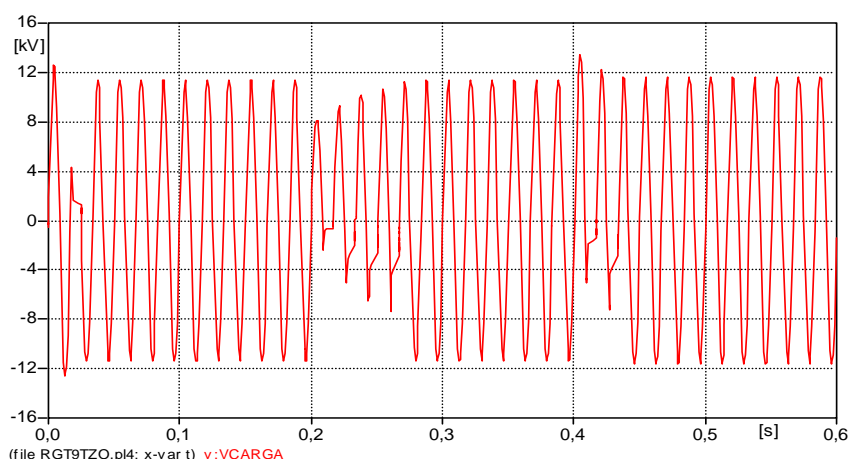


Figura 4.9: Tensão na carga.

Para esta configuração de cargas, o controle comanda a comutação para redução de tensão através do tap 00 para o tap 2A. Após o afundamento de tensão em $t = 200$ ms, o controle primário identifica a necessidade de elevar a tensão na carga e comanda comutações sucessivas para os *taps* 2E, 4E, 5E e 6E. Após a retirada de uma das impedâncias responsáveis pelo afundamento de tensão na fonte, a comutação ocorre do tap 6E para o tap 4E e em seguida do tap 4E para o tap 3E, mantendo a tensão nominal na carga. A figura 4.10 mostra os valores eficazes da tensão na carga. Neste caso, foram necessárias quatro comutações para que o controle execute a comutação entre os *taps* extremos.

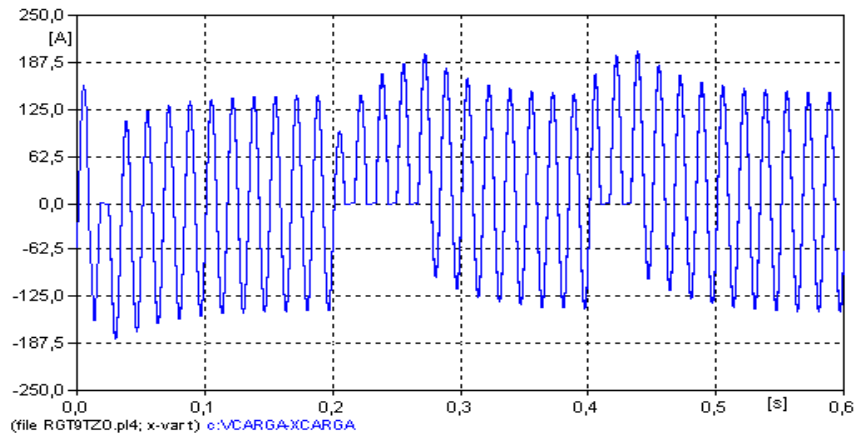


Figura 4.11: Forma de onda da corrente na carga.

A observação da forma de onda da tensão na chave do tap 6E mostrada na figura 4.12 deixa claro que houve uma redução da diferença de potencial sobre a chave. As oscilações transitórias presentes na tensão das chaves, no caso 1 anterior, foram acentuadamente atenuadas, tanto no momento de bloqueio quanto no momento de disparo das chaves. O valor de pico da tensão na chave do tap 6E atingiu o valor máximo de 18 kV.

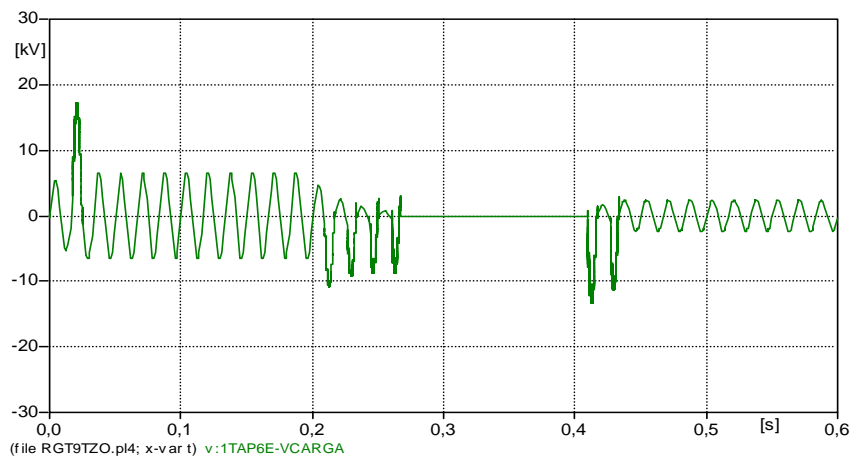


Figura 4.12: Forma de onda da tensão na chave do tap 6E.

4.4. CASO 2: OPERAÇÃO DO REGULADOR COM CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO

Posteriormente à análise da operação do regulador de tensão com o controle primário de comutação de *taps*, apresenta-se, neste item, os resultados da implementação do controle inteligente de comutação no regulador de tensão. Com o objetivo de demonstrar os benefícios da implementação do controle inteligente de comutação, comparado à operação do regulador de tensão com o controle primário de comutação, serão apresentados os resultados da operação do regulador de tensão com o controle inteligente alimentando uma carga mista de 100 A e fator de potência 0,94 atrasado. Neste caso, as mesmas características de simulação consideradas no caso 1.2 do item 4.3.2 foram mantidas, assim como a composição de cargas alimentadas pelo regulador.

A figura 4.13 mostra o perfil de tensão eficaz na carga. A comparação dos perfis obtidos com os controles primário e inteligente evidencia a maior eficiência na operação do regulador com este último.

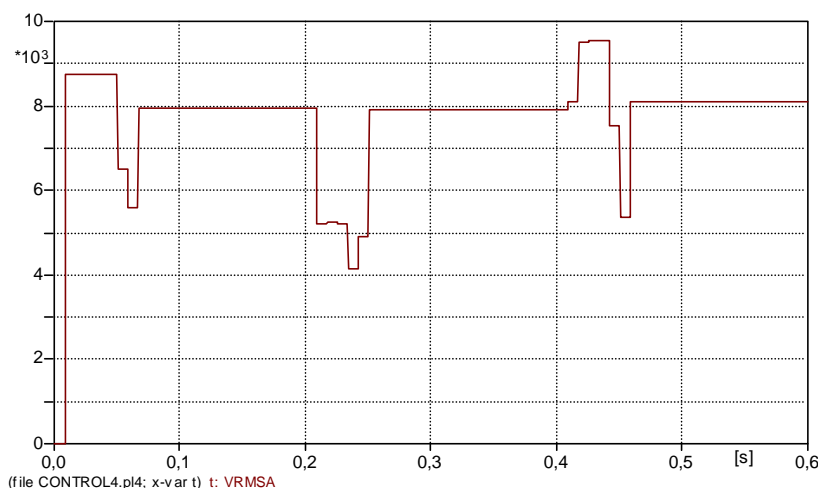


Figura 4.13: Perfil da tensão eficaz na carga com a operação do controle inteligente de comutação.

Enquanto que no controle primário são necessárias três comutações para realizar a comutação entre os *taps* extremos do regulador (*taps* 2A e 6E), a partir

do instante de tempo $t = 200$ ms, o controle inteligente realiza somente uma única comutação de *taps*, diretamente do tap 2A para o tap 6E, restabelecendo a tensão na carga sem o acionamento de *taps* intermediários. Outra característica importante a ser observada é que, além de reduzir o número de comutações necessárias para realizar a mesma regulação de tensão na carga, o tempo de resposta do controle inteligente é também reduzido, o que se traduz no aumento de eficiência operacional do regulador. Além disso, o controle inteligente submete a carga à afundamentos de tensão de menor amplitude durante os instantes de comutação, devido aos aprimoramentos implementados na lógica deste sistema de controle. Do ponto de vista de funcionamento do regulador em regime transitório, o controle inteligente tem ainda como outra vantagem a redução da quantidade de sobretensões que ocorrem nas chaves estáticas, uma vez que o regulador é capaz de restaurar a tensão na carga com um número reduzido de comutações de *taps*. Esse aspecto é desejável por representar um aumento da confiabilidade operacional do equipamento devido à redução do número de solicitações de tensão impostas às chaves estáticas.

A figura 4.14 apresenta a forma de onda da tensão na chave do tap 6E.

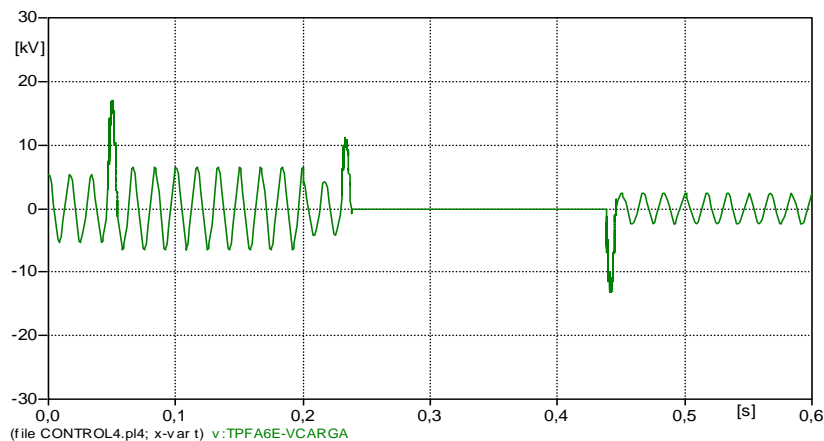


Figura 4.14: Forma de onda da tensão na chave do tap 6E.

Assim como no caso 1.2, as sobretensões nas chaves são atenuadas devido ao arranjo de cargas alimentadas pelo regulador, com o mesmo nível de solicitação de tensão que foi de 18 kV.

A figura 4.15 ilustra a forma de onda da corrente nas chaves dos *taps* 00, 2A, 6E e 3E, na seqüência de acionamento seguida pelo controle inteligente de comutação. A análise desta figura evidencia as condições de operação das chaves determinadas pelo controle inteligente de comutação: o seu bloqueio ocorre somente no instante de passagem da corrente por zero e o disparo das chaves ocorre somente nos instantes de passagem da tensão na bobina de excitação pelo seu valor nulo, evitando os transitórios de abertura e de fechamento das chaves.

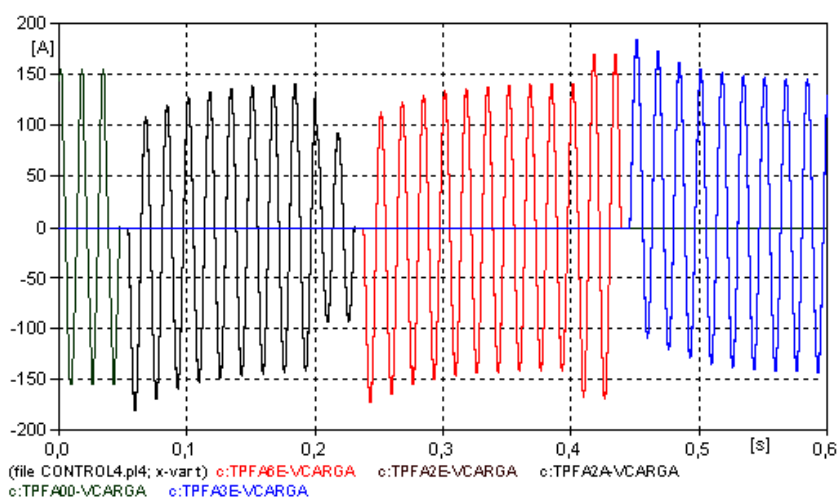


Figura 4.15: Correntes nas chaves

É importante ressaltar que o controle inteligente de comutação pode realizar a comutação para um *tap* intermediário quando for realizada a operação de comutação entre os *taps* extremos, conforme foi comprovado em outras simulações realizadas. A simulação da operação do controle inteligente de comutação, neste caso considerado, representa a situação de máxima eficiência operacional da lógica de controle, na qual o regulador restaura a tensão nominal na carga, após a ocorrência de um afundamento de tensão de 0,4 pu, executando somente uma única comutação entre os *taps* extremos. De qualquer forma, o controle inteligente de comutação é capaz de realizar a mesma regulação de tensão na carga com um menor número de comutações, comparado à operação do regulador com o controle primário. O acionamento de *taps* intermediários

está ligado à taxa de variação da tensão na carga provocada pelo distúrbio de tensão. O controle inteligente aguarda um retardo de tempo após ser detectada a variação da tensão na carga, para somente depois de decorrido este intervalo, comandar a comutação para o tap adequado. Se durante este retardo de tempo do controle para executar a comutação, a variação da tensão na carga já tiver atingido o seu valor final, o controle inteligente de comutação será capaz de corrigir a tensão na carga para o seu valor nominal com somente uma operação de comutação de *taps*. Ou seja, o tipo de lógica implementada no sistema de controle inteligente de comutação é capaz de fazer a comutação para o tap exato que regulará a tensão na carga. Obviamente há uma relação direta entre o tempo de resposta desejado para o controle e o número de comutações necessárias para restaurar a tensão na carga, conforme a discussão realizada no capítulo III.

4.5. CASO 3: OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO TRIFÁSICO COM CONTROLE DE COMUTAÇÃO.

Neste caso são apresentados os resultados de simulação da operação de um regulador de tensão trifásico com controle inteligente de comutação de *taps*. Para compor uma unidade trifásica são empregados três reguladores de tensão monofásicos conectados em triângulo (). A figura 4.16 mostra o esquema de ligação dos reguladores monofásicos em triângulo.

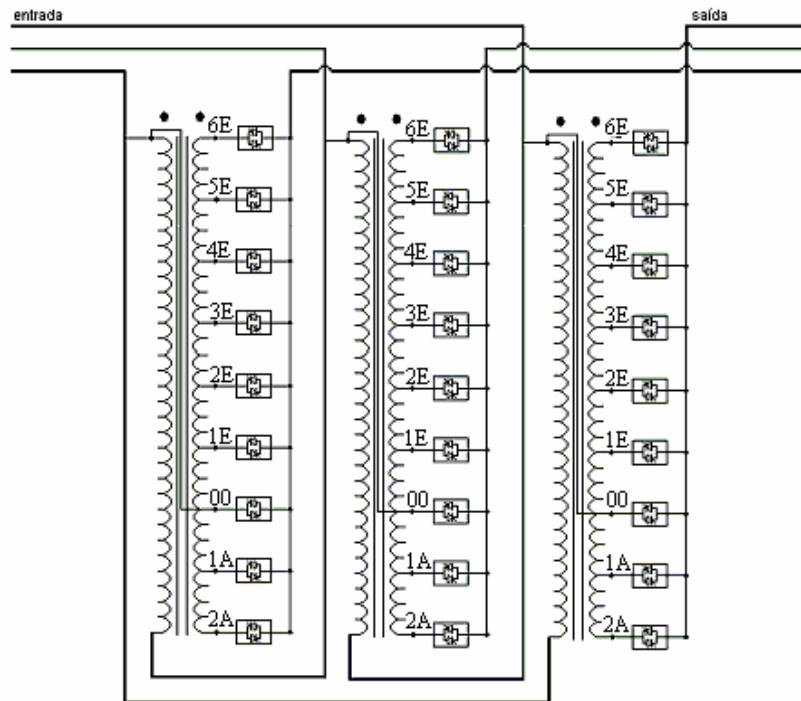


Figura 4.16: Conexão dos reguladores de tensão monofásicos em delta.

Para três reguladores de tensão monofásicos conectados em triângulo, a faixa de regulação é aproximadamente 50% superior à de um regulador individual, conforme mostra a figura 4.17.

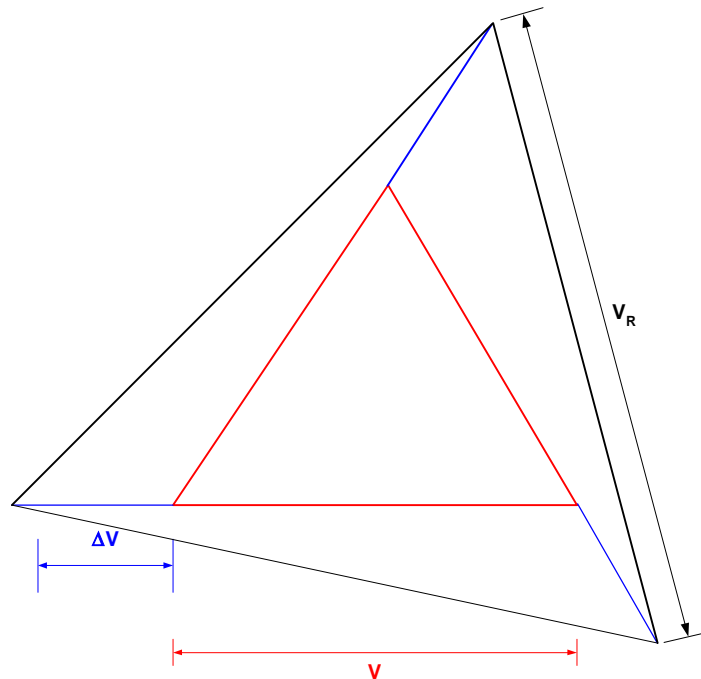


Figura 4.17: Triângulo de regulação de tensão.

A afirmação anterior pode ser comprovada pela simples aplicação da “Lei dos Cossenos”. A figura 4.18, que foi extraída da figura 4,17, mostra a tensão de saída em uma unidade monofásica de um banco de reguladores de tensão ligados em triângulo.

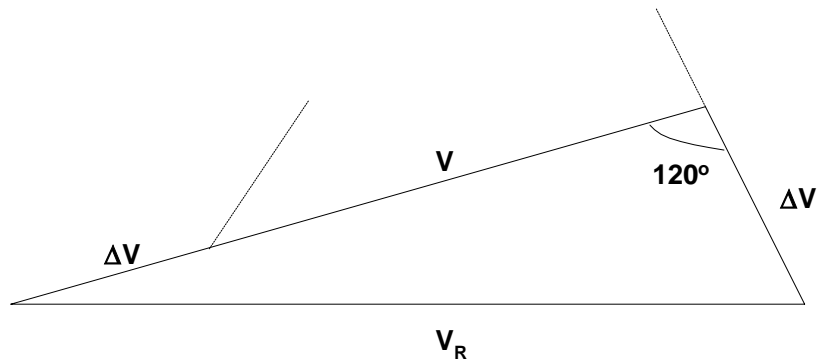


Figura 4.18: Aplicação da lei dos cossenos ao triângulo de regulação.

A “Lei dos Cossenos” afirma que em um triângulo qualquer o quadrado de um lado é igual à soma dos quadrados dos outros lados menos duas vezes o produto desses dois lados pelo cosseno do ângulo por eles formado. Assim, aplicando tal lei no triângulo acima, pode-se escrever a equação (4.4) a seguir:

$$V_R^2 = (V + \Delta V)^2 + \Delta V^2 - 2 \times (V + \Delta V) \times \Delta V \times \cos 120^\circ \quad (4.4)$$

Desenvolvendo esta equação, chega-se à expressão (4.5), que mostra o resultado esperado.

$$V_R^2 = V^2 + 3(V \times \Delta V) + 3\Delta V^2 \quad (4.5)$$

Para melhor visualizar a condição descrita anteriormente, basta acompanhar o seguinte desenvolvimento:

$$V_R^2 = V^2 + 2(V \times 1,5\Delta V) + (1,5\Delta V)^2 + 0,75\Delta V^2$$

$$V_R^2 = (V + 1,5\Delta V)^2 + 0,75\Delta V^2$$

Desprezando o valor $0,75\Delta V^2$, mostra-se que o ajuste de tensão é aproximadamente 50% superior ($1,5\Delta V$).

Como exemplo, pode-se afirmar que três reguladores monofásicos com faixa de regulação de $\pm 10\%$, ligados em triângulo fechado, regulam 15% de tensão, conforme foi apresentado na equação (4.5), ou seja:

$$V_R^2 = V^2 + 3(V \times \Delta V) + 3\Delta V^2$$

$$\text{Para } V=1 \text{ e } \Delta V=0,1$$

$$V_R^2 = 1^2 + 3(1 \times 0,1) + 3(0,1)^2$$

$$V_R^2 = 1,33$$

$$V_R \cong 1,15$$

A observação da figura 4.18 permite concluir que o ajuste de tensão em uma unidade reguladora altera o valor da tensão em duas fases simultaneamente. Devido a este fato, a operação do regulador de tensão trifásico com o controle primário de comutação é instável. Quando ocorre o afundamento de tensão nas três fases, o controle de comutação atua sobre cada fase individualmente. Assim, quando a tensão de uma das fases for corrigida, a tensão de uma outra fase também será regulada gerando, conseqüentemente, um erro no cálculo do desvio de tensão na lógica do controle primário de comutação nessa fase. Esse erro determina o início de outra operação de comutação, originando por conseqüência, uma avalanche de comutações sucessivas. Nesta situação, o sistema de controle não consegue uma estabilidade imediata do ajuste de tensão, impedindo que a meta de realização da operação de comutação em três ciclos seja alcançada.

Para a operação do regulador de tensão com o controle inteligente de comutação, esta situação de instabilidade é eliminada através de um simples ajuste no intervalo de tempo durante o qual o cálculo do desvio de tensão torna-se nulo após o início de uma operação de comutação. Este intervalo de tempo é aumentado de 25 ms para 33,34 ms, ou seja, após o início de uma comutação, somente após ser transcorrido um tempo de 33,34 ms é que o controle poderá iniciar outra operação de comutação. Este intervalo de tempo é suficiente para

que os controles das fases B e C também realizem a comutação para o tap adequado antes de haver transcorrido os 33,34 ms de bloqueio do controle da fase A. Essa adaptação no controle inteligente de comutação elimina a ocorrência de comutações sucessivas observadas no modelo de regulador de tensão trifásico operando com o controle primário.

Para a simulação deste caso, adotou-se o mesmo procedimento dos casos anteriores, havendo uma diferenciação apenas na lógica do controle por se tratar, agora, do modelo trifásico. O afundamento de tensão ocorre simultaneamente nas três fases, ou seja, ocorre um afundamento equilibrado.

O processo de chaveamento é iniciado ao mesmo tempo nas três unidades, porém, devido ao defasamento entre os instantes de tempo nos quais as chaves são bloqueadas e também disparadas, a regulação de tensão em cada fase não ocorre simultaneamente, o que acaba por acarretar um maior número de comutações necessárias no modelo de regulador trifásico para regular um afundamento de tensão com a mesma amplitude daquele ocorrido no modelo monofásico.

A figura 4.19 apresenta o oscilograma da tensão de entrada do regulador de tensão trifásico. A fonte de tensão trifásica apresenta inicialmente uma sobretensão de 10%. No instante de tempo $t = 200$ ms, ocorre o afundamento de tensão equilibrado nas três fases. Em $t = 400$ ms, uma das impedâncias responsáveis pelo afundamento de tensão é desligada de cada uma das fases provocando um novo aumento da tensão nas bobinas de excitação de cada fase do regulador. As características de simulação deste caso são as mesmas descritas no item 4.2, para o modelo de regulador monofásico. O regulador de tensão alimenta uma carga equilibrada de 100 A com fator de potência 0,7 indutivo.

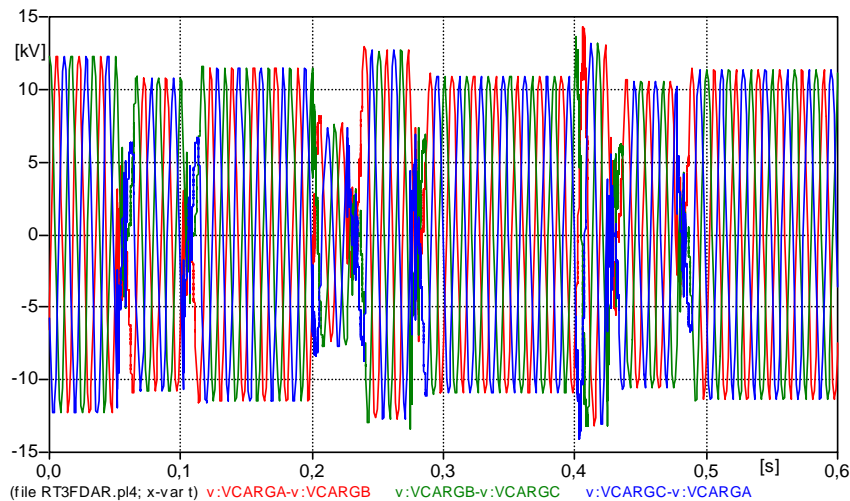


Figura 4.20: Perfil da tensão na carga para o modelo de regulador trifásico.

Para possibilitar uma visualização com maior clareza da forma de onda de tensão na carga durante os instantes de tempo onde ocorreram as comutações, a figura 4.21 apresenta uma ampliação da terceira comutação.

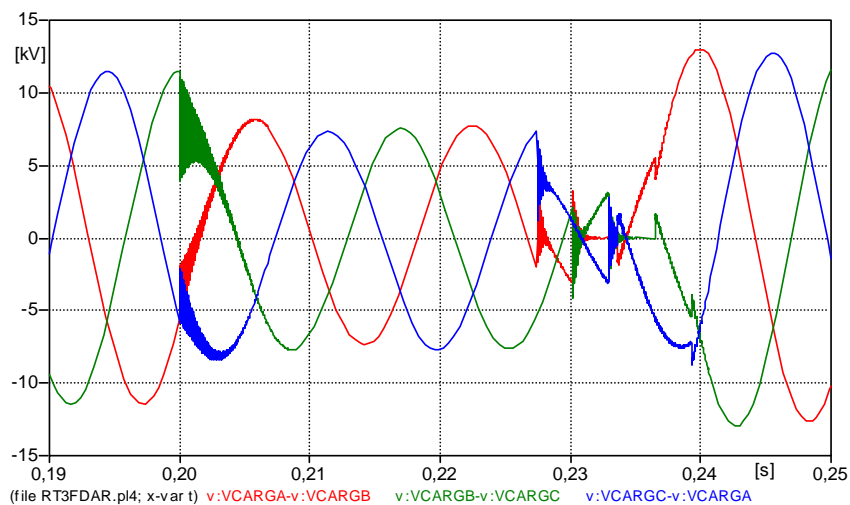
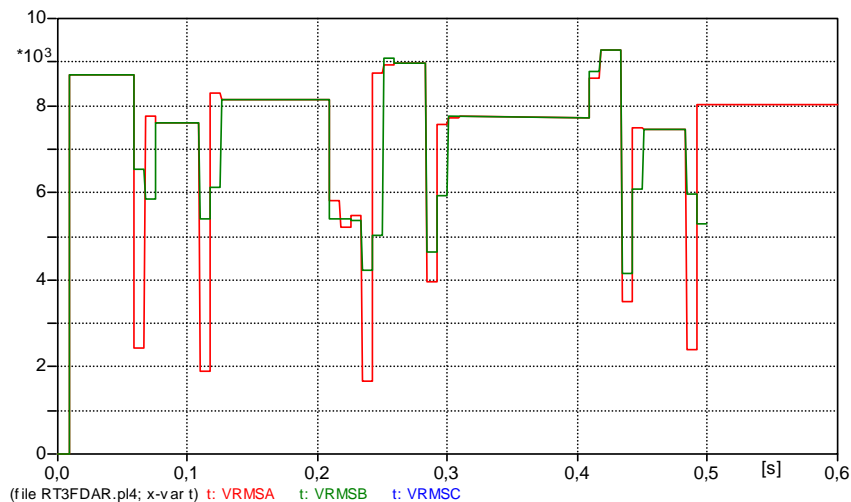


Figura 4.21: Oscilações de tensão na carga durante a comutação de *taps*.

A figura 4.22 mostra o perfil de tensão eficaz na carga. Observou-se que para o regulador trifásico operando com este controle de comutação, são necessárias duas comutações de *taps* em cada fase para a regulação da tensão na carga. De maneira mais esclarecedora, pode-se citar como exemplo as duas primeiras comutações de *taps*. O controle determina inicialmente a primeira comutação devido à sobretensão de 10% na fonte. Após a comutação das três

fases para o tap 2A, o controle determina, na seqüência, uma outra comutação para elevar a tensão do tap 2A para o tap 1A. Quando as três fases do regulador trifásico são comutadas para o tap 2A, a tensão na carga é reduzida em 50% a mais do que realmente deveria ser, devido ao aumento da capacidade de regulação de 50% que ocorre no regulador trifásico, pois como foi dito, a regulação de uma fase, provoca a correção de tensão em duas fases simultaneamente. Como conseqüência as três fases precisam corrigir a tensão na carga acionando o tap 1A. O mesmo fato é comprovado na observação conjunta da terceira e quarta comutações, assim como na quinta e sexta comutações, onde o controle comanda a comutação nas três fases para o tap 1E para posteriormente acionar o tap 2E de cada fase.



fez-se uma análise comparativa do desempenho do regulador de tensão, ora operando com o controle primário, ora operando com o controle inteligente de comutação, alimentando diferentes configurações de cargas, e ressaltando o processo de comutação obtido pelo uso de dispositivos eletrônicos.

Conforme foi apresentado, primeiramente realizou-se os estudos do regulador de tensão com o controle primário de comutação alimentando dois tipos de cargas. Posteriormente, foi implementado a lógica de controle inteligente para a comutação eletrônica de *taps* no modelo de regulador de tensão. Destes resultados de simulações, podem ser extraídas as seguintes conclusões:

(a) Quanto ao modelo monofásico com o controle primário de comutação:

- As simulações com diferentes arranjos de carga permitiram identificar a pior condição de operação, sendo que esta ocorreu quando o regulador alimenta uma carga representada por um único ramo série RL (Caso 1.1). Neste caso, solicitações de tensão de grande amplitude são impostas às chaves devido ao fato de não haver o amortecimento das oscilações transitórias originadas nas comutações.
 - As oscilações de tensão foram bastante amortecidas no caso em que a carga
-

atuais, sendo os instantes de bloqueio e de disparo das chaves determinados pelos instantes de passagem da corrente e da tensão pelo valor nulo, respectivamente.

- O sistema de controle primário executa comutações para *taps* intermediários quando, por exemplo, a variação de tensão na carga exige a comutação entre os *taps* extremos do regulador. Essas comutações intermediárias reduzem a eficiência operacional do equipamento devido à maior quantidade de comutações realizadas e submetem as chaves a uma maior quantidade de solicitações de tensão.

(b) Quanto ao modelo monofásico com o controle inteligente de comutação:

- A implementação do sistema de controle inteligente aumentou a eficiência operacional do regulador de tensão, reduzindo o seu tempo de resposta frente às variações de tensão na carga.
- O controle inteligente de comutação é capaz de realizar a regulação da tensão na carga executando uma única operação de comutação de *taps*, mesmo nos casos onde seja necessário realizar a comutação entre os *taps* extremos. Esta característica operacional representa uma grande vantagem do controle inteligente comparado ao controle primário.
- Cita-se também, como benefício da implementação do controle inteligente de comutação, o aumento de confiabilidade operacional do equipamento, uma vez que as chaves dos *taps* serão submetidas a uma menor frequência de solicitações de tensão.

(c) Quanto ao modelo trifásico:

- O modelo foi formado por um banco de três reguladores de tensão monofásicos ligados em triângulo (Δ);
- A associação de reguladores em triângulo eleva a capacidade de regulação de tensão da linha em aproximadamente 50% a mais da capacidade de

regulação individual do regulador monofásico. Além disso, a correção da tensão em uma linha do regulador impõe uma variação de tensão em outra linha.

- A utilização do controle primário de comutação no regulador de tensão trifásico torna-se instável, uma vez que o ajuste de tensão em um regulador de uma fase interfere na correção de tensão no regulador de outra fase, tendo como consequência a ocorrência de comutações sucessivas comandadas pelo controle de comutação de cada uma das três fases.
 - O controle inteligente de comutação que foi implementado no modelo de regulador de tensão trifásico é capaz de responder dinamicamente de forma rápida às variações de tensão na carga, sem haver a ocorrência de comutações sucessivas.
 - A lógica do sistema de controle inteligente de comutação foi construída com a preocupação de ser facilmente ajustada a diferentes condições de operação do regulador de tensão. Uma v
-

PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS CONTRA SOBRETENSÕES E CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os resultados de simulação da operação do regulador de tensão apresentados no capítulo IV mostraram que as chaves ligadas aos *taps* ficam sujeitas a sobretensões originadas nos instantes de comutação de *taps*. Com o objetivo de analisar as solicitações de tensão impostas às chaves, realizou-se simulações do regulador de tensão alimentando diferentes tipos de cargas. A simulação da operação do regulador de tensão alimentando uma composição de cargas com diferentes fatores de potência mostrou que as sobretensões nas chaves são dependentes do arranjo e do tipo de carga alimentada pelo regulador, de forma que sobretensões de maiores amplitudes acabam por onerar o custo do equipamento [9].

A estratégia adotada para limitar as sobretensões impostas às chaves nos instantes de comutação é a instalação de um pára-raios em paralelo com o barramento das chaves dos *taps*. A proposta consiste na implementação de um pára-raios que limite a tensão nas chaves dentro de valores compatíveis com o nível de suportabilidade das mesmas, quando o regulador alimenta uma única carga RL, ou seja, opera na condição mais desfavorável ao amortecimento das sobretensões transitórias de manobra. Desta forma garante-se a integridade do

equipamento em qualquer situação de operação. No instante de comutação de *taps*, o pára-raios ligado em paralelo com as chaves entra em condução no momento em que a sobretensão nas chaves ultrapassa o valor de tensão de segurança, garantindo a integridade do equipamento. Durante o estado de condução de corrente, o pára-raios limita a tensão entre seus terminais dentro de valores suportáveis pelas chaves.

As chaves do regulador de tensão também são sujeitas a solicitações de tensão de grandes amplitudes quando ocorre uma descarga atmosférica na linha de alimentação do regulador. Nesse caso, é importante observar os níveis de tensão aos quais as chaves dos *taps* ficarão submetidas, a fim de garantir que tais níveis não excedam o seu limite de suportabilidade. Com vistas a garantir a proteção das chaves contra descargas atmosféricas, propõe-se um sistema de proteção utilizando um pára-raios instalado na entrada do regulador de tensão. Este pára-raios limita a tensão imposta à bobina de excitação do regulador na ocorrência da descarga atmosférica, limitando, por conseguinte, o nível de sobretensão nas chaves, uma vez que, a bobina de excitação é alimentada pela fonte e está ligada à bobina de *taps* através do *tap* 00, conforme definido no capítulo 2. Dessa forma, a limitação da tensão na bobina de excitação garante que as tensões que são impostas às chaves ligadas aos *taps* fiquem dentro de valores considerados operacionalmente seguros.

O estudo de proteção das chaves estáticas é completado com a implementação de um reator para limitar a corrente que percorre as chaves em condições de falta ou má operação das mesmas. Este estudo de proteção contra correntes de curto-circuito teve como foco duas situações principais:

- Operação do regulador de tensão com ocorrência de curto-circuito fase-terra na carga;
- Operação do regulador de tensão com ocorrência de curto-circuito entre as chaves de dois *taps* diferentes, devido à má operação do controle de comutação.

Neste contexto, este capítulo apresenta uma proposta de um sistema de proteção das chaves do regulador de tensão contra sobretensões originadas tanto por surtos de manobra quanto por ocorrência de descargas atmosféricas, baseado na instalação de um pára-raios em paralelo com o barramento de chaves e um outro instalado na entrada do regulador de tensão, além da inclusão de um reator para limitar a corrente nas chaves em caso de faltas.

5.2. IMPLEMENTAÇÃO DO PÁRA-RAIOS NO MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO COM 9 DEGRAUS

O modelo de pára-raios que será implementado no regulador de tensão é o que está disponível no programa ATP.

A equação (5.1) mostra a forma como a representação da característica (V/I) do pára-raios é feita no programa ATP. Nessa equação, os parâmetros p , q e V_{ref} são determinados de acordo com as características do pára-raios.

$$i = p \times \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^q \quad (5.1)$$

Onde:

- i - corrente no pára-raios;
- V - tensão no pára-raios;
- p e q - constantes características do dispositivo;
- V_{ref} - tensão de referência.

5.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DE PÁRA-RAIOS

O pára-raios é um dispositivo constituído de um elemento resistivo não-linear associado ou não a um centelhador série. Os pára-raios tratados nesta

dissertação referem-se àqueles que utilizam como resistor não-linear a óxido de zinco (ZnO) e que não possuem centelhadores série. A figura 5.1 apresenta a característica (V/I) não-linear do pára-raios ZnO e do pára-raios de carboneto de silício (SiC). A observação da figura 5.1 permite a identificação de três características peculiares de operação de um pára-raios ZnO:

- i. Na faixa de pequenas correntes, o pára-raios está submetido à tensão nominal de operação do sistema ao qual está ligado e é sensivelmente dependente do efeito da temperatura. Nesta faixa de operação, o pára-raios conduz uma corrente de pequena amplitude.
- ii. Na região intermediária, a faixa de pequena declividade, a sensibilidade do dispositivo à temperatura é muito reduzida;
- iii. A última faixa é característica da descarga do pára-raios.

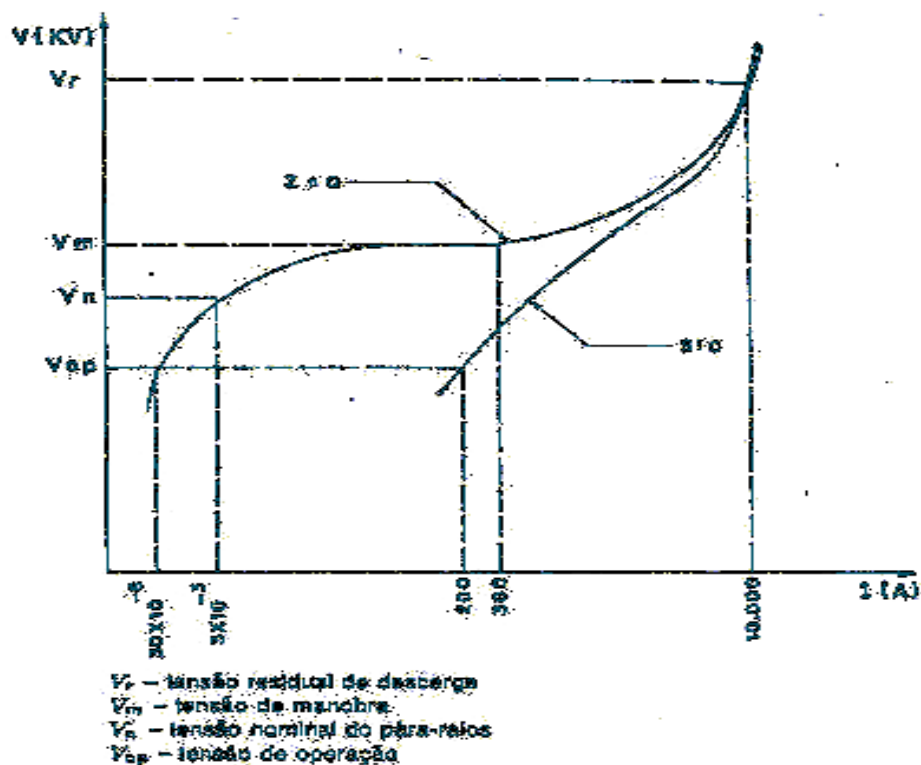


Figura 5.1: Característica não-linear do pára-raios ZnO.

O pára-raios tem como função proteger as redes elétricas contra sobretensões transitórias elevadas, normalmente provocadas por descargas atmosféricas ou por manobras de operação das redes elétricas, impondo um limite para a duração e a intensidade da corrente elétrica que é conduzida pelo

pára-raios após o surto de tensão, o qual determina o início de condução de corrente. Essa corrente que é estabelecida no pára-raios após a corrente de descarga é chamada de corrente subsequente e tem a frequência do sistema elétrico (60 Hz).

Assim, em operação normal, o pára-raios é semelhante a um circuito aberto, pois o resistor não-linear aumenta de valor. Quando ocorre uma sobretensão, o resistor não-linear apresenta baixa resistência e o pára-raios conduz a corrente de surto, impedindo que a tensão entre seus terminais ultrapasse determinado valor [10].

A figura 5.2 ilustra a atuação de um pára-raios. Em condições normais de operação, a corrente que circula pelo pára-raios é somente de poucos miliampères, sendo limitada pelo alto valor da resistência elétrica dos resistores não-lineares. Quando a tensão nos terminais do pára-raios ultrapassa o valor da tensão disruptiva (U_A), inicia-se o processo de condução propriamente dito, onde o equipamento passa a conduzir a corrente de descarga (i_a). Após este surto inicial, uma corrente, que é provocada pela tensão do sistema (corrente subsequente em 60Hz - i_n), pode fluir no pára-raios. Inicialmente, esta corrente é função somente da tensão do sistema e dos resistores não-lineares, sendo extinta na sua primeira passagem por zero. Depois de extinguir a corrente subsequente, o pára-raios retoma sua condição normal de operação.

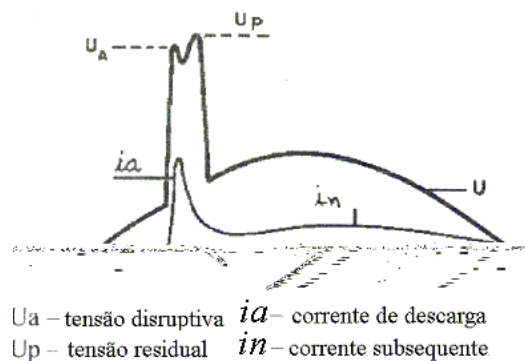


Figura 5.2: Curva típica de operação de um pára-raios ZnO.

A seleção de um pára-raios para prover a proteção desejada de um equipamento, ou a um grupo de equipamentos, deve levar em consideração uma série de fatores, tais como: tensão máxima na frequência industrial, sobretensões temporárias (faltas fase-terra, rejeição de carga, ferro-ressonância, indução em circuitos paralelos e perda de conexão à terra de sistemas, normalmente, aterrados), sobretensões atmosféricas e de manobra, efeito distância (separação entre o equipamento protegido e o pára-raios), características de proteção, isolamento dos equipamentos (tensões suportáveis nominais estabelecidas na norma brasileira NBR-6939) e margens de proteção [10].

A figura 5.3 mostra as variações de corrente e de tensão durante a operação de um pára-raios ZnO.

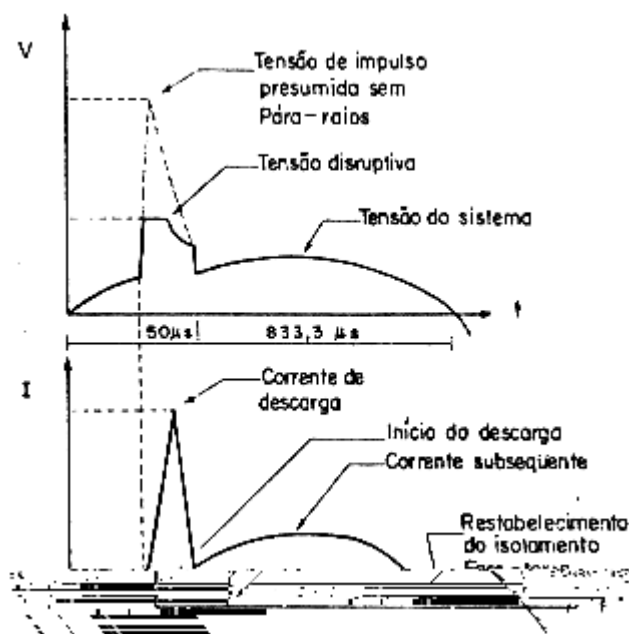


Figura 5.3: Variações de corrente e de tensão durante a operação de um pára-raios.

O nível de proteção fornecido pelo pára-raios na região de impulso atmosférico deve ser obtido considerando-se o maior valor entre a tensão residual para ondas $8 \times 20 \mu s$ e o nível de disparo para ondas $1,2 \times 50 \mu s$. O nível de proteção para impulso de manobra é o maior valor entre a tensão de disparo para impulso de manobra e a tensão residual para ondas do tipo manobra.

Com relação aos níveis de proteção, existe uma certa margem de segurança entre a tensão suportável de impulso atmosférico, a de manobra de equipamento e o nível de proteção do pára-raios [9].

Os valores mínimos recomendados para as relações de proteção, a fim de que se obtenha a coordenação de isolamento, é de 1,20 pu e 1,15 pu para o impulso atmosférico e o de manobra, respectivamente [9]. A figura 5.4 mostra os critérios para haver a coordenação de isolamento com base em níveis adequados de proteção para transformadores.

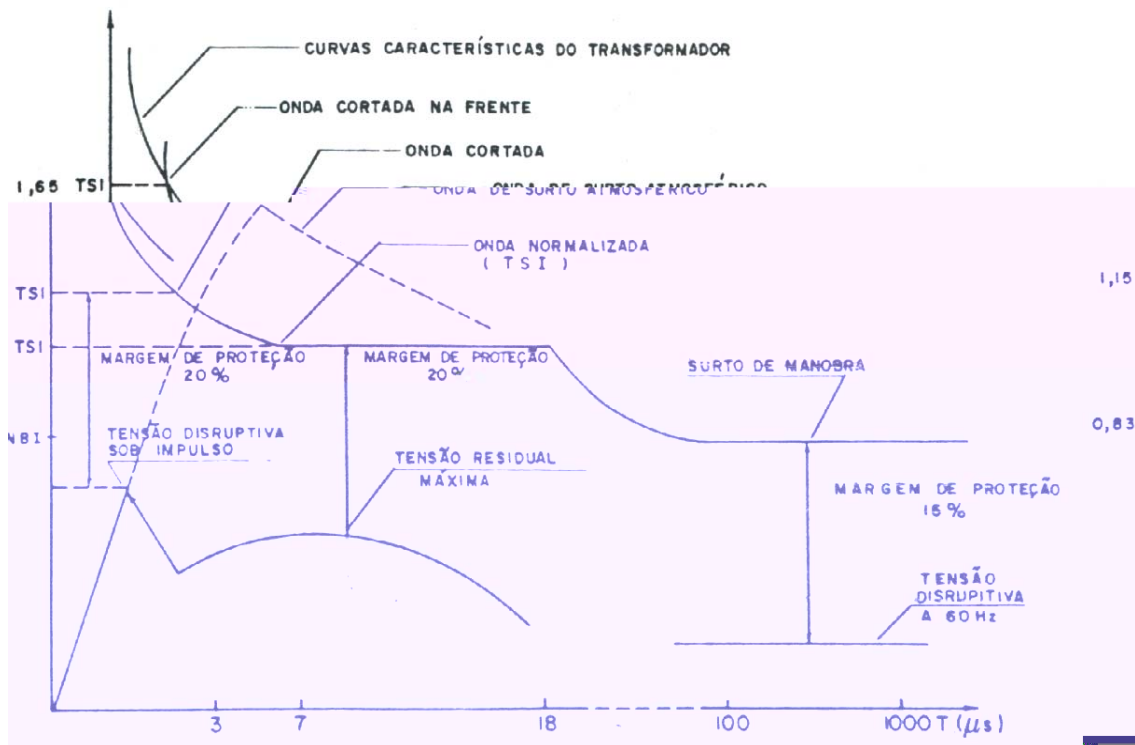


Figura 5.4 – Margens de proteção típicas para transformadores

Assim:

- i. Para surto de manobra, a margem de segurança prevista é de 15%, ou seja:

$$\left(\frac{V_{es}}{V_{dsm}} - 1 \right) \times 100 \geq 15\% \quad (5.2)$$

Onde:

V_{es} – tensão de ensaio de surto de manobra;

regulador para verificar as margens de segurança do sistema de proteção proposto através das equações 5.2 e 5.3.

5.4. ESTUDO DE PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS CONTRA SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR MANOBRA

A proteção das chaves contra as sobretensões originadas nos momentos de comutação de *taps* será feita através da instalação de um pára-raios em paralelo com as mesmas.

Como foi observado no capítulo IV, a chave do *tap* 6E é a chave que está submetida à maior solicitação de tensão quando ocorre uma comutação de *taps*, independentemente do tipo de carga ligada ao regulador. A análise desses resultados de simulação da operação do regulador de tensão orientam para a instalação do pára-raios em paralelo com os terminais da chave do *tap* 6E, conforme mostra a figura 5.5 a seguir. Garantindo-se que a solicitação de tensão sobre a chave do *tap* 6E fique dentro do seu limite de suportabilidade, garante-se também que as chaves ligadas aos demais *taps* sejam também protegidas, uma vez que estas estão ligadas a *taps* de menor tensão do que o *tap* 6E. Esse é o principal motivo da escolha desse local para a instalação do pára raios.

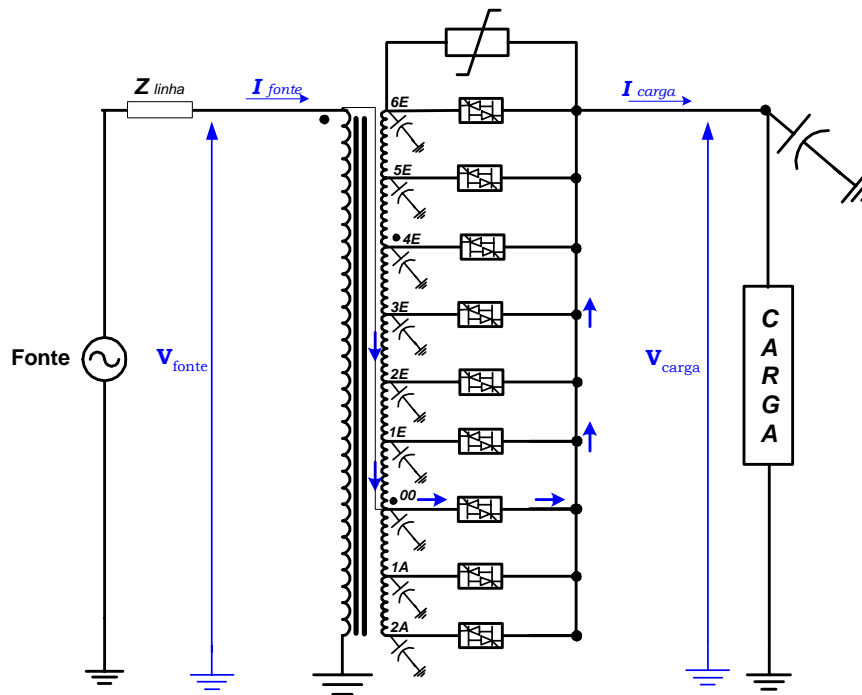


Figura 5.5: Modelo de regulador de tensão com 9 degraus e pára-raios de proteção contra surtos de manobra.

5.4.1. SELEÇÃO DO PÁRA-RAIOS PARA PROTEÇÃO DAS CHAVES CONTRA SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR MANOBRA

A escolha da tensão nominal do pára-raios deve ser feita de tal forma que o mesmo não apresente possibilidade de condução de corrente em valores sustentados pela fonte de tensão. Geralmente, a tensão nominal é o limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema [9]. No caso do modelo de regulador de tensão em estudo, considerou-se a possibilidade de uma sobretensão na fonte de 10% e também o fato de que o pára-raios está colocado entre os terminais da chave 6E, a qual está conectada no *tap* de elevação de tensão de 30%, então a tensão de corte do pára-raios deve ser superior a 16,12 kV ($1,1 \times 1,3 \times 7,97 \times \sqrt{2}$).

No modelo de regulador de tensão mostrado na figura 5.5, considerou-se uma capacitância conectada ao terminal de carga. Esta capacitância representa a capacitância de fuga da bucha de saída, que poderá estar associada a outras

capacitâncias de fuga, representativas do sistema elétrico. Mais que isso, é fundamental a representação desta capacitância para o estudo dos transitórios de comutação de *taps*. No momento do bloqueio de uma chave qualquer, esta capacitância deverá estar carregada com o valor de crista da tensão de carga, e portanto, esta tensão deverá sofrer uma inversão de polaridade devido ao processo natural de descarga de capacitores em circuitos indutivos. Esse fato faz com que as chaves sejam submetidas a sobretensões mais elevadas entre seus terminais. Com a utilização do pára-raios, a sobretensão entre os terminais da chave é limitada a um valor menor.

No instante de abertura de uma chave, admitindo que haja uma sobretensão de 10% (8.767 V) na fonte, sendo que a tensão no *tap* 6E está 30% maior do que a tensão da fonte ($1,3 \times 8767 = 11,4 \text{ kV}$), o pára-raios estará então submetido a uma tensão de 27,4 kV de crista $[(11,4 + 7,97) \times 2]$, considerando a capacitância de fuga carregada com a tensão nominal após inverter a sua polaridade.

Usualmente, adota-se como tensão de corte de um pára-raios (tensão disruptiva) um valor igual a duas vezes a sua tensão nominal, ou seja, para um surto instantâneo de tensão menor que duas vezes a sua tensão nominal, a corrente no pára-raios é praticamente desprezível.

Analisando as características de pára-raios extraídas da referência [4], encontrou-se três modelos comerciais que poderiam atender às necessidades de proteção das chaves. Esses modelos estão apresentados a seguir na tabela 5.2.

A determinação das constantes características dos pára-raios utilizadas na equação 5.1 foi feita utilizando-se os valores de máxima tensão residual dos pára-raios de tensão nominal 9 kV, 10,5kV e 12 kV, de acordo com os dados apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Especificação das características do pára-raios - Bowthorpe EMP

Tensão Nominal [kV]	Máxima tensão residual com forma de onda de corrente			Capacidade de sobretensão Temporária durante 1 s (TOV) kV	Modelo de pára-raios
	Surto de chaveamento		8/20 μ S		
	125A kV crista	500A kV crista	5kA kV Crista		
9	19,8	21,5	27,0	10,7	ESRA9
10.5	26,4	28,6	36,0	12,4	ESRA10.5
12	26,4	28,6	36,0	14,2	ESRA12

Os valores calculados são apresentados na tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3: Determinação das constantes características dos pára-raios.

Constantes Características	Tensão Nominal do Pára-raios		
	9 kV	10,5 kV	12 kV
V_{ref}	18 kV	21 kV	22 kV
p	125	16,68	5,32
q	17,32	17,10	17,3

Com a finalidade de comprovar a eficiência da utilização de pára-raios como um limitador da solicitação de tensão sobre as chaves no momento de bloqueio da corrente de carga, apresenta-se, nos itens a seguir, os resultados de simulações das situações consideradas mais críticas em termos de sobretensões nas chaves, fazendo um paralelo entre os resultados obtidos com e sem a utilização do pára-raios. Antes de apresentar os resultados de simulação, faz-se necessário tecer algumas considerações sobre influência a capacitância de fuga da bucha de carga mostrada na figura 5.5 no transitório de comutação de *taps* e, conseqüentemente, na escolha do tipo de pára-raios adequado para proteger as chaves.

5.4.2. INFLUÊNCIA DA CAPACITÂNCIA DE FUGA DA BUCHA DA CARGA NA DISSIPACÃO DE ENERGIA NO PÁRA-RAIOS.

Para o dimensionamento correto do pára-raios deve-se ainda considerar a quantidade de energia dissipada no equipamento durante o tempo em que este estiver em condução, a fim de garantir a sua integridade operacional. Com a finalidade de quantificar a energia dissipada no pára-raios durante todo o processo de comutação, deve-se fazer a integração do produto da tensão pela corrente no equipamento durante todo esse período. Obviamente que, se o número de comutações sucessivas for muito elevado, certamente a exigência do pára-raios será maior.

Observa-se que o nível de energia dissipada no pára-raios é dependente do comportamento da tensão e da corrente no mesmo e que, os comportamentos dessas duas grandezas, quando se leva em consideração o valor da capacitância de fuga da bucha de carga, são de certa forma antagônicos. Ou seja, para uma maior capacitância de fuga, ter-se-á uma redução da frequência angular do transitório de comutação e, conseqüentemente, uma inversão mais lenta da polaridade da tensão na capacitância de fuga, embora a amplitude desta tensão continue a mesma. Portanto, é muito importante levar em consideração o fato de que a alteração do valor da capacitância de fuga do barramento de cargas deverá propiciar mudanças no valor da quantidade de energia dissipada no pára-raios e, conseqüentemente, procurar determinar a situação mais crítica de operação para o dimensionamento do mesmo. A figura 5.6 representa o transitório de corte de corrente indutiva originado no regulador no instante de bloqueio das chaves.

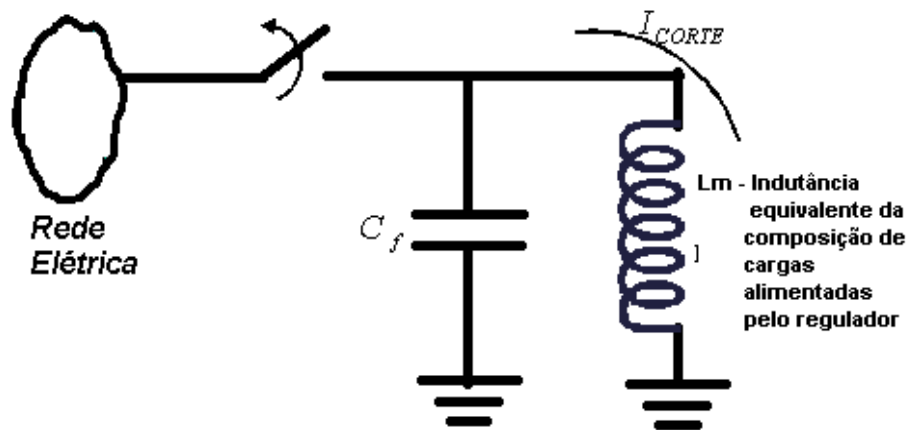


Figura 5.6: Corte de corrente indutiva.

Com o objetivo de determinar o valor de capacitância ligada ao barramento de carga que submeteria o pára-raios à maior dissipação de energia, foram realizadas diversas simulações de comutação de *taps* no regulador com diferentes valores de capacitância. O valor de capacitância encontrado foi de $2,75 \mu\text{F}$. Esse valor constitui a situação de maior dissipação de energia no equipamento para o processo de comutação analisado.

Observa-se que este valor é muito elevado para uma capacitância de fuga típica da classe do equipamento considerado. Entretanto, esse valor poderia ser atingido se fosse considerado também outras capacitâncias que poderiam estar presentes no sistema.

Assim, todas as simulações realizadas a seguir, foram realizadas com o valor de capacitância no barramento de carga igual a $2,75 \mu\text{F}$, ou seja, os resultados das simulações apresentados neste capítulo representam a situação de máxima dissipação de energia nos dispositivos pára-raios.

5.5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES DE MANOBRA

O modelo de regulador de tensão utilizado nas simulações computacionais possui as mesmas características elétricas do modelo definido no capítulo 2, com o controle inteligente de comutação já implementado. Para orientar a escolha do tipo de pára-raios mais adequado à proteção das chaves, quatro casos foram considerados: operação do regulador de tensão sem pára-raios com os pára-raios de 9 kV, 10,5 kV e 12 kV. Os resultados permitem a avaliação do nível de sobretensão nas chaves, corrente de descarga, tensão residual e quantidade de energia dissipada nos pára-raios.

5.5.1. CARACTERÍSTICAS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

- Inicialmente o regulador encontra-se alimentando a carga através do *tap* 00. A fonte de alimentação é submetida a uma sobretensão de 10% da tensão nominal ($1,1 \times 7,97 \text{ kV} = 8,767\text{kV}$). Essa situação impõe ao controle automático a decisão de comandar a comutação de *taps*, que será realizada da seguinte forma: comutar para o *tap* 1A e em seguida comutar para o *tap* 2A.
- No instante de tempo $t = 100 \text{ ms}$, duas cargas de 4,64 MVA de potência aparente são ligadas à barra de alimentação do regulador de tensão, provocando uma redução na tensão da fonte para 70% da tensão nominal do regulador, ($0,7 \times 7,97 \text{ kV} = 5,579 \text{ kV}$) de maneira que o controle automático determina a comutação de *taps* do regulador, feita da seguinte forma: a primeira comutação ocorre do *tap* 2A para o *tap* 2E, a segunda comutação ocorre do *tap* 2E para o *tap* 4E um ciclo depois da primeira, a terceira comutação dá-se do *tap* 4E para o *tap* 5E no ciclo seguinte à segunda. Por último, o controle determina a quarta comutação, que ocorre do *tap* 5E para o *tap* 6E no ciclo seguinte à terceira. Essas quatro comutações ocorrem sucessivamente. Observa-se que essa situação de várias comutações sucessivas foi obtida impondo ao sistema de controle

de comutação maior rapidez de resposta à variação de tensão na carga. Essa situação não é interessante quando se analisa os efeitos transitórios da comutação na tensão de carga, e muito provavelmente, deverá ser evitada. Contudo, para a análise da quantidade de energia dissipada no pára-raios, ela se torna importante e deve ser considerada.

- No instante de tempo $t = 250$ ms, uma das cargas responsáveis pelo afundamento de tensão é desligada do sistema provocando a elevação da tensão da fonte e a conseqüente comutação do *tap* 6E para o *tap* 3E.

A figura 5.7 apresenta o sistema elétrico com o regulador de tensão e o pára-raios conforme descrito anteriormente.

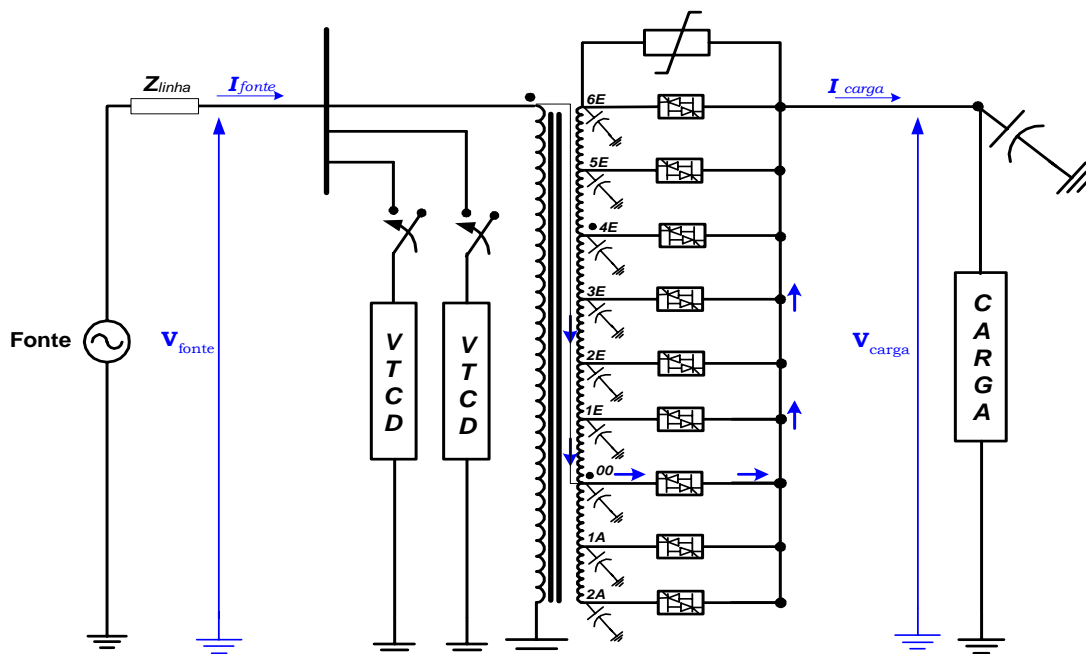


Figura 5.7: Sistema elétrico para estudos de proteção do regulador de tensão contra sobretensões originadas por manobra.

Em consideração à carga, a configuração mais crítica em relação à amplitude da sobretensão transitória de comutação corresponde a uma carga indutiva representada por um único ramo RL série. Considerou-se, portanto, em todas as simulações, uma carga de 100 A e fator de potência 0,707, representada por um único ramo RL.

5.5.2. SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO COM REGULADOR DE TENSÃO OPERANDO SEM PÁRA-RAIOS.

Conforme o roteiro de simulação descrito no item 5.5.1, “características de simulação”, será apresentada neste item a operação do regulador de tensão sem o pára-raios de proteção das chaves. O objetivo deste caso é avaliar os níveis de sobretensões aos quais as chaves estão sujeitas durante a comutação de *taps*.

Na figura 5.8 é apresentada a forma de onda da tensão na bobina de excitação do regulador de tensão. Pode-se perceber claramente que a operação está de acordo com o roteiro descrito anteriormente.

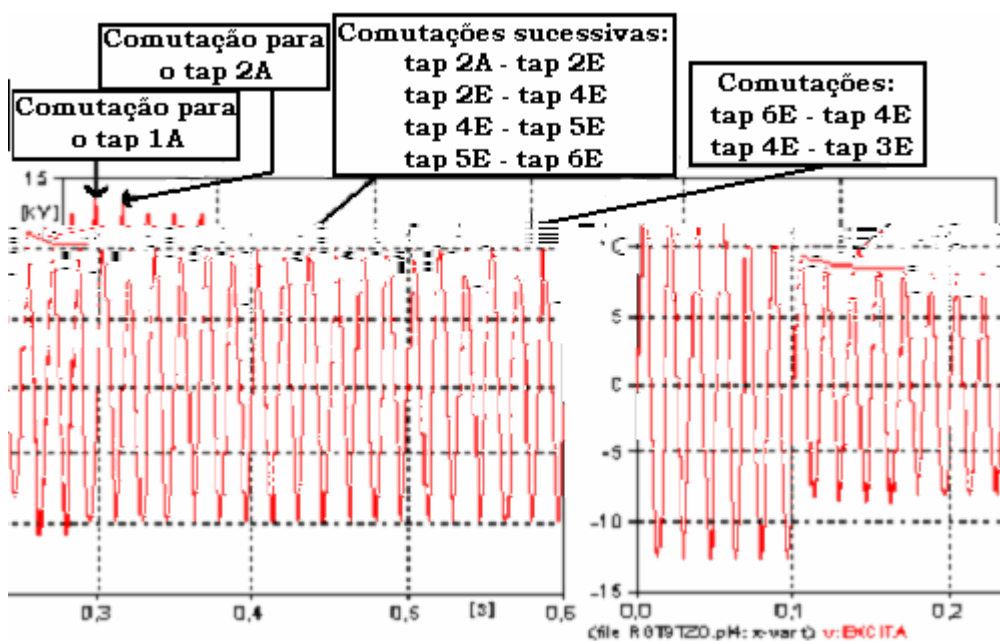
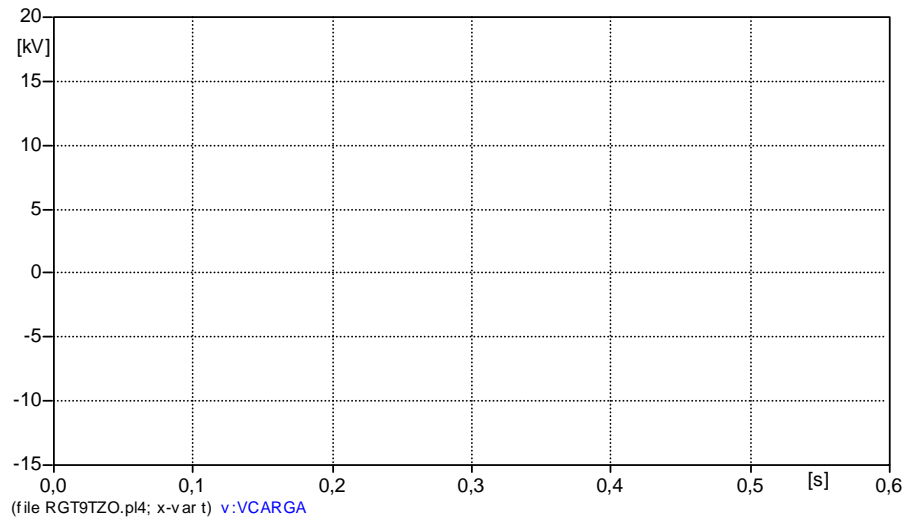


Figura 5.8: Forma de onda da tensão na bobina de excitação.

A figura 5.9 apresenta a forma de onda da tensão na carga com a presença das oscilações transitórias originadas nos instantes de bloqueio das chaves. A figura 5.10 mostra uma ampliação da figura 5.9, destacando as duas primeiras comutações, que ocorreram do *tap* 00 para o *tap* 1A e do *tap* 1A para o 2A, respectivamente. As oscilações transitórias pouco amortecidas observadas nessa

figura justificam-se pela configuração da carga RL série que proporciona um pequeno amortecimento dos transitórios de comutação.



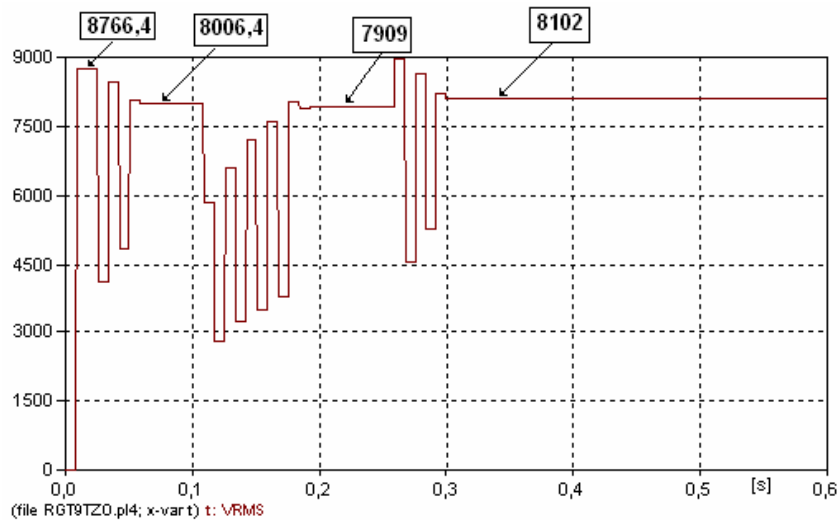


Figura 5.11: Perfil da tensão eficaz na carga.

A forma de onda da corrente de saída do regulador para o barramento de carga é mostrada na figura 5.12. Nessa figura fica evidente a operação do controle de comutação executando o bloqueio das chaves somente nos instantes de passagem da corrente nas chaves pelo valor nulo.

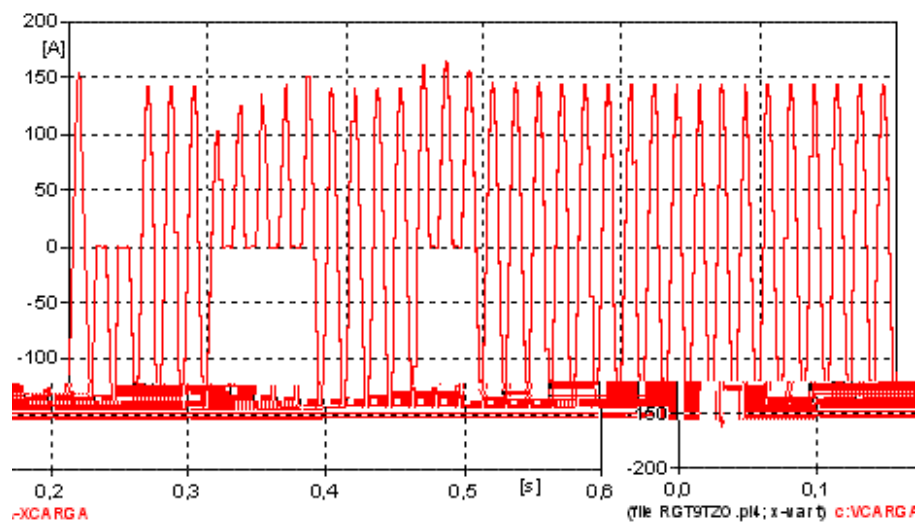


Figura 5.12: Forma de onda da corrente na carga.

As sobretensões às quais a chave do *tap* 6E fica submetida são mostradas na figura 5.13. Durante a segunda comutação, que ocorre do *tap* 1A para o *tap* 2A, a sobretensão na chave atinge valores da ordem de 27 kV.

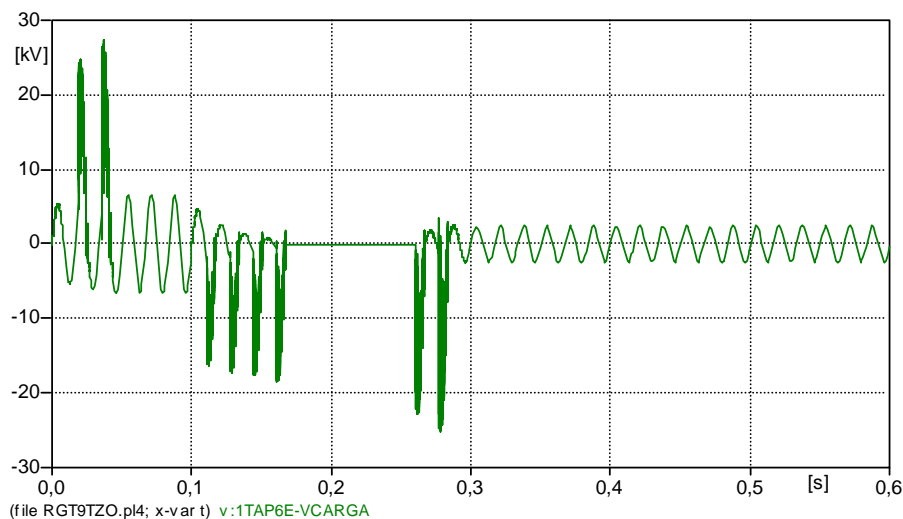


Figura 5.13: Forma de onda da tensão do *tap* 6E com sobretensões transitórias.

A figura 5.14 mostra em maiores detalhes as oscilações transitórias durante as duas primeiras comutações, as quais apresentam os maiores níveis de sobretensão em todas as comutações.

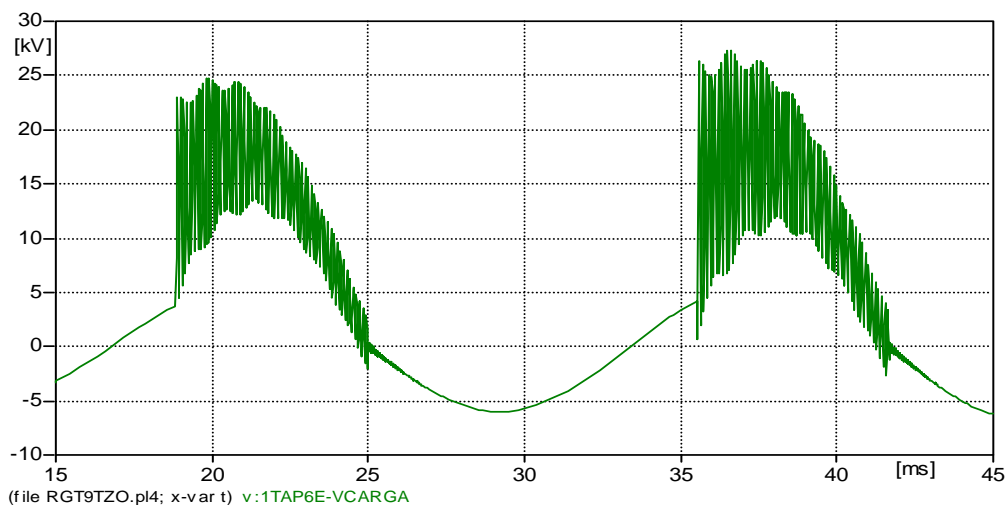


Figura 5.14: Zoom da tensão na chave do *tap* 6E durante a 1ª e 2ª comutações.

5.5.3. SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO COM O REGULADOR UTILIZANDO UM PÁRA-RAIOS DE PROTEÇÃO

Neste item, analisa-se os resultados da instalação de um pára-raios entre os terminais da chave do *tap* 6E, para reduzir as sobretensões impostas nas

chaves. São apresentados a seguir três resultados de simulações de operação do regulador de tensão com pára-raios, cuja tensão nominal é de 9 kV, 10,5 kV e 12 kV, respectivamente. Objetiva-se definir, através destes resultados, qual dentre estes três tipos de pára-raios é o mais adequado à aplicação.

(A) - REGULADOR DE TENSÃO OPERANDO COM UM PÁRA-RAIOS DE 9 kV

A figura 5.15 mostra a forma de onda da tensão entre os terminais da chave do *tap* 6E referente à simulação do regulador empregando um pára-raios com tensão nominal de 9 kV para limitar o nível de sobretensão. Os maiores níveis de sobretensão impostos às chaves são observados durante a operação de redução de tensão na carga, ou seja, quando a fonte de alimentação está com tensão acima de 7,97 kV.

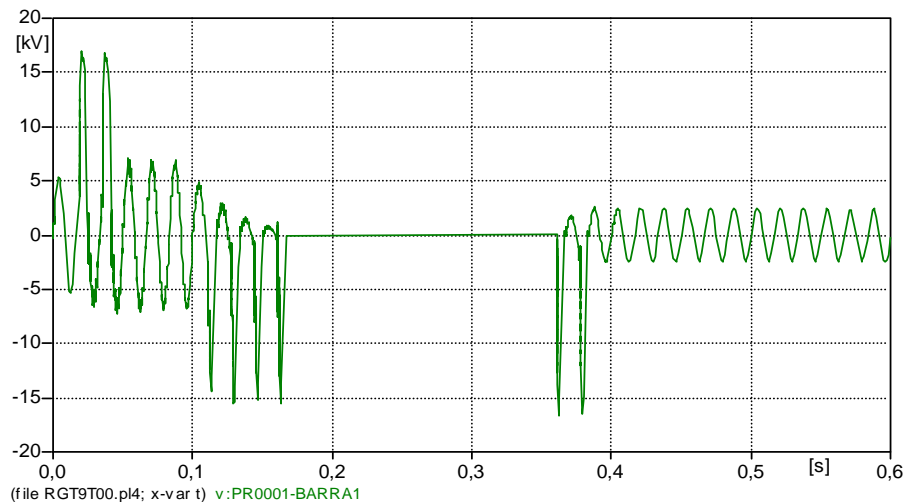
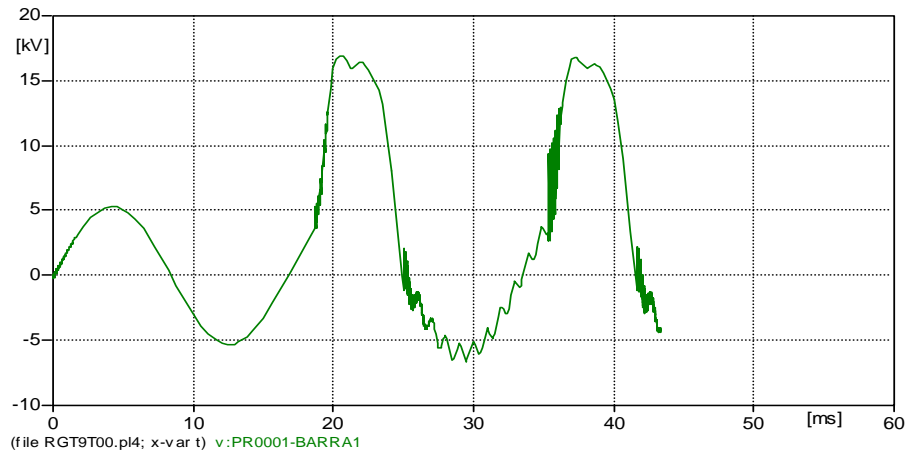


Figura 5.15: Tensão na chave do *tap* 6E com pára-raios de 9 kV.

Os efeitos da operação do pára-raios são mostrados principalmente nas duas primeiras comutações, nas quais se observa a limitação das sobretensões transitórias na chave do *tap* 6E. Nesse caso, verifica-se que a solicitação de tensão nas chaves é menor que 17 kV. Do ponto de vista transitório, a operação do pára-raios proporciona o amortecimento das oscilações transitórias originadas

no instante de abertura das chaves. A figura 5.16 apresenta uma ampliação da figura 5.15, mostrando em detalhe as duas primeiras comutações.



a capacidade de dissipação de energia o pára-raios de 9 kV é perfeitamente viável.

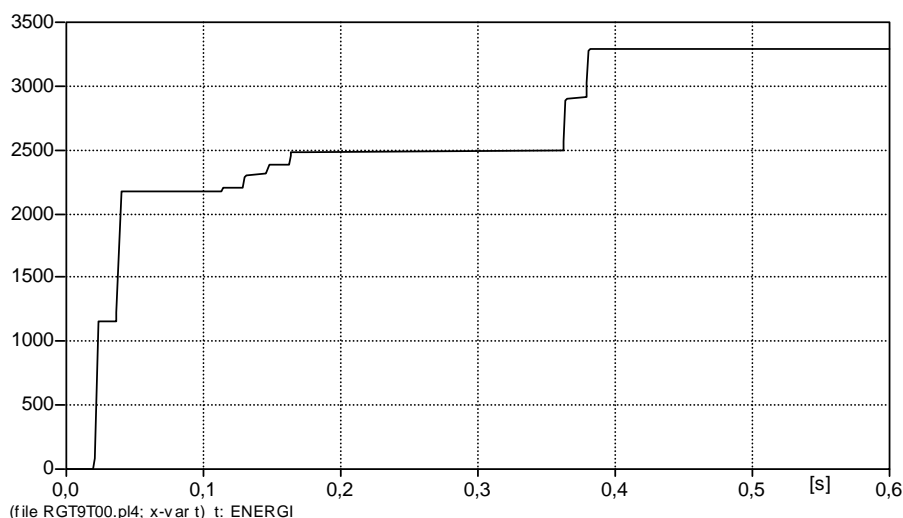
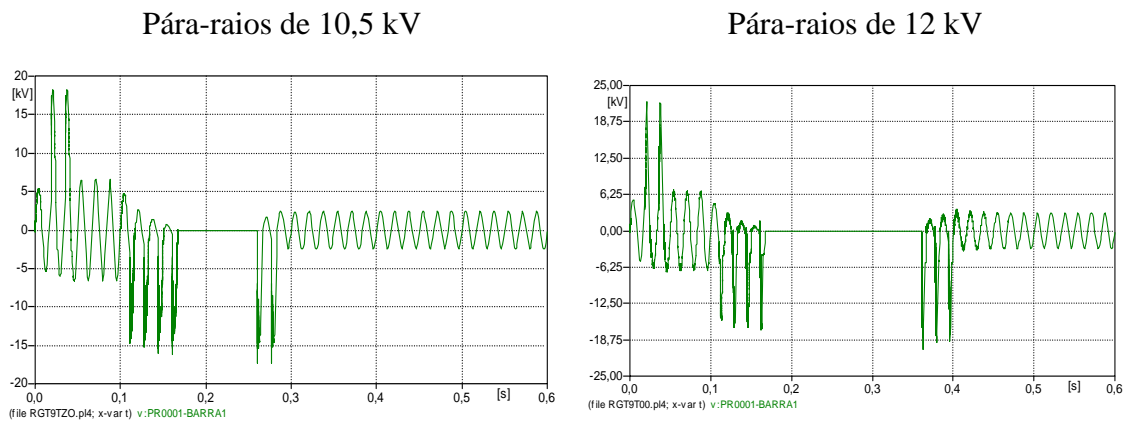
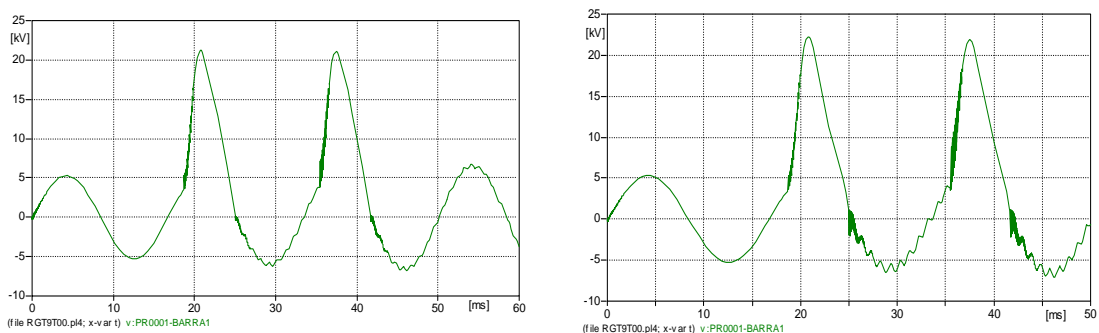


Figura 5.19: Energia dissipada no pára-raios com tensão nominal de 9kV.

(B) REGULADOR DE TENSÃO OPERANDO COM PÁRA-RAIOS DE 10,5 kV E 12 kV

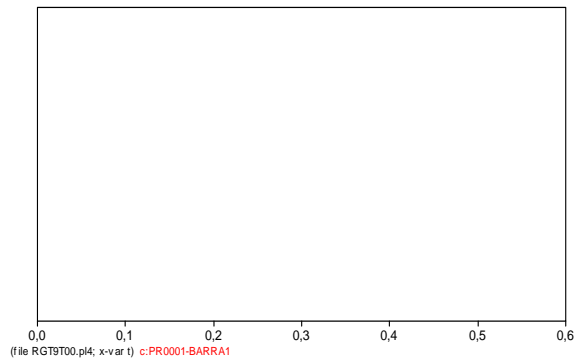
Há uma grande similaridade nos resultados obtidos nas simulações de operação do regulador de tensão com os pára-raios de 10,5 kV e 12 kV com os resultados apresentados no item (A), excetuando-se as amplitudes das grandezas analisadas, que são o foco principal desse estudo. Dessa forma, os resultados obtidos com a utilização dos pára-raios de 10,5 kV e 12 kV, são mostrados simultaneamente para cada uma das grandezas elétricas analisadas no item (A), nas figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23, para fins de comparação de resultados. Na figura 5.20 apresentam-se as sobretensões impostas à chave do *tap* 6E devido aos surtos de manobra.

(a) Formas de onda da tensão na chave do *tap* 6E.(b) Zoom da tensão na chave do *tap* 6E durante a 1ª e 2ª comutações.Figura 5.20: Sobretensões impostas à chave do *tap* 6E.

Observa-se, na figura 5.20, que no instante de abertura da chave que estava conduzindo, o pára raios é acionado, devido ao fato de que a sobretensão originada no transitório de comutação supera a tensão de referência do pára-raios, no instante de tempo $t = 18,9$ ms. Nesse momento, devido à inversão de polaridade da tensão na capacitância de fuga da bucha de carga, a tensão sobre a chave atinge um valor superior à tensão de referência, o que leva o pára-raios à condição de condução. Isto faz com que o pára-raios neutralize a condição de carregamento da capacitância de fuga, amortecendo acentuadamente o processo transitório.

A figura 5.21 mostra a condução de corrente durante a operação dos pára-raios de 10,5 kV e 12 kV, nos instantes de comutação de *taps*.

Pára-raios de 10,5 kV



Pára-raios de 12 kV

(file RGT9T00.pl4; x-var t)

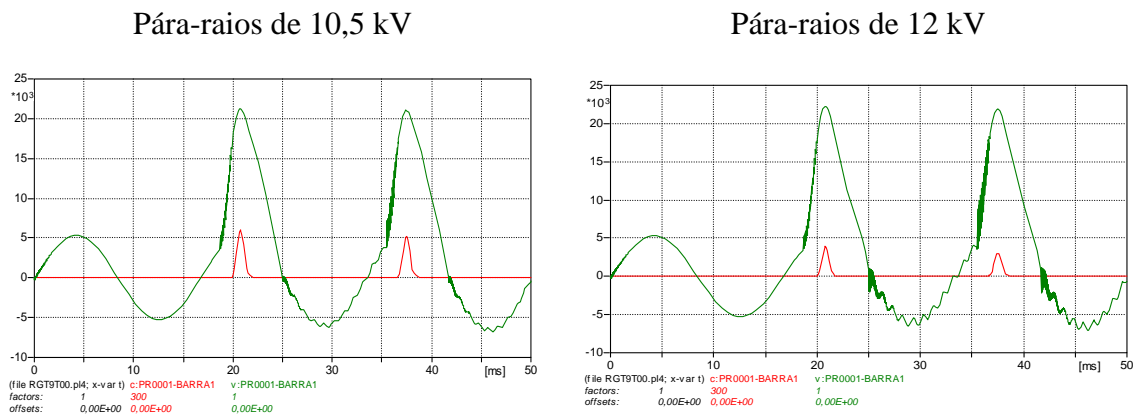


Figura 5.22: Formas de onda da tensão e da corrente nos pára-raios durante a 1ª e 2ª comutações

A máxima tensão disruptiva de impulso de manobra observada no pára-raios de 10,5 kV é de 16,379 kV enquanto que a máxima tensão residual que aparece nos seus terminais, tomada em seu valor de crista, é de 21,23 kV. No pára-raios de 12 kV, a máxima tensão disruptiva de impulso de manobra é de 17,57 kV enquanto que a máxima tensão residual que aparece nos terminais do pára-raios, tomada em seu valor de crista, é de 21,28 kV.

As quantidades de energia, em Joules, dissipadas nos dois pára-raios durante toda a simulação de operação do regulador de tensão estão mostradas na figura 5.23.

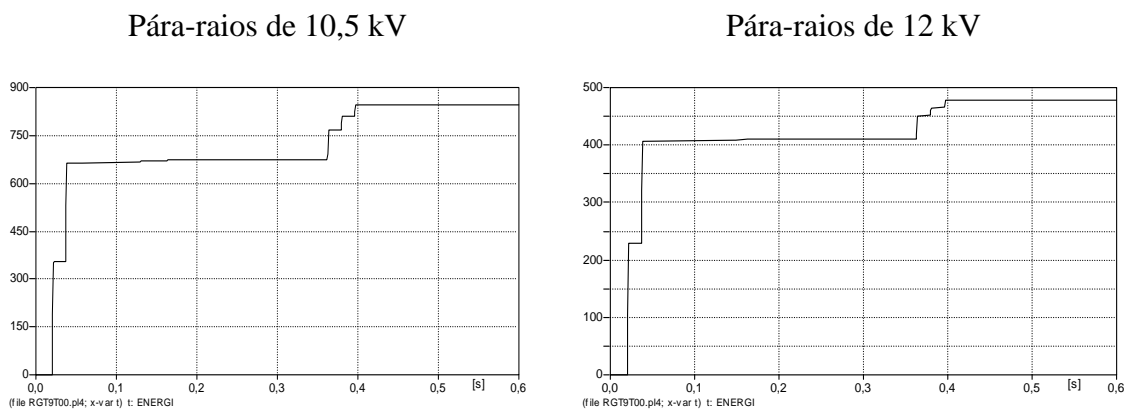


Figura 5.23: Energia total dissipada nos pára-raios.

A quantidade de energia dissipada no pára-raios de 10,5 kV, durante todo o tempo de simulação, foi de 844,75 J. Como os pára-raios com esta classe de tensão possuem uma capacidade de dissipação energética de 2,1 kJ/kV, este tipo

de pára-raios suportaria com larga margem de segurança, a quantidade de energia dissipada. O pára-raios de 12 kV dissipou 477,5 J de energia durante o processo de comutação. Com uma capacidade de dissipação energética de 2,1 kJ/kV, este tipo de pára-raios também é perfeitamente viável. Os valores de capacidade de dissipação energética foram extraídos da referência [11].

5.5.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES DEVIDO A COMUTAÇÃO DE *TAPS*.

Os resultados das simulações mostraram que o pára-raios de 9 kV limitou as sobretensões devido a comutação de *taps* a um valor máximo de 16,77 kV; conseqüentemente, as chaves estáticas devem suportar um nível de sobretensão maior que esse valor. Em princípio, pode-se pensar que, em relação aos custos das chaves, o emprego desse pára-raios na sua proteção representa a solução mais econômica, pois entre os três tipos simulados foi o que mais limitou as sobretensões de chaveamento. Entretanto, deve-se ter em conta que a tensão disruptiva desse pára-raios é 13,1 kV e esse nível de tensão é sustentado pela fonte. Isto significa que, no caso de uma condição de bloqueio permanente de todas as chaves, esse pára-raios estaria permanentemente em condição de condução, o que seria danoso para o mesmo. Logo, para o emprego do pára-raios de 9 kV, necessitar-se-ia de um sistema de proteção para o mesmo, que atuaria na condição de bloqueio de todas as chaves por um período de tempo mais elevado.

Se a utilização do pára-raios de 9 kV for descartada, os resultados mostram que entre os dois tipos restantes (10,5 kV e 12 kV), o pára-raios de 12 kV se apresenta como o mais indicado. Essa conclusão baseia-se no fato de que o pára-raios de 12 kV limita a sobretensão de comutação de *taps* a um valor

praticamente igual ao do pára-raios de 10,5 kV e a sua tensão disruptiva é maior que a tensão sustentada pela fonte. A tabela 1.3, a seguir, apresenta esses valores.

Tabela 5.4: Resultados comparativos dos três tipos de pára-raios.

<i>Tensão nominal (kV)</i>	<i>Tensão Disruptiva (kV – crista)</i>	<i>Tensão Residual (kV – crista)</i>
9	13,10	16,77
10,5	16,38	21,23
12	17,57	21,28

5.6. ESTUDO DE PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS CONTRA SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Este estudo tem como finalidade prover proteção das chaves estáticas do regulador de tensão contra descargas atmosféricas na rede de alimentação.

Os pára-raios são comumente empregados nas redes elétricas para proteção dos equipamentos contra descargas atmosféricas. Considerando que normalmente existem vários pára-raios distribuídos ao longo das linhas de distribuição, um pára-raios de 12 kV foi implementado na entrada da linha 1 do sistema elétrico em estudo e outro na entrada do regulador, conforme representado na figura 5.24.

Assim, a proteção do regulador de tensão contra surtos originados por descargas atmosféricas é feita através da instalação de um pára-raios na entrada do regulador. Nesse caso, é importante observar os níveis de tensão aos quais as chaves dos *taps* ficarão submetidas a fim de garantir que tais níveis não sejam maiores que o limite de suportabilidade destas. Considerando a existência de um pára-raios anteriormente instalado entre os terminais da chave do *tap* 6E, para

fazer a proteção contra surtos de tensão produzidos pela comutação de *taps*, analisa-se o comportamento do mesmo no caso de uma descarga atmosférica. Primeiramente, considera-se o pára-raios de 9 kV fazendo a proteção contra surtos de comutação de *taps* e um pára-raios de 12 kV ligado na entrada do regulador, enquanto um outro pára-raios, também de 12 kV, encontra-se a um quilômetro de distância deste, para prover a proteção do regulador contra descargas atmosféricas. Uma descarga de 10 kA, com frente de onda de $1,2 \times 50 \mu\text{s}$, é aplicada no meio da linha de distribuição, para analisar os níveis de sobretensões originadas no regulador de tensão e nas chaves ligadas aos *taps*.

A figura 5.24 apresenta o esquema utilizado na simulação do regulador de tensão com pára-raios para proteção contra descargas atmosféricas, que é objeto deste estudo.

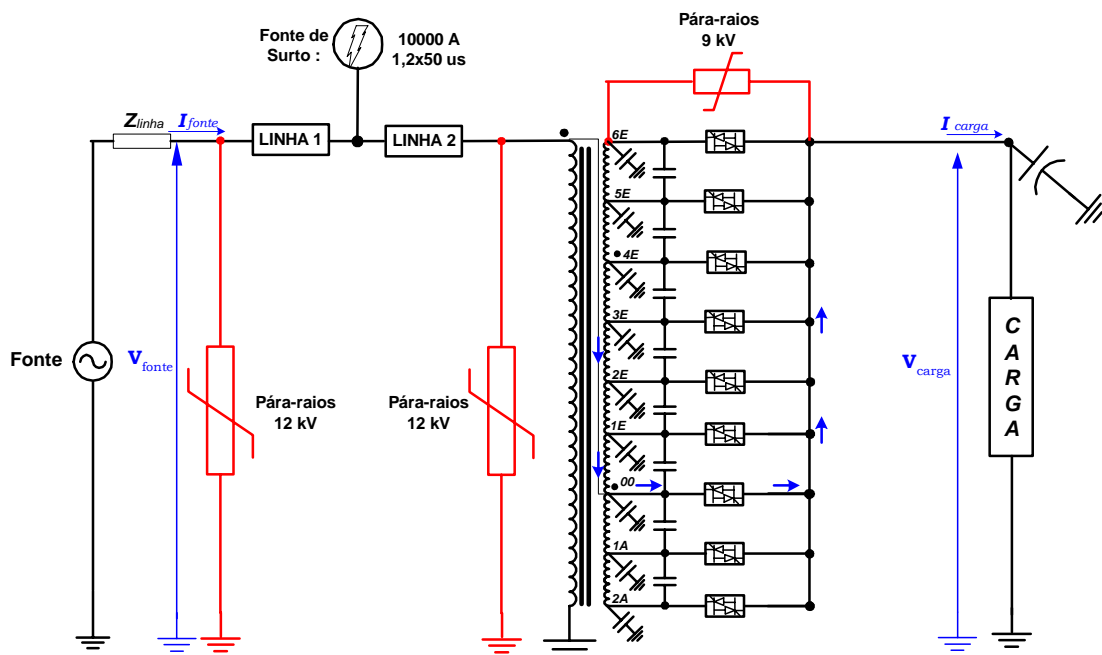


Figura 5.24: Modelo de Regulador de Tensão com 9 degraus e pára-raios de proteção contra descargas atmosféricas.

Neste estudo de proteção contra descargas atmosféricas, a linha de transmissão que alimenta o regulador de tensão foi representada por dois trechos de linha de 1 km de comprimento cada um, modelados com parâmetros distribuídos.

A linha de transmissão utilizada na simulação foi representada com os seguintes parâmetros elétricos:

- Resistência elétrica: 0,005 ohm / km;
- Indutância: 1 mH / km;
- Capacitância: 11,11 pF / km.

Considerando a ocorrência de uma descarga atmosférica no meio da linha de alimentação do regulador de tensão, duas frentes de ondas de tensão são geradas:

- uma percorre a rede, viajando pela metade da linha (linha 2) em direção ao regulador de tensão;
- outra percorre a rede, viajando pela outra metade da linha (1

5.6.1. SIMULAÇÃO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA NO MEIO DA LINHA DE ALIMENTAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO

A figura 5.25 mostra a forma de onda da diferença de potencial entre os terminais do pára-raios na entrada do regulador. Durante a descarga atmosférica, a máxima tensão residual no pára-raios foi de 33,5 kV. A observação da figura 5.25 revela a presença de oscilações transitórias de alta frequência na tensão, que se justificam pelas reflexões de ondas no modelo de linha implementado. Essa frequência de oscilação depende do posicionamento dos diversos pára-raios conectados no sistema elétrico e do comprimento da linha.

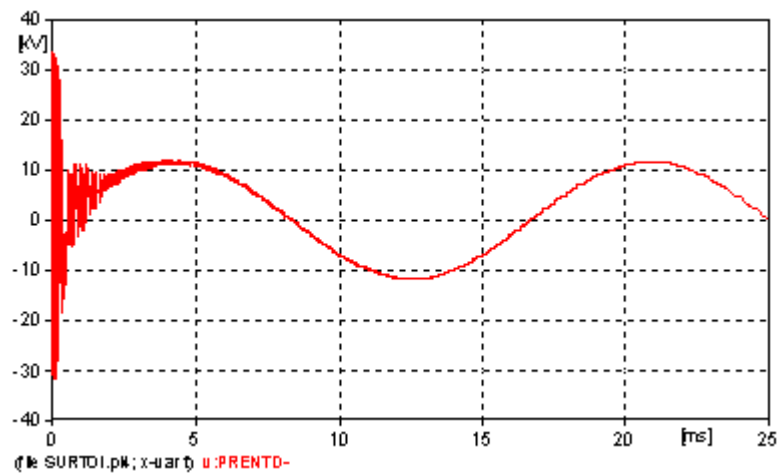
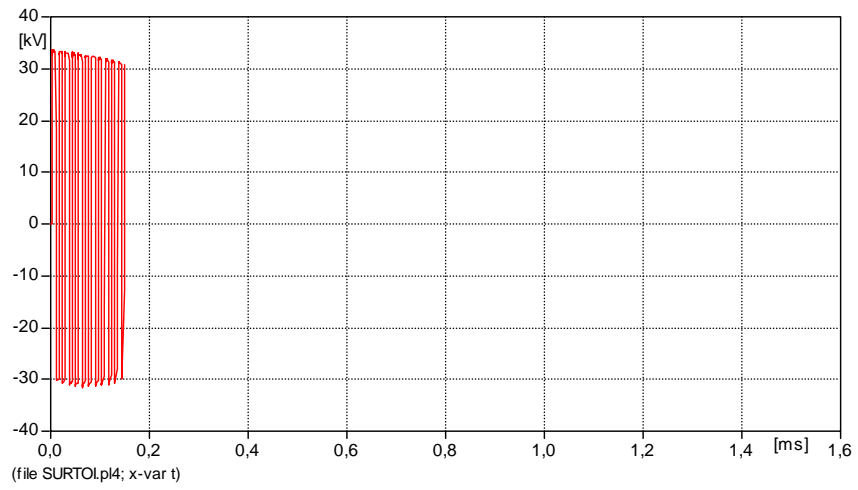


Figura 5.25: Forma de onda da tensão no pára-raios instalado na entrada do regulador.

Uma ampliação da figura 5.25, evidenciando somente os instantes iniciais após a ocorrência da descarga atmosférica, é mostrada na figura 5.26.



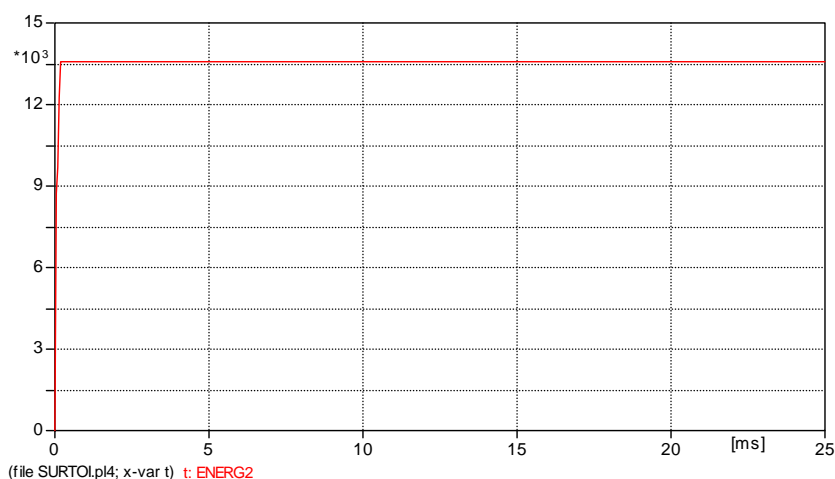


Figura 5.28: Quantidade de energia dissipada no pára-raios instalado na entrada do regulador.

A figura 5.29 mostra a forma de onda da tensão nos terminais do pára-raios ligado próximo à fonte de tensão. Durante a descarga atmosférica, a máxima tensão residual é de 33,4 kV.

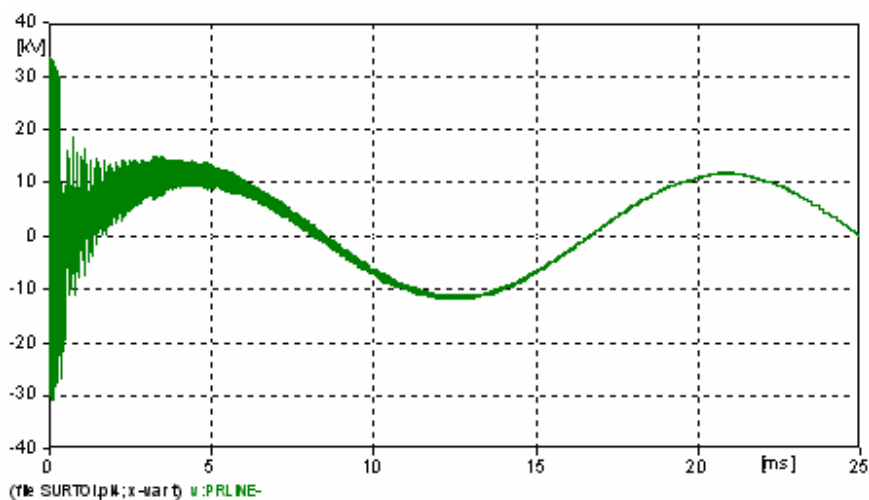


Figura 5.29: Forma de onda da tensão no pára-raios do sistema de distribuição.

A forma de onda da tensão durante a operação do pára-raios do sistema de distribuição é mostrada em detalhe na figura 5.30.

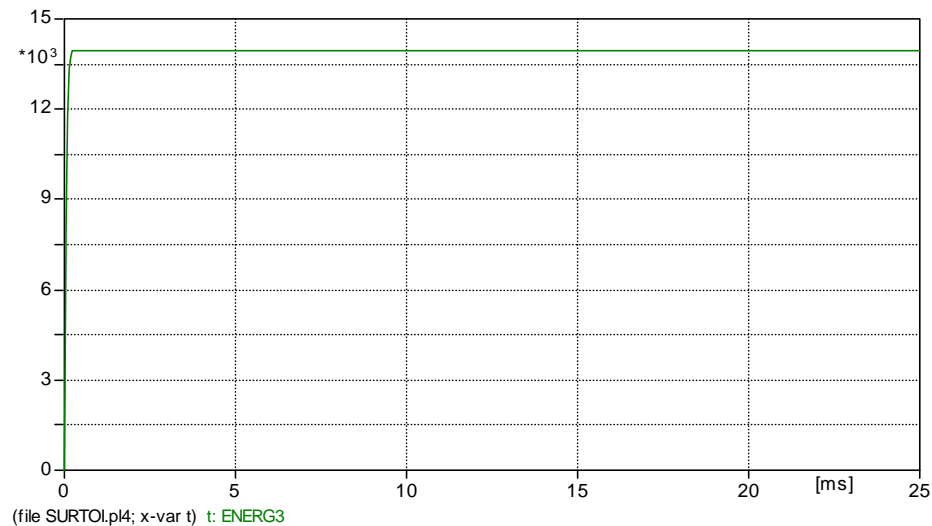


Figura 5.32: Dissipação energética no pára-raios do sistema de distribuição.

A figura 5.33 mostra a forma de onda da tensão entre os terminais do pára-raios de proteção das chaves. Durante a descarga atmosférica, a máxima tensão residual é de 18 kV.

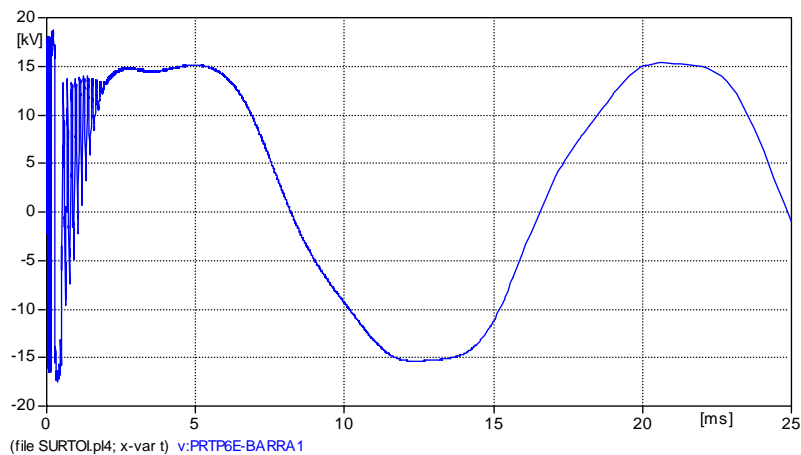


Figura 5.33: Forma de onda da tensão imposta ao pára-raios de proteção das chaves.

A figura 5.34 mostra em detalhe a tensão residual no pára-raios, focando um intervalo de tempo inicial de 0,6 ms.

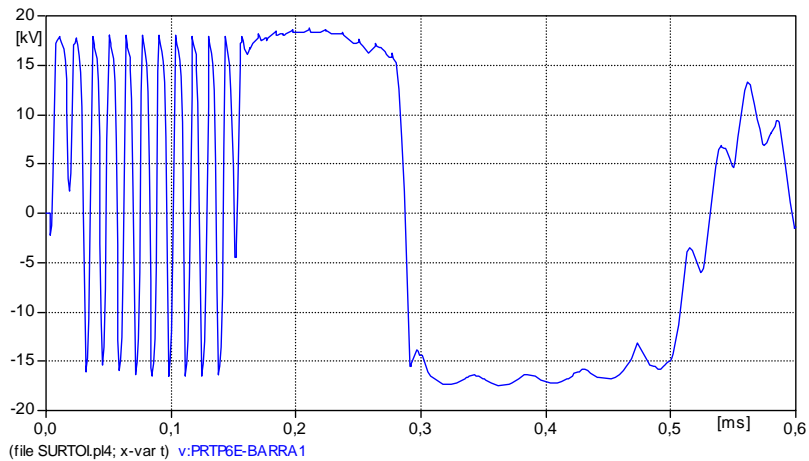


Figura 5.34: Zoom da tensão no pára-raios de proteção das chaves.

Ao contrário dos pára-raios instalados na entrada do regulador e no sistema de distribuição, o pára-raios de proteção das chaves não entrou em condução somente durante a descarga atmosférica. Conforme mostra a figura 5.35, uma pequena corrente é conduzida em três outros instantes diferentes. Essa corrente é devido à tensão do *tap*, que supera a tensão disruptiva do pára-raios.

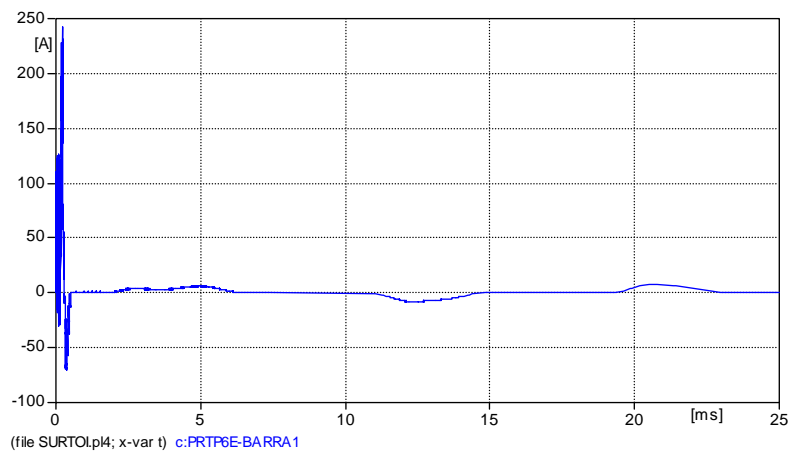


Figura 5.35: Corrente de descarga no pára-raios de proteção das chaves.

A figura 5.36 mostra uma ampliação da figura 5.35, destacando os instantes iniciais seguintes à ocorrência da descarga atmosférica. Nessa figura, verifica-se que o pico máximo de corrente de descarga é de 240 A.

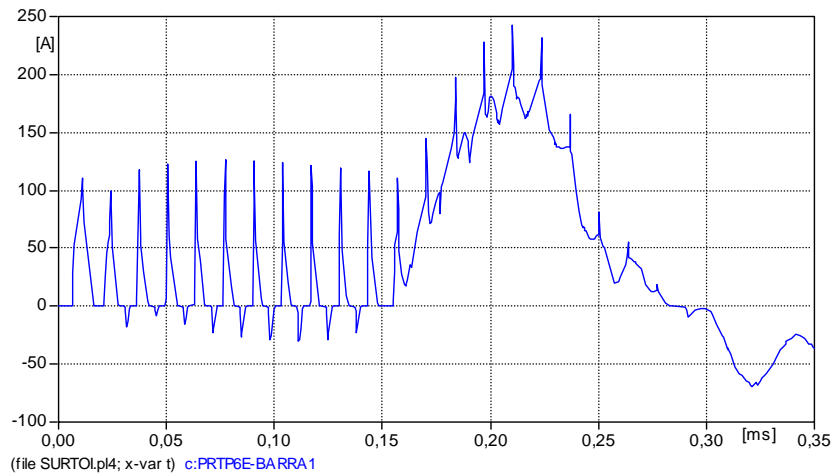


Figura 5.36: Corrente de descarga no pára-raios de proteção das chaves durante a descarga atmosférica.

A figura 5.37 mostra a quantidade de energia dissipada no pára-raios. Observa-se nessa figura que, a cada valor de crista da forma de onda da tensão no tap 6E (figura 5.34), o pára-raios entra em condução conforme se observa nas figuras 5.35 e 5.36, de maneira que o valor da energia dissipada é acrescido em determinado patamar. Isso se deve ao fato de que a tensão disruptiva desse pára-raios é menor que o valor de crista da tensão aplicada sobre o mesmo. Nesse caso, o nível de energia dissipada será permanentemente crescente como mostra a figura 5.37. Como já mencionado anteriormente, deve-se fazer a proteção desse pára-raios através de uma chave “*by-pass*” quando as chaves eletrônicas ficarem na condição de bloqueio por um período maior de tempo.

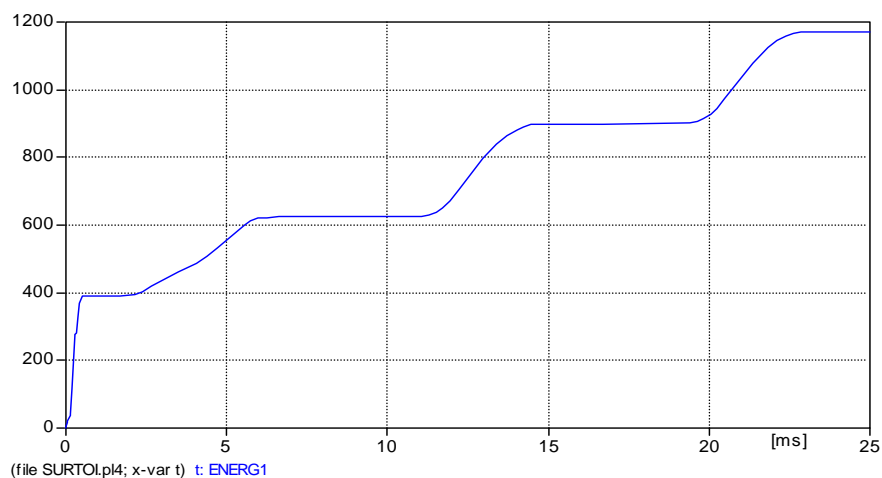


Figura 5.37: Dissipação energética no pára-raios de proteção das chaves.

A comparação da figura 5.33 com a figura 5.25 mostra que a operação do pára-raios impôs uma queda de tensão entre os *taps* 6E e 00 no sentido contrário ao fluxo de corrente. Isto significa que a tensão nos demais *taps* serão maiores que a tensão no *tap* 6E, ou seja, as chaves desses *taps* ficam sujeitas a níveis de tensões cada vez maiores. Logo, conclui-se que a chave ligada ao *tap* 2A ficará submetida ao maior nível de tensão. Este fato foi confirmado através dos resultados da simulação, que comprovam que a chave do *tap* 2A fica submetida a um nível de sobretensão da ordem de 43 kV, durante a descarga atmosférica, como mostra a figura 5.38. Tendo-se em conta que tal nível de tensão sobre as chaves eletrônicas é prejudicial às mesmas, a proteção destas é feita acrescentando mais um pára-raios de 9 kV em paralelo com a chave do *tap* 2A.

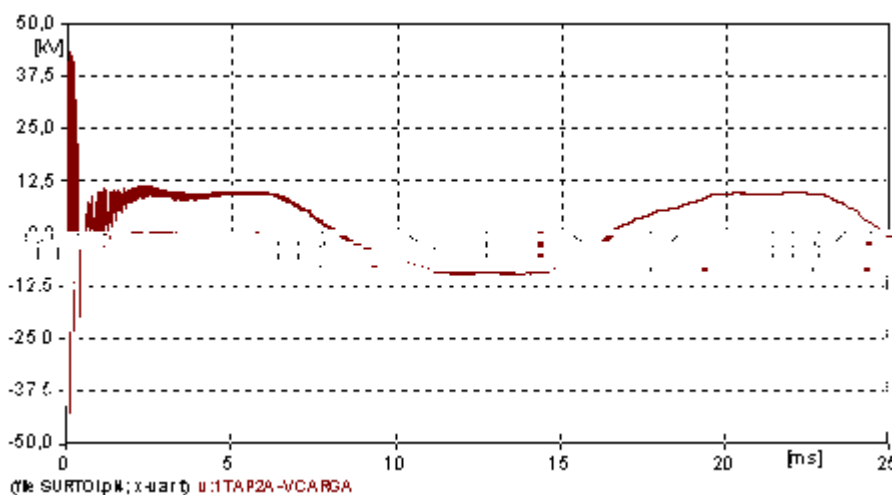


Figura 5.38: Solicitação de tensão imposta à chave do *tap* 2A.

A forma de onda da tensão à qual a chave do *tap* 2A fica submetida durante a descarga atmosférica é mostrada em detalhe na figura 5.39.

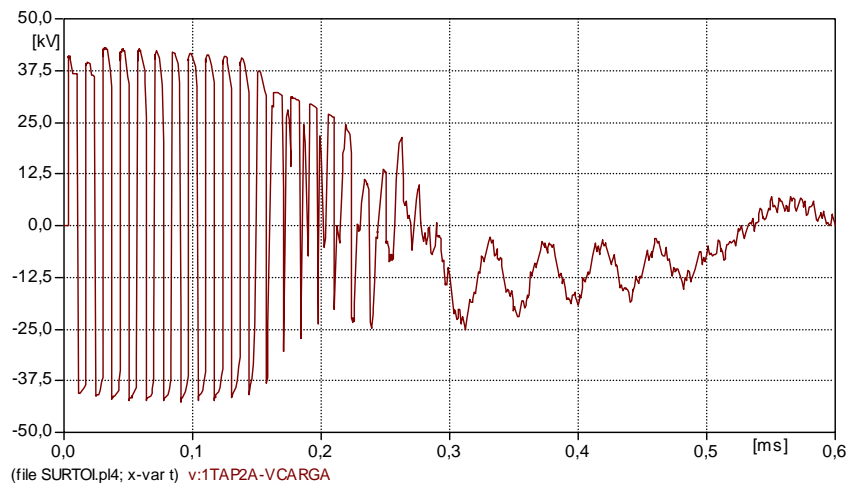


Figura 5.39: Zoom da tensão imposta à chave do *tap* 2A durante a descarga.

O circuito completo de proteção do regulador de tensão é então mostrado na figura 5.40. Dessa forma, fez-se a simulação considerando um pára-raios de 9 kV ligado em paralelo com a chave do *tap* 2A, a fim de prover proteção das chaves contra elevados valores de solicitação de tensão devido a descargas atmosféricas.

A proteção das chaves é então feita através da implementação de dois pára-raios com tensão nominal de 9 kV:

- um pára-raios instalado em paralelo com a chave do *tap* 6E para prover proteção contra sobretensões originadas pela comutação de *taps*;
- um pára-raios instalado em paralelo com a chave do *tap* 2A para prover proteção contra sobretensões originadas por descargas atmosféricas;

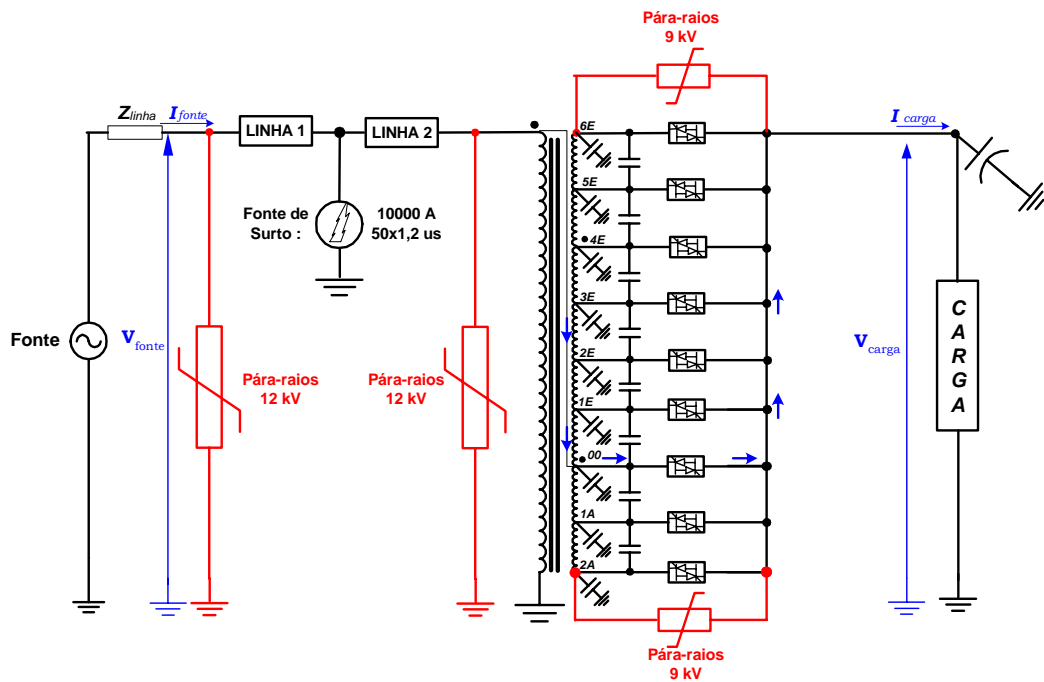


Figura 5.40: Modelo de regulador de tensão com 9 degraus e sistema de proteção contra sobretensões originadas por manobra e por descargas atmosféricas.

A figura 5.41 mostra a atuação do pára-raios instalado em paralelo com a chave do *tap* 2A, limitando a sobretensão imposta às chaves em 25,3 kV, para a mesma seqüência de operação considerada nos resultados anteriores.

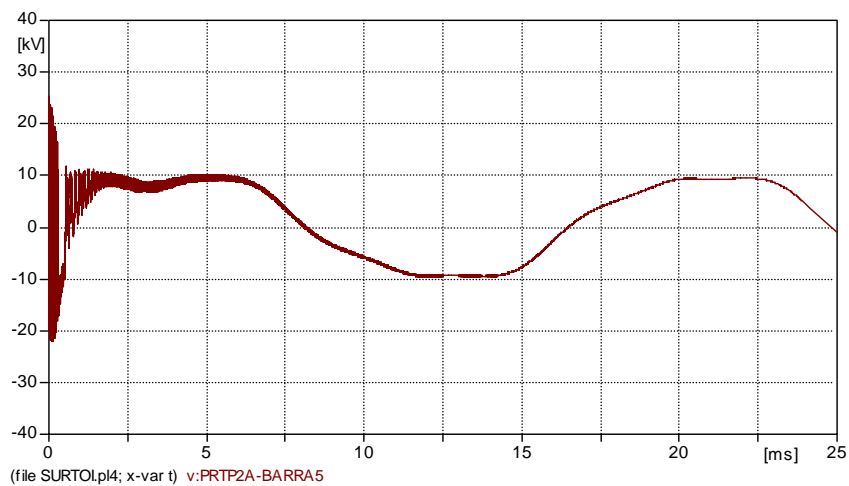


Figura 5.41: Tensão no pára-raios instalado no *tap* 2A durante toda a simulação.

Uma ampliação da figura 5.41 mostra que realmente o pico de sobretensão imposta às chaves ficou limitada em 25,3 kV. Os picos de sobretensão nas chaves ligadas aos demais *taps* são menores do que 25 kV.

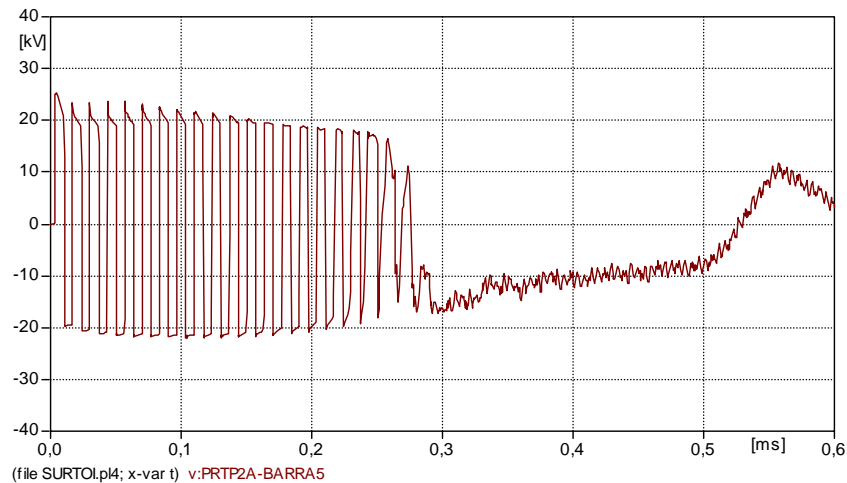


Figura 5.42: Tensão no pára-raios instalado no *tap* 2A durante a descarga atmosférica.

A corrente de descarga conduzida pelo pára-raios é mostrada na figura 5.43. Ao contrário do pára-raios instalado no *tap* 6E, que entra em condução nos instantes de tempo em que a tensão do *tap* supera a tensão disruptiva, conforme pode ser observado na figura 5.33, o pára-raios instalado no *tap* 2A somente entra em condução em decorrência da descarga atmosférica, ou seja, em operação contínua, estando todas as chaves na condição de bloqueio, este pára-raios não fica submetido a valores de tensão maiores que o seu nível de tensão disruptiva, não necessitando de proteção como a chave “by-pass” para a sua operação em regime permanente.

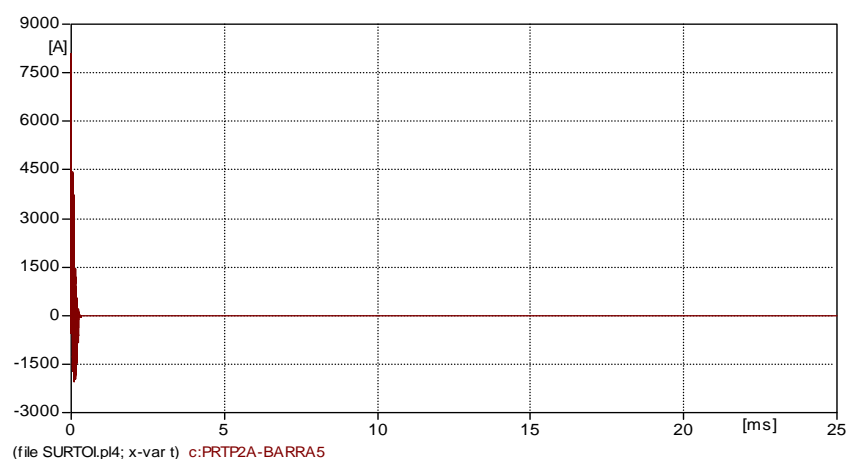


Figura 5.43 Corrente de descarga do pára-raios instalado no *tap* 2A.



5.7. CONCLUSÕES SOBRE O ESTUDO DE PROTEÇÃO DAS CHAVES CONTRA SOBRETENSÕES

Os resultados computacionais obtidos neste estudo permitem a definição das características elétricas dos pára-raios mais adequados para compor o sistema de proteção, bem como o local mais adequado à instalação destes dispositivos.

A proteção do regulador de tensão é feita com a instalação de um pára-raios na entrada do regulador de tensão enquanto que o sistema de proteção das chaves é composto por um pára-raios instalado em paralelo com a chave do *tap* 6E e outro instalado em paralelo com a chave do *tap* 2A, conforme apresentado na figura 5.40. A implementação do modelo de pára-raios ZnO utilizando valores comerciais extraídos da referência [11] e, portanto, mostrando a exeqüibilidade de tal operação, demonstrou que tanto as chaves eletrônicas quanto o próprio regulador de tensão podem ser eficientemente protegidos contra sobretensões.

As capacitâncias de fuga do barramento de carga têm grande influência na quantidade de energia dissipada no pára-raios. Uma vez que essa capacitância é função de parâmetros da rede elétrica tais como: comprimento das redes de transmissão e distribuição, características das capacitâncias dos cabos utilizados e capacitâncias de fuga das buchas e enrolamentos do regulador, a capacidade energética do pára-raios deve ser dimensionada de acordo com o sistema onde será instalado o regulador de tensão.

A análise dos resultados apresentados neste capítulo fundamenta as seguintes considerações sobre o sistema de proteção contra sobretensões:

- i. *Proteção contra sobretensões originadas pela comutação de taps:*

Os resultados do estudo de proteção, mostrados na tabela 5.4, permitem concluir que o pára-raios com tensão nominal 9 kV é o que mais limE

dissipada neste pára-raios foi de 13,6 kJ, o que não coloca em risco a integridade do equipamento, visto que o mesmo possui uma capacidade de dissipação energética de 2,1 kJ/kV para uma descarga com duração de até 2000 μ s.

A instalação de pára-raios de 9 kV entre os terminais das chaves dos *taps* 2A e 6E provê a proteção de todas as chaves dos demais *taps* contra sobretensões originadas tanto por comutação de *taps* quanto por descargas atmosféricas. Nesse último caso, o maior valor de sobretensão imposta às chaves é de 25,3 kV. Como foi mostrado anteriormente, o pára-raios de 9kV instalado no *tap* 6E fica submetido a uma situação de condução contínua porque o valor de crista da tensão no *tap* é maior que a sua tensão disruptiva. Para esse pára-raios, verifica-se pela figura 5.37 que a taxa de crescimento de energia no pára-raios é da ordem de 34 joules/ms. Logo, levando-se em conta a sua capacidade de dissipação energética que é de 2,1 kJ/kV, ou seja, 18,9 kJ, verifica-se que a chave “by-pass” deve operar em torno de 500 ms para garantir a sua integridade.

A instalação do pára-raios de 9 kV em paralelo com a chave do *tap* 2A reduz a quantidade de energia dissipada pelo pára-raios da entrada do regulador frente a surtos atmosféricos, pois parte dessa energia é dissipada nele.

5.8. IMPLEMENTAÇÃO DE UM REATOR PARA LIMITAÇÃO DAS CORRENTES DE FALTA NO REGULADOR DE TENSÃO

Além da proteção das chaves estáticas contra sobretensões originadas por surtos de manobra e por descargas atmosféricas, faz-se necessária, a realização de um estudo de proteção, para limitar a circulação de correntes de falta pelo regulador, mais especificamente, reduzir a intensidade de corrente que percorre

as chaves, quando ocorrer um curto-circuito fase-terra na carga ou uma situação de má operação das chaves [14,17].

O estudo de proteção das chaves contra sobrecorrentes, foi dividido em duas partes. A primeira parte do estudo, tem por objetivo, analisar os efeitos da implementação de um reator para a limitação da corrente de curto-circuito que é estabelecida pelas chaves do regulador, em uma situação de ocorrência de curto-circuito na carga. Posteriormente, é analisada a operação do regulador com a instalação do reator para limitar a corrente de falta, quando ocorrer uma situação de curto-circuito entre dois *taps*.

Pretende-se ainda definir, através dos resultados obtidos nas simulações desses dois estudos de caso, a localização mais adequada para a instalação deste reator, uma vez que o mesmo pode ser instalado em série com a carga, na saída do regulador de tensão ou na entrada do regulador de tensão, tendo-se em conta que a corrente de curto-circuito deve ser limitada ao valor máximo de 2 kA.

5.8.1. ESTUDOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NA CARGA CONECTADA AO REGULADOR

Neste estudo, a operação do regulador de tensão é analisada para o caso de ocorrência de uma falta fase-terra na carga no instante de tempo $t = 600$ ms. A situação de curto-circuito permanece durante todo o tempo restante de simulação, para que o funcionamento do reator seja avaliado.

A figura 5.46 mostra o sistema elétrico utilizado para esse estudo, assim como o modelo de regulador de tensão com a implementação do reator de limitação de corrente de curto-circuito na carga.

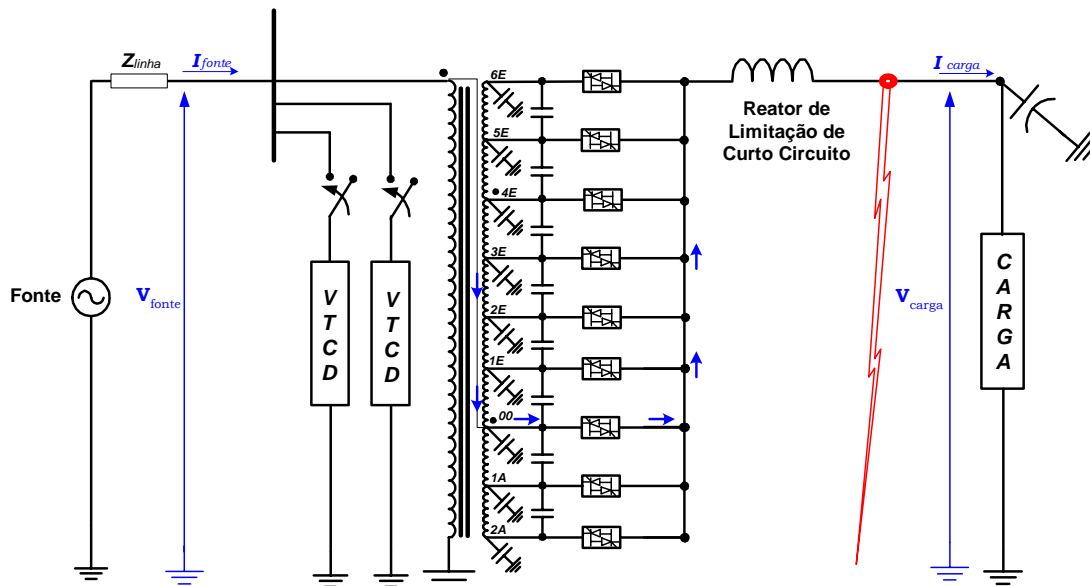


Figura 5.46: Esquema de ligação do sistema elétrico para estudo de curto-circuito na carga.

O modelo de regulador de tensão utilizado neste estudo possui as mesmas características do modelo adotado para os estudos de proteção contra sobretensões, conforme foi definido no capítulo II. A impedância da linha que liga a fonte ao regulador de tensão é de $(0,0011 + j0,799)$, o que limita a corrente de curto-circuito simétrica rms em 10 kA.

Assim, a função básica do reator de limitação de curto-circuito na carga é reduzir a amplitude da corrente de falta que circula pelas chaves, evitando a sua danificação.

O limite máximo estabelecido para a corrente em qualquer chave é 2,0 kA de acordo com a capacidade de condução de corrente das chaves para esta classe de tensão. É importante observar que não existem chaves capazes de operar com o nível de tensão da classe de tensão deste modelo de regulador (7,97 kV). Sendo assim, há a necessidade de ligação em série de chaves para atender a tensão de operação suportável pelas mesmas.

Para o dimensionamento do reator limitador da corrente de curto-circuito, também se considerou desprezível a impedância de curto-circuito do sistema elétrico, e que o valor da corrente de curto-circuito simétrica rms será limitado

em 2 kA. Logo, em regime permanente, a corrente a plena carga do regulador produzirá uma queda de tensão no mesmo de 5%, ou seja, o reator deverá ter uma potência de 40 kVAr, aproximadamente. Desta forma tem-se as seguintes características elétricas deste reator:

- Tensão nominal: 398,5 volts - 5% da tensão nominal;
- Corrente em regime permanente: 100 A;
- Reatância indutiva: 3,985 Ω ;
- Indutância: 10,570 mH.

Com as características elétricas descritas anteriormente, caso ocorra uma falta à terra, desprezando-se a impedância da fonte, a queda de tensão imposta ao reator é igual à tensão nominal do regulador de tensão (7,97 kV). Para esta condição de operação, a corrente de falta será limitada ao valor de 2 kA sem considerar o fator de assimetria desta corrente (valor *rms* da componente simétrica da corrente de curto-circuito).

5.8.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA CARGA

Neste item, apresenta-se os resultados da simulação de operação do regulador de tensão com ocorrência de falta fase-terra na carga sem e com o reator de limitação de curto-circuito.

(A) - OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100A COM FALTA À TERRA, SEM A INSTALAÇÃO DO REATOR

Neste caso, ainda não foi implementado o reator de limitação da corrente de curto-circuito. O regulador de tensão está conectado a uma carga de 100 A e fator de potência 0,94, com a seguinte composição:

- Carga RC série 25 A e $fp = 0,95$;
- Carga resistiva de 1 kW;
- Carga RL série de 30 A e $fp = 0,9$;
- Carga RL série de 10 A e $fp = 0,92$;
- Carga RL série de 10 A e $fp = 0,85$;
- Carga RL série de 8 A e $fp = 0,8$;
- Carga RL série de 25 A e $fp = 0,8$.

A fonte opera com tensão nominal e o regulador de tensão está com o *tap* 00 acionado no instante de ocorrência do curto-circuito na carga.

Antes da falta, o valor eficaz da tensão na carga é de 7.976 V. A figura 5.47 mostra a tensão eficaz na carga durante toda a operação do regulador de tensão.

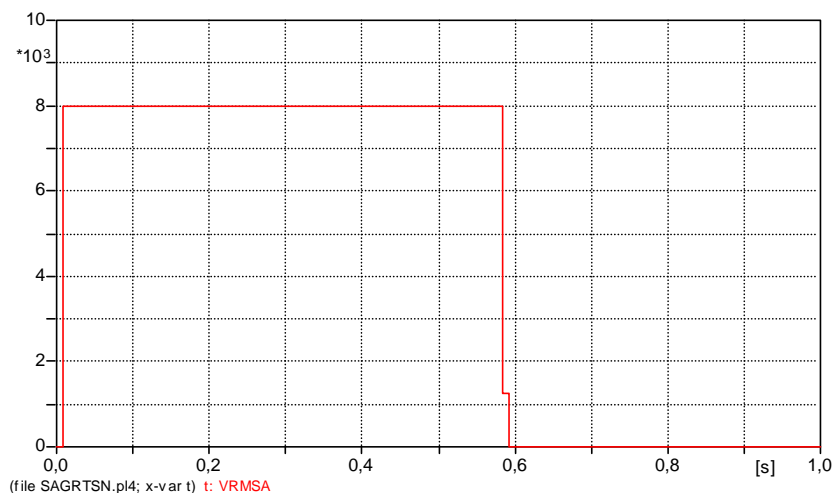


Figura 5.47: Valor eficaz da tensão na carga medido a cada meio ciclo com a ocorrência de curto-circuito fase-terra sem o reator de limitação de curto-circuito.

A falta à terra no lado na carga ocorre no instante $t = 600$ ms. Como pode ser visto na figura 5.48, a corrente de curto-circuito simétrica rms é de 10 kA. O

fator de assimetria da corrente de falta pode ser no máximo igual a dois, o que determinaria uma corrente de aproximadamente 20 kA, nesse caso.

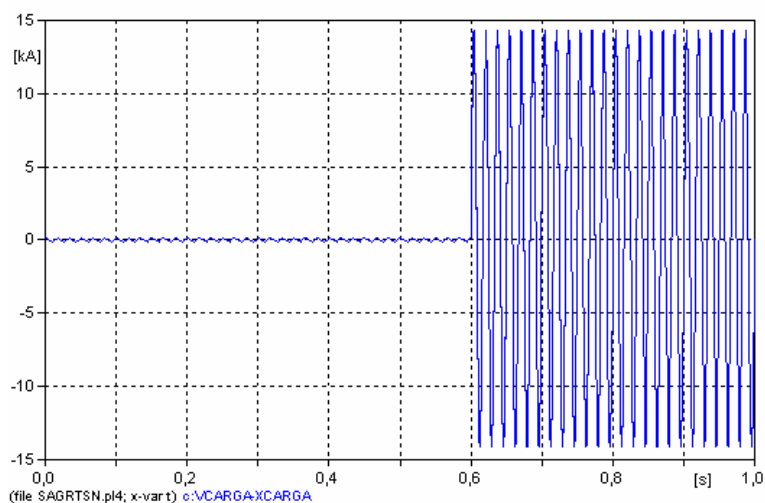


Figura 5.48: Forma de onda da corrente de curto-circuito com a ocorrência de curto-circuito fase-terra, sem o reator de limitação de curto-circuito.

(B) - OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100A, SUBMETIDO A UM CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA. O REATOR ESTÁ LIGADO NA SAÍDA DO REGULADOR.

Observa-se que a inserção do reator de limitação da corrente de curto-circuito na carga provocou uma queda de tensão na mesma, uma vez que este foi projetado para uma queda de tensão de 5% da tensão nominal (7,97 kV) para uma circulação de corrente de 100A. Essa queda de tensão na carga, provocada pela instalação do reator, é corrigida pelo regulador de tensão.

O valor máximo da tensão no reator é de 9,58 kV, após a ocorrência da falta. Antes da ocorrência da falta, o valor máximo de queda de tensão imposta ao reator é de 559,0 Volts, o que equivale a 5,0% da tensão nominal do regulador de tensão. A figura 5.49 apresenta a forma de onda da tensão no reator.

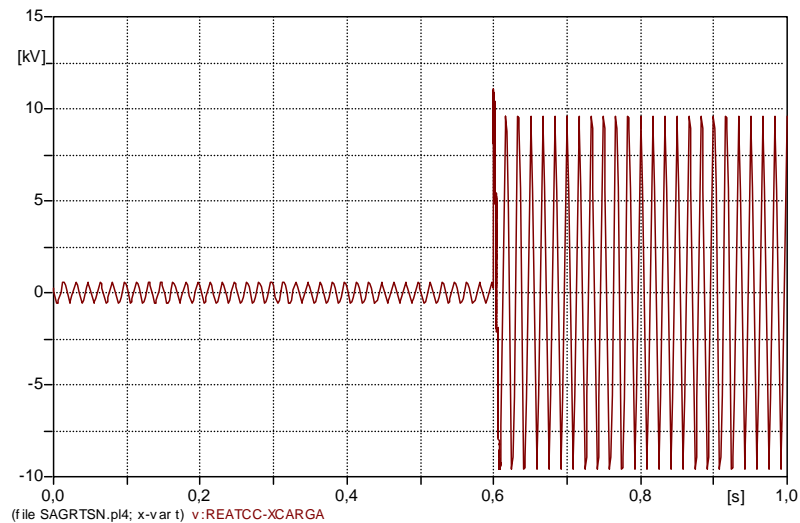


Figura 5.49: Forma de onda da tensão no reator de limitação de curto-circuito. Reator ligado na saída do RT.

A forma de onda da corrente de curto-circuito é mostrada na figura 5.50. A instalação do reator na saída do regulador de tensão limitou a intensidade da corrente de curto-circuito simétrica rms a 1,7 kA. Antes da ocorrência do curto-circuito na carga, a corrente que circula pelo reator é a corrente de carga, com valor eficaz de 100A.

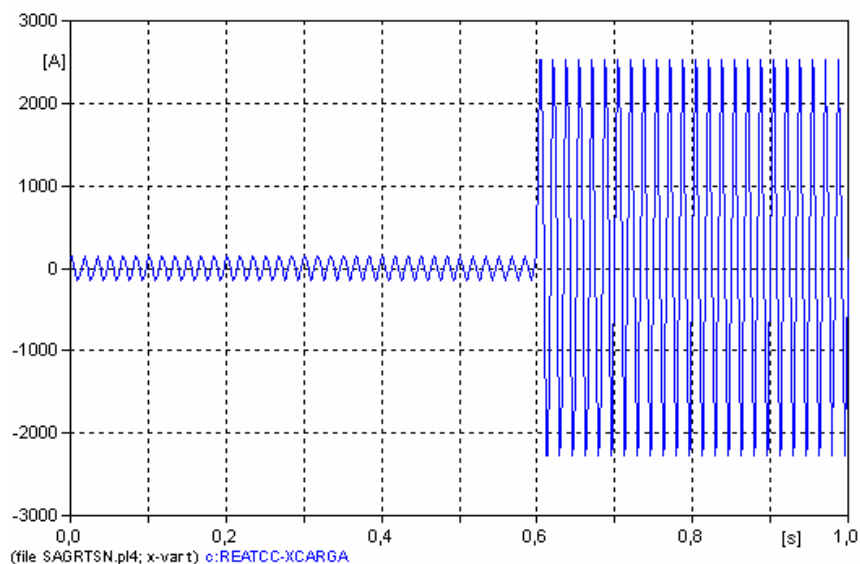


Figura 5.50: Forma de onda da corrente no reator de limitação de curto-circuito. Reator na saída do RT.

Com a finalidade de identificar a situação de maior intensidade de corrente de curto-circuito, realizou-se a simulação computacional da operação

do regulador com o *tap* 2A acionado (situação de 1,1 pu de tensão na fonte) no momento da falta e, posteriormente, com o *tap* 6E acionado (situação de 0,7 pu de tensão na fonte) no momento da falta. Os valores da queda de tensão no reator e da corrente de curto-circuito simétrica rms obtidos neste estudo, estão resumidos na tabela 5.5. Observa-se que a condição de maior intensidade de corrente de falta é quando o *tap* 2A está em condução, porém, com pequena diferença em relação à intensidade de corrente com o *tap* 00 conduzindo. Já para a operação do regulador no *tap* 6E, a porção do enrolamento da bobina de *taps* provoca uma maior redução do nível de corrente de curto-circuito. Assim, a pior condição é aquela na qual a fonte opera com 1,1 pu de tensão e o regulador está com o *tap* 2A em condução.

Tabela 5.5: Resultados da simulação computacional com o reator ligado na saída do RT

<i>TAP</i> EM CONDUÇÃO	QUEDA DE TENSÃO NO REATOR [KV] - CRISTA	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICA RMS [KA]
2A	9,77	1,74
00	9,58	1,70
6E	6,85	1,22

(C) - OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO ALIMENTANDO UMA CARGA DE 100A, SUBMETIDO A UM CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA. O REATOR ESTÁ LIGADO NA ENTRADA DO REGULADOR

Neste caso, o reator de limitação da corrente de curto-circuito está ligado do lado da fonte, ou seja, na entrada do regulador de tensão. O regulador opera com o *tap* 2A em condução, no instante de ocorrência da falta. Os resultados obtidos na simulação computacional deste caso estão mostrados na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados da simulação computacional com o reator ligado na entrada do RT.

TAP EM CONDUÇÃO	QUEDA DE TENSÃO NO REATOR [kV]- CRISTA	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICA RMS [kA]
2A	7,35	1,84

Observa-se que, durante a ocorrência da falta, a tensão da fonte fica dividida em duas parcelas: uma sobre o reator e outra sobre a impedância da linha, de maneira que quase toda a tensão da fonte é imposta ao reator, resultando em tensão nula na bobina de excitação. A elevação da intensidade da corrente de falta, quando o reator é instalado na entrada do regulador, justifica-se pela redução do valor da tensão na bobina de excitação, o que determina uma menor queda de tensão na porção de enrolamento do *tap* 2A, na bobina de *taps*.

A análise dos resultados mostrados nas tabelas 5.5 e 5.6, permite concluir que, a instalação do reator na entrada do regulador é mais adequada do que a sua instalação na saída, uma vez que, além de limitar a corrente de curto-circuito na carga, o reator contribui também para a limitação da corrente de falta em uma situação de ocorrência de curto-circuito entre *taps*, conforme será apresentado no próximo item.

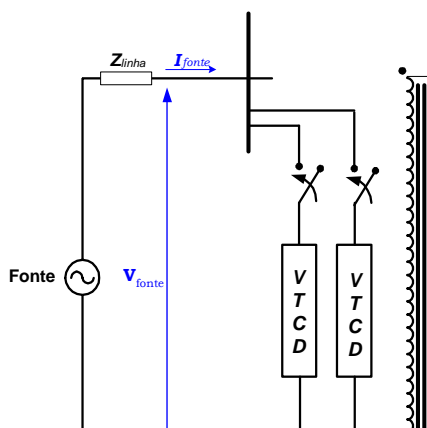
5.8.3. ESTUDOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ENTRE TAPS DO REGULADOR.

Este estudo busca avaliar a atuação do reator instalado na entrada do regulador, quando ocorrer uma situação de curto-circuito no barramento de chaves devido ao mal funcionamento das chaves.

Para tanto, admite-se o fechamento simultâneo das chaves dos *taps* 2A e 6E. Neste caso, haverá a circulação de corrente de curto-circuito na malha

formada pelos *taps* 2A e 6E, sendo suprida pela tensão total da bobina de *taps*, ou seja, 40% (3,188 kV) da tensão nominal (7,97 kV).

A figura 5.51 apresenta o circuito elétrico utilizado na simulação deste caso. Inicialmente a chave do *tap* 00 está em condução aplicando tensão nominal na carga. No instante de tempo $t = 100$ ms, a tensão da fonte apresenta uma elevação de tensão para 1,1 pu. O regulador de tensão comanda a abertura da chave do *tap* 00 no tempo $t = 110,67$ ms, ou seja, um ciclo após a elevação da tensão na carga. Dois ciclos após a abertura da chave 00, no instante de tempo $t = 150$ ms, o regulador de tensão dispara a chave do *tap* 2A restabelecendo a tensão nominal na fonte. No instante de tempo $t = 250$ ms, a chave do *tap* 6E é disparada, provocando um curto-circuito na malha formada pela bobina de *taps* e o circuito das chaves de *taps* 2A e 6E. O curto-circuito entre *taps* da bobina de *taps* permanece até o instante de tempo $t = 450$ ms, quando a chave do *tap* 6E é aberta. A figura 5.51 mostra em azul o circuito de circulação da corrente de carga antes da ocorrência do curto-circuito entre chaves. A corrente de curto-circuito está representada em vermelho na figura 5.51.



5.8.4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO ENTRE TAPS.

A forma de onda da corrente de curto-circuito obtida nas simulações é mostrada na figura 5.52. A instalação do reator na entrada do regulador provoca uma redução do valor da corrente de curto-circuito de 1,76 kA, para a operação do regulador sem o reator, para 1,31 kA, com a instalação do reator, conforme mostra a figura 5.52.

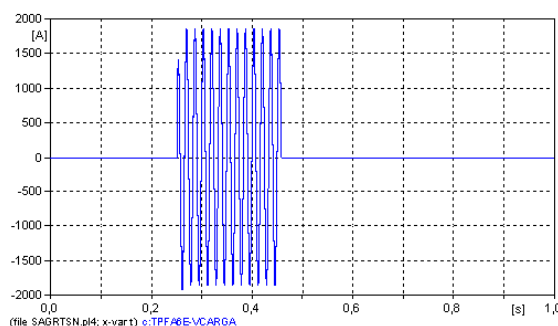


Figura 5.52: Forma de onda da corrente de curto-circuito simétrica na chave do *tap* 6E, com o reator ligado na entrada do RT.

5.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A operação do regulador de tensão sem o reator permite a circulação de uma corrente com valor rms de 10 kA, durante a permanência do curto-circuito na carga. Este valor não leva em conta o fator de assimetria da corrente de falta, que na pior condição, pode ser igual a dois. Para a intensidade de corrente de falta com fator de assimetria, verifica-se a necessidade de proteção das chaves utilizando fusíveis de atuação rápida para limitar a amplitude dessa corrente e evitar a danificação das chaves.

A avaliação dos resultados da operação do regulador com o reator, mostrou que a intensidade de corrente de falta é pouco dependente do *tap* que

está em condução no instante de ocorrência do curto, conforme mostrado na tabela 5.6, sendo que a pior situação, aquela com a maior intensidade de corrente, ocorre quando o *tap* 2A está em condução. A inserção do reator para essa condição, limitou os valores eficazes de corrente de falta simétrica em 1,74 kA, quando o reator está instalado na saída do regulador. A instalação do reator na entrada do regulador limitou a intensidade de corrente de falta em 1,84 kA.

A intensidade da corrente de curto-circuito simétrica rms estabelecida quando ocorre um curto-circuito entre duas chaves é de 1,76 kA, ao passo que, quando o reator é instalado na entrada do regulador, a corrente de falta é reduzida para 1,31 kA.

Levando-se em conta os resultados dos dois estudos anteriores, pode-se concluir que a instalação do reator na entrada promove uma redução bastante considerável tanto da corrente de falta devido a ocorrência de curto-circuito na carga quanto devido à curto-circuito entre chaves. Assim, do ponto de vista de proteção das chaves estáticas, a instalação do reator na entrada do regulador de tensão mostrou-se mais eficiente na redução da corrente de curto.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma análise detalhada da operação de reguladores de tensão com comutação eletrônica de *taps*, em regime permanente, e principalmente, em regime transitório. O modelo de regulador de tensão foi implementado utilizando como plataforma computacional o programa ATP (Alternative Transients Program). A definição do tipo de arranjo magnético do regulador mais adequado para implementar um sistema de controle capaz de realizar a comutação eletrônica de *taps*, deu-se através de um estudo computacional sobre a operação de três tipos de reguladores mais comumente utilizados. O tipo de regulador de tensão sem o reator de comutação e com a bobina de excitação ligada à fonte mostrou-se mais apropriado para a implementação da comutação eletrônica de *taps*, uma vez que a presença do reator de comutação eleva o custo do equipamento, estabelece pelas chaves uma corrente de circulação transitória com uma componente contínua de corrente nos instantes de comutação, e requer uma lógica de controle de comutação mais complexa para evitar a situação de curto-circuito na malha de um mesmo barramento.

Dessa forma, os resultados das simulações e as considerações acerca de cada um dos tipos de arranjos, levaram a escolha do seguinte arranjo magnético, para a implementação da lógica de controle de comutação:

- Regulador sem reator de comutação com a bobina de excitação do lado da fonte, para evitar o seu chaveamento, e bobinas de *taps* dimensionadas de forma a compensar a variação de tensão na bobina de excitação;
- Tensão nominal de $\left(\frac{13,8}{\sqrt{3}}\right)$ kV, 100 A e faixa de regulação de tensão de 10% para redução de tensão e 30% para elevação de tensão;
- Bobina de *taps* com 9 derivações de 5% cada uma;

Na configuração sem reator de comutação, o número de chaves se reduz à metade do que é necessário para a configuração que utiliza o reator de comutação. Este tipo de arranjo magnético escolhido pode apresentar interrupção da corrente de carga durante o processo de comutação, porém, a duração dessa interrupção pode ser muito pequena e não comprometer a operação das cargas, representando um pequeno afundamento no valor eficaz da tensão da carga.

Uma vez definido o arranjo magnético adotado neste trabalho, procedeu-se a implementação do sistema de controle da comutação eletrônica de *taps*. Um controle inteligente de comutação foi implementado no programa ATP sendo capaz de realizar a regulação de tensão no menor tempo possível e com o menor número de comutações possíveis. A lógica do controle inteligente possui as principais características operacionais das topologias de sistemas de controle de comutação desenvolvidos atualmente, no que diz respeito aos instantes ótimos de comutação. O sistema de controle desenvolvido consiste numa ferramenta computacional que permite ajustar os parâmetros da lógica de controle de comutação aos locais de instalação do regulador para que o mesmo opere na condição de máxima eficiência, uma vez que o tempo de atuação do controle de comutação deve ser ajustado, levando-se em consideração as constantes transitórias de tempo das cargas que estão sendo alimentadas pelo regulador de

tensão. Percebe-se que há uma relação direta entre a velocidade de atuação do controle e o número de comutações de *tap* necessárias para restaurar a tensão na carga. A lógica do sistema de controle inteligente de comutação foi construída com a preocupação de ser facilmente ajustada a diferentes condições de operação do regulador de tensão. Uma vez que os reguladores de tensão são ligados a sistemas elétricos com diferentes características, é importante que o sistema de controle seja capaz de atuar com parâmetros definidos pelo operador. Isto pode ser conseguido se o controle inteligente for implementado no regulador de tensão com um painel que permita que o operador entre com os parâmetros da lógica de controle, como por exemplo, tempo de comutação, desvio de tensão na carga a ser corrigido, etc.

O controle inteligente leva em consideração os valores diferenciados dos *taps* para tomar a decisão para qual *tap* comutar, a fim de evitar instabilidade em determinadas situações (comutações repetitivas). Como uma característica do controle inteligente de comutação, ressalta-se que este é capaz de realizar a regulação da tensão na carga através de uma única operação de comutação de *taps*, até mesmo entre os *taps* extremos. Essa característica operacional se traduz num aumento da eficiência do regulador, visto que as comutações para *taps* intermediários aumentam o tempo necessário para restabelecer a tensão na carga.

O sistema de proteção das chaves contra sobretensões é constituído de três pára-raios, sendo um pára-raios de 12 kV instalado na entrada do regulador de tensão, e outros dois de 9 kV instalados em paralelo com as chaves dos *taps* 6E e 2A.

A análise dos resultados do estudo de proteção permitem concluir que o pára-raios com tensão nominal 9 kV é o que mais limita a sobretensão imposta às chaves eletrônicas dos *taps*, dentre os três tipos considerados. A proteção de todas as chaves contra sobretensões originadas pela comutação de *taps* pode ser feita utilizando-se um pára-raios instalado entre os terminais da chave ligada ao

tap 6E. Observa-se que na condição em que todas as chaves estão em bloqueio, a tensão nesse *tap* supera a tensão disruptiva do pára-raios de 9 kV provocando a condução contínua deste equipamento. Sendo assim, se este pára-raios for utilizado, um sistema de proteção composto por uma chave “by-pass” deve ser utilizado para evitar a operação indesejada do pára-raios garantindo a integridade operacional do equipamento.

Se a instalação da chave “by-pass” for indesejável, o pára-raios de 12 kV se apresenta como o mais indicado, uma vez que limita a sobretensão de comutação de *taps* a um valor praticamente igual ao do pára-raios de 10,5 kV e a sua tensão disruptiva é maior que a tensão sustentada pela fonte. Além disso, o pára-raios de 12 kV suporta uma sobretensão temporária de 14,2 kV (rms) por 1 segundo ao passo que o de 9 kV suporta somente 10,7 kV (rms) e, em caso de operação contínua do regulador com 10% de sobretensão na fonte de alimentação, o pára-raios do *tap* 6E ficará submetido a 11,39 kV. A opção por um ou outro pára-raios está vinculada ao limite de suportabilidade de tensão das chaves eletrônicas.

O estudo de proteção das chaves contra correntes de curto-circuito é conclusivo quanto à necessidade de instalação do reator de limitação das correntes de curto-circuito para evitar a danificação das chaves eletrônicas. Do ponto de vista de proteção de chaves eletrônicas, a instalação do reator na entrada do regulador de tensão limita tanto a intensidade de corrente devido à curto-circuito na carga quanto a intensidade de corrente devido a curto-circuito entre *taps*. Por esse motivo esse é o local mais adequado para a instalação do reator. Levando-se em consideração o fator de assimetria da corrente de curto-circuito, as chaves eletrônicas devem ser equipadas com fusíveis de rápida atuação para limitar a amplitude da corrente de falta.

Como temas para trabalhos futuros, de acordo com os sistemas de controle de comutação atuais, sugere-se a implementação física do sistema de controle da comutação eletrônica de *taps* desenvolvido computacionalmente

nesta dissertação, utilizando microcontroladores para comandar a operação das chaves eletrônicas. Nesse sentido, a utilização da rotina TACS do ATP facilita em muito essa implementação física, uma vez que os dispositivos utilizados no modelo computacional têm funcionamento análogo aos comparadores, sensores, fontes de pulso de controle das chaves, disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]-FELÍCIO, J. R. – “Modelagem de Reguladores de Tensão com 32 Degraus para Estudos em Regime Permanente e Transitório”. **Dissertação de Mestrado**, UFU, Uberlândia/2003.
- [2]-ANEEL - “Resolução nº 505, de 26 de novembro de 2001”
<<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf>>, **ONLINE**, 12 de julho de 2005.
- [3]- L. DUBE and H. W. DOMMEL, “Simulation of Control Systems in an Electromagnetic Transients Program with TACS, **IEEE PES PICA Conference Record**, vol. 10, pp. 266-271,1977.
- [4]- LÁSZLO PRIKLER, HANS KR. HOIDALEN, “ATPDraw for Windows 3.1x/NT”, **User’s Manual**, version 1.0, Release Nº 1.0.1, November 1998.
- [5]-LEUVEN EMTP CENTER (LEC) – “Alternative Transients Program (ATP)” – **RULE BOOK**, july/1987.
- [6]-SLEMON, GORDON R. - “Equipamentos Magnetelétricos: Transdutores, Transformadores e Máquinas”, **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.**, 1974, Vol 1.
- [7]-CHERRY, E. C. - “The Duality Between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuit”, **Proc. of the Physical Society**, V. (B) 62, pages 101-111, February/1949.
- [8]-SARAIVA, E. - “Modelagem de Transformadores de Três Colunas Com Base na Distribuição de Fluxos Magnéticos no Núcleo, Considerando o Efeito do Ciclo de Histerese ”, **Dissertação de Mestrado**, UFU, Uberlândia/2004.
- [9]-FILHO, JOÃO M. - “Manual de Equipamentos Elétricos”, **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.**, Rio de Janeiro, 1994, Vol 2, 2ª edição.

[10] – M. P. PEREIRA - “Considerações Básicas sobre Pára-raios”, Departamento de Planejamento de Transmissão, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A, Rio de Janeiro, Brasil.

[11]- BOWTHORPE EMP – “Silicone Rubber Housed Surge Arresters Catalogue”, ESR Series, Janeiro/2000.

[12]- ABNT, Rio de Janeiro – “NBR 11809” – Reguladores de Tensão – Fevereiro/ 1991.

[13]-MARTIGNONI, ALFONSO - “Transformadores”, **Editora Globo**, Porto Alegre, 1977, 3ª Edição.

[14] – F. Q. YOULSEF-ZAI - “Solid-state On-load Transformer Tap Changer Design”, IEE Proc. – Electr. Power Appl., Vol. 143, nº 6, November/1996.

[15]- B. KASZT

- [20] – M. F. ISLAM, J. KAMRUZZMAN, G. LU – “Transformer Tap Changing by Data Classification using Artificial Neural Network”, IEEE, 2004.
- [21]- J. FAIZ, B. SIAHKOLAH – “Differences Between Conventional and Electronic Tap-Changers and Modifications of Controller”, **IEEE Trans. On Power Delivery**, Vol. 21, n° 03, July/2006.
- [22]- X. CAO, A. KURITA, T. YAMANAKA, Y. TADA, H. MITSUMA – “Suppression of Numerical Oscillation Caused by the EMTP-TACS Interface Using Filter Interposition”, **IEEE Trans. On Power Delivey**, vol. 11 n° 4, October 1996.
- [23]- ALLAN GREENWOOD – “Electrical Transients in Power Systems”, Ed. Wiley Interscience, New York, 1971.

ANEXOS

ANEXO I

MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO COM CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTAÇÃO

```

BEGIN NEW DATA CASE
C *****
C ** ->MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO FASE A - COM 8 TAPS-2 ABAIXAR 6 ELEVAR
C *** SEM REATOR DE COMUTAÇÃO - 9 DEGRAUS - BOBINA DE TAPS ESPECÍFICAS-7.97kV
C ** ->REGULADOR DE TENSÃO COM CONTROLE INTELIGENTE DE COMUTACAO
C ** ->CONTROLE INTELIGENTE CONSIDERA O TAP EM CONDUÇÃO PARA DETERMINAR O FATOR
C *** DE MULTIPLICACAO PARA CORREÇÃO DA TENSÃO NA CARGA COM COMUTAÇÃO DEFINIDA
C *** OU SEJA NAO HA COMUTAÇÕES INTERMEDIARIAS DE TAP'S.
C ** ->CONTROLE AJUSTADO PARA ABERTURA DAS CHAVES SOMENTE NO ZERO DE CORRENTE
C ** ->CONTROLE AJUSTADO PARA DISPARAR AS CHAVES SOMENTE NO ZERO DA TENSÃO
C *****
ABSOLUTE TACS DIMENSIONS
C L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
C 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 10000 | 40000 | 2000 |
C *** INSTRUCOES OBRIGATORIAS MISCELANEOUS DATA CARDS FLOATING-POINT
C DELTAT TMAX XOPT COPT EPSILIN TOLMAT TSTART
C E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 |
C .53E-5 0.600
C *** MISCELLANEOUS DATA CARDS INTEGERS TODOS OS CAMPOS COM FORMAT I8
C IOUT | IPLIT | IDOUBL | KSSOUT | MAXOUT | IPUN | MEMSAV | ICAT | NENERG | IPRSUP |
C 5501 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
C *****
TACS HYBRID
98T0 = 1./(2*60.)
C -----
C *** -> CALCULO DO VALOR EFICAZ DA TENSÃO NA CARGA FASE A
C *** -> RMS E O CALCULO DO VALOR RMS DURANTE MEIO CICLO A APARTIR DE T = 0
C *** -> RMS3 E O CALCULO CONTINUO DO VALOR EFICAZ
C NAME | A | B | C | NAO USADO | T-START | T-STOP |
23P1 | 1.0 | .016666667 | .008333333 | | .000 |
23P2 | 1.0 | .016666667 | .008333333 | | .008333333 |
23P1XXX0 | 1.0 | .016666667 | .008333333 | | .008333333 |
23P2XXX0 | 1.0 | .016666667 | .008333333 | | .016666667 |
23P1PXXX | 1.0 | .016666667 | .00000010 | | .000 |
23P2PXXX | 1.0 | .016666667 | .00000010 | | .008333333 |
90VCARGA
C NAME | IN1 | IN2 | IN3 | IN4 | IN5 | A | B | C | D | E |
98VQUADA = VCARGA*VCARGA*DELTAT
981CICLA = VQUADA * P1
982CICLA = VQUADA * P2
C NAME | IN1 | IN2 | IN3 | IN4 | IN5 | A | B | C | D | E |
98INT1A 65+1CICLA { INTEGRAL V2 1/2CICLO} P1PXXX
98INT2A 65+2CICLA { INTEGRAL V2 1/2CICLO} P2PXXX

```

```

98INTCA 65+VQUADA          { INTEGRAL DA CORRENTE AO QUADRADO          }
98RMS1A  = SQRT(INT1A/T0)*P1XXX0
98RMS2A  = SQRT(INT2A/T0)*P2XXX0
98EFICAA = SQRT(INTCA / TIMEX)
98VRMSA  = RMS1A+RMS2A
98RMS3A 66+VCARGA          60.
C -----
C -> CONTROLE AUTOMATICO DE CHAVEAMENTO DE TAP'S - FASE A
C *****
93TPFA2A {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 2A }
93TPFA1A {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 1A }
93TPFA00 {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 00 }
93TPFA1E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 1E }
93TPFA2E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 2E }
93TPFA3E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 3E }
93TPFA4E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 4E }
93TPFA5E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 5E }
93TPFA6E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 6E }
90EXCITA {AUXILIAR TACS QUEBRA LOOP - TFINAL }
90AUX02A {AUXILIAR TACS QUEBRA LOOP - TFINAL }
90AUX03A {AUXILIAR TACS POSICAO ANTERIOR DO SELETOR }
90AUX05A {AUXILIAR TACS QUEBRA LOOP - SELETOR }
90AUX10A {AUXILIAR TACS QUEBRA LOOP - SELETOR }
90AUX21A {AUXILIAR TACS QUEBRA LOOP - SELETOR }
90AUXF1A {AUXILIAR TACS QUEBRA LOOP - SELETOR }
90AUXF2A {AUXILIAR TACS QUEBRA LOOP - SELETOR }
C NAME | | VPICO | | FREQ.HZ | | TETA | | TSTART | TSTOP | |
11P3   | | 1.0 | | {PULSO PARA INICIAR VERIFICACAO APOS 1°CICLO} | | .01667 | 100. |
11CHAVE1 | | 1.0 | | | | | | -1 | 100. |
11CHAVE2 | | 2.0 | | | | | | -1 | 100. |
11CHAVE3 | | 3.0 | | | | | | -1 | 100. |
11CHAVE4 | | 4.0 | | | | | | -1 | 100. |
11CHAVE5 | | 5.0 | | | | | | -1 | 100. |
11CHAVE6 | | 6.0 | | | | | | -1 | 100. |
11CHAVE7 | | 7.0 | | | | | | -1 | 100. |
11CHAVE8 | | 8.0 | | | | | | -1 | 100. |
C *****
C -> SENSOR PARA DETECÇÃO DE PASSAGEM DA TENSÃO DA EXCITAÇÃO PELO ZERO - FASE A
C *****
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98AUX04A60+CHAVE1 +CHAVE1 -CHAVE1 | | | | | | | | 0.00 | | | | | | EXCITA
98SENSVA = ABS(AUX04A+AUX05A)
98VNULO60+CHAVE1 +CHAVE1 ZERO | | | | | | | | 0.50 | | | | | | SENSVA
98TNULO62 +TIMEX {REGISTRO DO INSTANTE DE TEMPO DE TENSÃO NULA } VNULO62
C *****
C -> VERIFICAÇÃO DO DESVIO EM PU DA TENSÃO NA CARGA EM RELAÇÃO A 5%
C *** (398.5 V - QUE É A TENSÃO ENTRE TAP'S) DA TENSÃO NOMINAL (7.97kV) -FASE A
C *****
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98DELTA62 = ((7970.-VRMSA)/398.5)*AUX21A*AUX02A
C 98CHEKVA = ABS(DELTA62)
C *****
C *** -> CONDIÇÕES DE COMUTAÇÃO QUANDO OS TAP'S EXTREMOS - TAP'S 6E E 2A - ESTÃO
C *** ACIONADOS E A VARIÁVEL CHEKVA DEVE SER ZERADA
98CHEKV1 = ABS(DELTA62)
98CHEKVA = CHEKV1*(1-(PUNIA3*PUNIA4+PUNIA5*PUNIA6))
C *****
C *** -> PULSO DE COMUTAÇÃO - PCOMUA - FASE A
C *** -> GERAÇÃO DO PULSO DE COMUTAÇÃO QUANDO O ABS DO DESVIO DE TENSÃO NA CARGA
C *** FOR MAIOR DO QUE 50% DA TENSÃO ENTRE TAP'S-398.5 V - 5% DA TENSÃO NOMINAL
C *****
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98P_DV0A60 ZERO ZERO +CHAVE1 | | | | | | | | 0.70 | | | | | | CHEKVA
98P10U0A62-AUX10A +CHAVE1 { PULSO PARA COMUTAÇÃO DE TAP'S } | | | | | | | | P_DV0A
C -----
C 98P10U0A60+P10U01 ZERO +P10U01 | | | | | | | | SELECAAUX03A
98PINICA62 +CHAVE1 { PULSO CONDICIONAL DE COMUTACAO } | | | | | | | | P_DV0A
98DELTA62 +TIMEX { REGISTRO DO INSTANTE INICIAL DE COMUTAÇÃO } | | | | | | | | P10U0A

```



```

C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98FM__0A61+FMTPA1 +FMTPA2 +FMTPA3 +FMTPA4 +FMTPA5 .9091 1.3333FMTPA6AUX03A
98FMULTA60+FM__0A +FM__0A +FMTPA8 7.50 AUX03A
98FINSTA =FMULTA*AUX21A*AUX02A*(1-P1OU0A)
98INIFMA60+CHAVE1 +CHAVE1 +AUXF2A .01667 TIMEX
98FMUTPA60+INIFMA +INIFMA +FINSTA FINSTA
98VMEDIA60+VRMSA +AUXF1A +VRMSA FINSTA
98FMXXXA60+VREFA +VREFA +VMEDIA .01667 TIMEX
98VENTRA = FMXXXA/(FMUTPA)
98NOVOFM = 7970/VENTRA
C *****
C -----
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98XTAP1A60+UNITY +UNITY ZERO .9308 NOVOFM
98XTAP2A60+UNITY +UNITY ZERO .9762 NOVOFM
98XTAP3A60+UNITY +UNITY ZERO 1.0263 NOVOFM
98XTAP4A60+UNITY +UNITY ZERO 1.0818 NOVOFM
98XTAP5A60+UNITY +UNITY ZERO 1.1438 NOVOFM
98XTAP6A60+UNITY +UNITY ZERO 1.2133 NOVOFM
98XTAP7A60+UNITY +UNITY ZERO 1.2917 NOVOFM
98XTAP8A60+UNITY +UNITY ZERO 1.3810 NOVOFM
98XTAP9A60 ZERO ZERO +UNITY 1.3810 NOVOFM
98XQTP1A = (XTAP2A-XTAP1A)+2*(XTAP3A-XTAP2A)+3*(XTAP4A-XTAP3A)+4*(XTAP5A-XTAP4A)
98XQTP2A = 5*(XTAP6A-XTAP5A)+6*(XTAP7A-XTAP6A)+7*(XTAP8A-XTAP7A)+8*XTAP9A
98XQTAPA = (XQTP1A+XQTP2A)
98SELECA60+CHAVE2 +CHAVE2 +XQTAPA 0.025 TIMEX
C -----
C *****
C -> DIRECIONAMENTO DO PULSO PARA AS CHAVES
C *****
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98GRID0A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECA
98GRID1A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECACHAVE1
98GRID2A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECACHAVE2
98GRID3A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECACHAVE3
98GRID4A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECACHAVE4
98GRID5A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECACHAVE5
98GRID6A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECACHAVE6
98GRID7A60 ZERO PUNIA ZERO 0.0 SELECACHAVE7
98GRID8A60 ZERO PUNIA PUNIA 0.0 SELECACHAVE8
C *****
C ***** MEDICAO DE ENERGIA DISSIPADA NO PARA RAIOS - FASE A *****
C 90PRAIOA
C 91BARRAA
C NAME | | AMPLITUDE | | TSTART | | TSTOP
C 88POTPRA =VPRA__*BARRAA*DELTAT
C 98VPRA__ =PRAIOA-VCARGA
C NAME | S IN1 | S IN2 | S IN3 | S IN4 | S IN5 | | R_VAL | RESET | HOLD
C 88ENERGA65+POTPRA
C *****
C NO-1 |NO-2 |NO-3 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |
33VRMSA SELECAHEKVADELTA
C 33PCOMUAVRMSA CHEKVASINADVSELECAPUNIA DELTAAFIXSELELEVAABAIXARMS3A
C 33VMEDIAFINSTAFMUTPAP1OU0AAUX03AP_DV0AFMXXXANOVOFMVENTRAFMULTA
BLANK RECORD ENDING TACS
C *****
C * RAMOS LINEARES E NAO LINEARES
C *****
C BOBINA DE EXCITACAO - TRAF0 "IDEAL" COM 2 ENROLAMENTOS - FASE A
C *****
C SPECIAL REQ | REF | | AMP. | VxS. | BUS O | Rmag |
C | | | E6.2 | E6.2 | A6 | E6.2 |
TRANSFORMER TR1A
C AMPERES | VOLTSxSEG | | CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
C ***** CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO x CORRENTE
9999
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2 | | RES. | REAT. | Vnom. |

```

```

C  A6 |  A6 |          |E6.2 |E6.2 | E6.2|
1  AM01 AM04          .00001 .1000
2EXCITA          6.7121.00001 7.97
C *****
C      BOBINA DE TAP'S -TRAFO "IDEAL" COM 9 ENROLAMENTOS, 8 TAPS - FASE A
C *****
C SPECIAL REQ|REF  |          | AMP. |VxS. |BUS O| Rmag|
C              |          | E6.2| E6.2|  A6 | E6.2|
      TRANSFORMER          TR2A
C AMPERES          | VOLTSxSEG          |      CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
C ***** CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO x CORRENTE
      9999
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2|          | RES. |REAT. |Vnom. |
C  A6 |  A6 |          |E6.2 |E6.2 | E6.2|
1  AM01 AM02          1.E-07 .100
2ATAP6EATAP5E          .010721.E-07 .759
3ATAP5EATAP4E          .010721.E-07 .664
4ATAP4EATAP3E          .010721.E-07 .587
5ATAP3EATAP2E          .010721.E-07 .520
6ATAP2EATAP1E          .010721.E-07 .467
7ATAP1EATAP00          .010721.E-07 .419
8ATAP00ATAP1A          .010721.E-07 .380
9ATAP1AATAP2A          .010721.E-07 .345
C *****
C REATOR SATURAVEL - COLUNA DO NUCLEO MAGNETICO - FASE A
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP. |VxS. |
98 AM01 AM03          6.9440 .3751
C AMPERES          | VOLTSxSEG          |      CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
      5.8523          0.3547
      6.3505          0.3648
      6.9440          0.3751
      8.2808          0.3880
      10.7151         0.3990
      17.5946         0.4101
      25.3616         0.4190
      9999
C *****
C REATOR SATURAVEL - CULATRA DO NUCLEO MAGNETICO - FASE A
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP. |VxS. |
98 AM01 AM05          12.001 .3751          1
C AMPERES          | VOLTSxSEG          |      CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
      10.1144         0.3547
      10.9554         0.3648
      12.0010         0.3751
      14.3114         0.3880
      18.5161         0.3990
      30.4081         0.4101
      43.8312         0.4190
      9999
$VINTAGE, 1
C *****
C      CAPACITANCIAS DE FUGA DO REGULADOR
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM)          | INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) |          |
ATAP2AATAP1A          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP1AATAP00          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP00ATAP1E          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP1EATAP2E          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP2EATAP3E          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP3EATAP4E          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP4EATAP5E          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP5EATAP6E          .01          |          |          | 3.50E-03
ATAP2A          .01          |          |          | 1.75E-03
ATAP1A          .01          |          |          | 1.75E-03
ATAP00          .01          |          |          | 1.75E-03
ATAP1E          .01          |          |          | 1.75E-03

```

```

ATAP2E          .01          1.75E-03
ATAP3E          .01          1.75E-03
ATAP4E          .01          1.75E-03
ATAP5E          .01          1.75E-03
ATAP6E          .01          1.75E-03
XCARGA          .01          1.75E-03
C *****
C -> RESISTENCIAS DAS CHAVES ESTATICAS
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM) | INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) |
TPFA2AATAP2A   0.0001
TPFA1AATAP1A   0.0001
TPFA00ATAP00   0.0001
TPFA1EATAP1E   0.0001
TPFA2EATAP2E   0.0001
TPFA3EATAP3E   0.0001
TPFA4EATAP4E   0.0001
TPFA5EATAP5E   0.0001
TPFA6EATAP6E   0.0001
$VINTAGE, 0
C *****
C ***** CARTAO DE IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS - 9kV - FASE A *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |          5555. |          |          |
C 92PRAIOABARRA          5555.          |          |          |          |
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          | COL |
C      18.E03          |      -1.          |          |          |          |
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q)          |      VMININO          |          |
C          125.          |          17.319433605          |          0.50782199481          |          |
C          198.28624247          |          11.555036924          |          1.0833333333          |          |
C          506.51695294          |          8.1973579923          |          1.322222222          |          |
C          928.81537917          |          6.5309656632          |          1.4388888889          |          |
C          9999
$VINTAGE, 1
C *****
C -> RAMOS LINEARES DO CIRCUITO MAGNETICO REG - FASE A
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM) | INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) |
      AM03 AM04          0.009227          { L1 }
      AM04 AM02          0.002532          { L2 }
      AM02 AM05          0.001153          { L2 }
      AM01 AM05          34.5006 {PERDA NA CULATRA }
      AM01 AM03          59.6269 {PERDA NA COLUNA }
C *****
C -> CONECTIVIDADE DO ATP
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM) | INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) |
EXCITAATAP00   .00001
LINHAAEXCITA   .0001          10.
VTCD           5.          33.75
VTCD1          5.          33.75
C VTCD         10.          45.
C VTCD1        10.          45.
C VTCD         6.          35.
C VTCD1        6.          35.
AUX02A         1000.          {AUXILIAR TACS}
AUX03A         1000.          {AUXILIAR TACS}
AUX05A         1000.          {AUXILIAR TACS}
C AUX06A         1000.          {AUXILIAR TACS}
AUX10A         1000.          {AUXILIAR TACS}
AUX21A         1000.          {AUXILIAR TACS}
AUXF1A         1000.          {AUXILIAR TACS}
      AM02         1.E-03          {REFERENCIA}
      TAP00         1.E+09
      TAP6E         1.E+09
C -----CARGAS UTILIZADAS NA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO -----
C XCARGA          56.335          149.43 {CARGA 100A FP =0.707IND} 1
C -----
C ----- COMPOSICAO DE CARGA EQUIVALENTE A RL 100A; FP 0.707 -----

```

```

C ----- CARGA RL 25 A -FP 0,707/0,8/0,95 E CARGA RC 25 A FP 0,8 -----
C XCARGA          254.94      {CARGA 25A FP 0,8 CAP}      13.87      1
C XCARGA          10.79          323.95      {CARGA 64.98A FP =0.09 IND}1
C XCARGA          270.876      445.30      {CARGA 25A FP =0.85 IND} 1
C XCARGA          302.75          263.87      {CARGA 25A FP =0.95 IND} 1
C -----
C ----- COMPOSICAO DE CARGA EQUIVALENTE A RL 100A FP 0.94 -----
C - 1CARGA RL 23.97A-FP 0.078;3CARGAS RL 25 A -FP 0,97/0,95 E 0,92 E UMA CARGA
C ----- RC 25 A FP 0,85 -----
XCARGA          270.975      {CARGA 25A FP =0.85 CAP}      15.80      1
XCARGA          24.62          889.60      {CARGA 23.7 A FP =0.078IND}1
XCARGA          293.30          331.36      {CARGA 25A FP =0.92 IND} 1
XCARGA          302.75          263.87      {CARGA 25A FP =0.95 IND} 1
XCARGA          309.24          205.43      {CARGA 25A FP =0.97 IND} 1
C -----
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM)      |INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) | |
C TPFA2AVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA1AVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA00VCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA1EVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA2EVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA3EVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA4EVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA5EVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA6EVCARGA          100000000.      |                |                |
C TPFA6EPRATIOA          0.0000010      |                |                |
$VINTAGE, 0
C *****
BLANK ENCERRA OS RAMOS
C *****
C -> CHAVES COMANDADAS PELA TAC'S PARA COMUTAÇÃO DE TAP'S
C *****
C BUS1 | BUS2|                >CLOSED< > TACS <
12TPFA2AVCARGA          GRID0A      1
12TPFA1AVCARGA          GRID1A      1
12TPFA00VCARGA          CLOSED      GRID2A      1
12TPFA1EVCARGA          GRID3A      1
12TPFA2EVCARGA          GRID4A      1
12TPFA3EVCARGA          GRID5A      1
12TPFA4EVCARGA          GRID6A      1
12TPFA5EVCARGA          GRID7A      1
12TPFA6EVCARGA          GRID8A      1
C *****
C -> CONEXOES INDEPENDENTES
C *****
C BUS1 | BUS2| TCLOSE| TOPEN|ruptura |
EXCITAVTCD          .20000      0.400      1
EXCITAVTCD1          .20000      3.250      1
FONTEALINHAA        -1.01667      3.050      1
VCARGAXCARGA        -1.01667      3.550      1
AUX01AAUX02A        -1.01667      3.550
AUX04AAUX05A        -1.01667      3.550
SELECAAUX03A        -1.01667      3.550
P1OU0AAUX10A        -1.01667      3.550
AUX20AAUX21A        -1.01667      3.550
FMXXXAAUXF1A        -1.01667      3.550
FMUTPAAUXF2A        -1.01667      3.550
C ZERAVAAUX06A        -1.01667      3.550
C *****
C -> CHAVES PARA MEDICAO DAS CORRENTES NOS PARA RAIOS - FASE A
C *****
C BUS1 BUS2 TCLOSE TOPEN RUPTURA X
C 00BARRAAVCARGA          MEASURING
C *****
BLANK ENCERRA AS CHAVES
C *FONTES (ITEM VII RULE BOOK)
C NAME | VPICO | FREQ.HZ | TETA| TSTART| TSTOP |
C 14FONTEA 12598.41 60.000 -1.0

```

```
14FONTEA      12590.      60.000                      -1.0
60AUX01A
60AUX04A
60SELECA
60P10U0A
60AUX20A
60FMXXXA
60FMUTPA
C 60ZERAVA
C *****
BLANK ENCERRA FONTES
C * ESPECIFICACAO DE SAIDA (ITEM XII RULE BOOK )
C NO-1 |NO-2 |NO-3 |NO-4 |NO-5 |NO-6 |NO-7 |NO-8 |NO-9 |NO-10|NO-8 |NO-9 |NO-10|
  EXCITAVCARGAFONTEA
BLANK ENCERRA ESPECIFICACAO DE SAIDA
BLANK ENCERRA O CASO
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK ENCERRA A EXECUCAO DO ATP
```

ANEXO II

MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO COM SISTEMA DE PROTEÇÃO DAS CHAVES CONTRA SURTOS DE MANOBRA E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

```
BEGIN NEW DATA CASE
C *****
C ***-> MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO COM 6 TAP'S 2 ABAIXAR 4 ELEVAR
C *** SEM REATOR DE COMUTAÇÃO - 6 DEGRAUS - BOBINA DE TAP'S ESPECÍFICAS
C ***-> REGULADOR COM CONTROLE AUTOMÁTICO DE COMUTAÇÃO
C ***-> CONTROLE AJUSTADO PARA DISPARAR AS CHAVES SOMENTE NO ZERO DA TENSÃO
C ***-> PÁRA-RAIOS IMPLEMENTADO PARA PROTEÇÃO DA CHAVE DO TAP 6E CONTRA
C *** SOBRETENSÕES DE MANOBRA
C ***-> PÁRA-RAIOS IMPLEMENTADO NA ENTRADA DO REGULADOR DE TENSÃO PARA PROTEÇÃO
C *** CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
C ***-> IMPLEMENTAÇÃO DE 2 LT'S DE 1 Km: FONTE-SURTO E SURTO-REGULADOR
C ***-> DESCARGA ATMOSFÉRICA NO NÓ DE INTERLIGAÇÃO DAS LT'S - 10 kA
C *****
ABSOLUTE TACS DIMENSIONS
C L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
C 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 40000 | 2000 |
C * INSTRUÇÕES OBRIGATORIAS MISCELÂNEAS DATA CARDS FLOATING-POINT
C DELTAT TMAX XOPT COPT EPSILIN TOLMAT TSTART
C E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 | E8.0 |
C .53E-7 0.0250
C * MISCELÂNEAS DATA CARDS INTEGERS TODOS OS CAMPOS COM FORMAT I8
C IOUT | IPLOT | IDOUBL | KSSOUT | MAXOUT | IPUN | MEMSAV | ICAT | NENERG | IPRSUP |
C 5501 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
C *****
TACS HYBRID
C CÁLCULO DO VALOR EFICAZ DA TENSÃO NA CARGA
C RMS E O CÁLCULO DO VALOR RMS DURANTE UM CICLO APOS 50 ms
C EFICAZ E O CÁLCULO CONTÍNUO DO VALOR EFICAZ
98T0 = 1./(2*60.)
C NAME | A | B | C | NAO USADO | T-START | T-STOP |
23P1 | 1.0 | .016666667.008333333 | .000
23P2 | 1.0 | .016666667.008333333 | .008333333
23P1XXX0 | 1.0 | .016666667.008333333 | .008333333
23P2XXX0 | 1.0 | .016666667.008333333 | .016666667
23P1PXXX | 1.0 | .016666667.00000010 | .000
23P2PXXX | 1.0 | .016666667.00000010 | .008333333
90VCARGA
```

```

C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98VQUADT = VCARGA*VCARGA*DELTAT
981CICLO = VQUADT * P1
982CICLO = VQUADT * P2
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98INT1 65+1CICLO { INTEGRAL V2 1/2CICLO} P1PXXX
98INT2 65+2CICLO { INTEGRAL V2 1/2CICLO} P2PXXX
98INTC 65+VQUADT { INTEGRAL DA CORRENTE AO QUADRADO }
98RMS1 = SQRT(INT1/T0)*P1XXX0
98RMS2 = SQRT(INT2/T0)*P2XXX0
98EFICAZ = SQRT(INTC / TIMEX)
98VRMS = RMS1+RMS2
C 98RMS3 66+VCARGA 60.
C *****
C CONTROLE AUTOMATICO DE CHAVEAMENTO DE TAP'S
C *****
931TAP2A {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 2A }
931TAP1A {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 1A }
931TAP00 {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 00 }
931TAP1E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 1E }
931TAP2E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 2E }
931TAP3E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 3E }
931TAP4E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 4E }
931TAP5E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 5E }
931TAP6E {SENSOR DE CORRENTE NA CHAVE 6E }
90EXCITA {AUXLIAR TACS QUEBRA LOOP - TFINAL }
90AUX02 {AUXLIAR TACS QUEBRA LOOP - TFINAL }
90AUX03 {AUXLIAR TACS QUEBRA LOOP - SELETOR }
90AUX05 {AUXLIAR TACS QUEBRA LOOP - SELETOR }
11P3 1.0 {PULSO PARA INICIAR A VERIFICAÇÃO 1 CICLO} .01667 100.
C NAME | | VPICO | FREQ.HZ | TETA | TSTART | TSTOP |
11DVINIC 2.0 {INICIALIZAÇÃO DO SELETOR} -1. 11.E-06
11TFINIC 0.002 {INICIALIZAÇÃO DE TFIM } -1. 0.0021
98DELTAV = ((7970-VRMS)/569.)*AUX02*P3 + DVINIC
11CHAVE1 1.0 -1 100.
11CHAVE2 2.0 -1 100.
11CHAVE3 3.0 -1 100.
11CHAVE4 4.0 -1 100.
11CHAVE5 5.0 -1 100.
11CHAVE6 6.0 -1 100.
11CHAVE7 7.0 -1 100.
11CHAVE8 8.0 -1 100.
98CHEK_V = ABS(DELTAV) {VARIAVEL PARA CONTROLAR O SELETOR}
98AUX04 60+CHAVE1 +CHAVE1 -CHAVE1 0.00 EXCITA
98SENSEV = ABS(AUX04+AUX05)
98VNULO 60+CHAVE1 +CHAVE1 ZERO 0.50 SENSEV
98TNULO 62 +TIMEX { TEMPO DE TENSÃO NULA } VNULO
C ***** PULSO DE COMUTAÇÃO - PCOMUT *****
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98PCOMU160 ZERO ZERO +CHAVE1 0.50 CHEK_V
98PCOMUT = PCOMU1*(1-(PUNIC3*PUNIC4+PUNIC5*PUNIC6))
98TINI 62 +TIMEX { TEMPO INICIAL DE COMUTAÇÃO} PCOMUT
98TFINAL = TINI + 0.01667 { TEMPO FINAL DE COMUTAÇÃO }
98AUX01 60 ZERO ZERO +UNITY TIMEX TFINAL
C ***** SENSOR DE CORRENTE NULA NA CARGA *****
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98ICARG160 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP2A
98ICARG260 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP1A
98ICARG360 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP00
98ICARG460 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP1E
98ICARG560 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP2E
98ICARG660 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP3E
98ICARG760 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP4E
98ICARG860 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP5E
98ICARG960 ZERO +CHAVE1 +CHAVE1 0.50 1TAP6E
98ICARGA = ICARG1+ICARG2+ICARG3+ICARG4+ICARG5+ICARG6+ICARG7+ICARG8+ICARG9
98BLOQ 60 ZERO +UNITY ZERO 0.0 ICARGA
C ***** TEMPO EM QUE A CHAVE ENTRA EM BLOQUEIO *****

```

```

98TBLOQ 62          +TIMEX                      BLOQ
C ***** TEMPO PARA DISPARAR A PROXIMA CHAVE (FINAL) *****
98TFIM = TBLOQ + 0.002
C 98TFIM = TBLOQ + 0.002 - TFINIC
C ***** GERANDO O PULSO UNICO *****
98PUNIC060 ZERO +UNITY +UNITY          0.0          TNULO TFIM
98PUNIC160 ZERO ZERO +UNITY            0.0          TIMEX TFIM
98PUNIC260+UNITY +UNITY ZERO           0.0          TINI TFIM
98PUNIC360 ZERO +UNITY +UNITY          -0.50         DELTAV
98PUNIC460 ZERO +UNITY ZERO            8.0          AUX03
98PUNIC560+UNITY ZERO ZERO             0.50         DELTAV
98PUNIC660 ZERO +UNITY ZERO           0.0          AUX03
98PUNIC7 = PUNIC0*PUNIC1*PUNIC2
98PUNIC8 =2*PUNIC7 - 1.
98PUNIC 60+CHAVE1 +PUNIC8 +PUNIC8      .01667        TIMEX
C ***** SELETOR DE TAP'S *****
98COMUTI = DELTAV+AUX03
98COMUTA60+CHAVE2 +CHAVE2 +COMUTI      .01667        TIMEX
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98SELECI61+CHAVE1 +CHAVE2 +CHAVE3 +CHAVE4 +CHAVE5      0.0  7.0  CHAVE6COMUTA
98SELECT60+SELECI +SELECI +CHAVE8      7.5          COMUTA
C ***** DIRECIONAMENTO DO PULSO PARA AS CHAVES *****
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
98GRID0 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECT
98GRID1 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECTCHAVE1
98GRID2 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECTCHAVE2
98GRID3 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECTCHAVE3
98GRID4 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECTCHAVE4
98GRID5 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECTCHAVE5
98GRID6 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECTCHAVE6
98GRID7 60 ZERO PUNIC ZERO             0.0          SELECTCHAVE7
98GRID8 60 ZERO PUNIC PUNIC            0.0          SELECTCHAVE8
C *****
C ***-> MEDICAO ENERGIA DISSIPADA NO PARA RAIOS PROTECAO SURTO MANOBRA - TAP 6E
90PRTP6E
91BARRA1
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
88 POT = VPRTP6*BARRA1*DELTAT
98VPRTP6 = PRTP6E-VCARGA
C NAME| S IN1 | S IN2 | S IN3 | S IN4 | S IN5 |          R_VAL|RESET| HOLD
88ENERG165+ POT
C *****
C ***-> MEDICAO DE ENERGIA DISSIPADA NO PARA RAIOS DE PROTECAO ENTRADA RT
90PRENTD
91BARRA2
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
88 POT2 =PRENTD*BARRA2*DELTAT
C NAME| S IN1 | S IN2 | S IN3 | S IN4 | S IN5 |          R_VAL|RESET| HOLD
88ENERG265+ POT2
C *****
C ***-> MEDICAO DE ENERGIA DISSIPADA NO PARA RAIOS DE PROTECAO ENTRADA SISTEMA
90PRLINE
91BARRA4
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
88 POT3 =PRLINE*BARRA4*DELTAT
C NAME| S IN1 | S IN2 | S IN3 | S IN4 | S IN5 |          R_VAL|RESET| HOLD
88ENERG365+ POT3
C *****
C ***-> MEDICAO DE ENERGIA DISSIPADA NO PARA RAIOS DE PROTECAO LINHA3 - 500 m
90PRLIN2
91BARRA6
C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
88 POT5 =PRLIN2*BARRA6*DELTAT
C NAME| S IN1 | S IN2 | S IN3 | S IN4 | S IN5 |          R_VAL|RESET| HOLD
88ENERG565+ POT5
C ***-> MEDICAO ENERGIA DISSIPADA NO PARA RAIOS PROTECAO DESCARGAS - TAP 2A
90PRTP2A
91BARRA5

```



```

C NAME | | IN1 | | IN2 | | IN3 | | IN4 | | IN5 | | A | B | C | D | E |
88 POT4 = VPRTP2*BARRA5*DELTAT
98VPRTP2 = PRTP2A-VCARGA
C NAME| S IN1 | S IN2 | S IN3 | S IN4 | S IN5 | R_VAL|RESET| HOLD
88ENERG465+ POT4
C ***** ESPECIFICACAO DAS SAIDAS DA TACS *****
C NO-1 |NO-2 |NO-3 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |NO-4 |
33DELTAENERG1VRMS ENERG2SELECTENERG3ENERG4ENERG5
BLANK RECORD ENDING TACS
C *****
C * RAMOS LINEARES E NAO LINEARES
C *****
C BOBINA DE EXCITACAO - TRAFO "IDEAL" COM 2 ENROLAMENTOS
C *****
C SPECIAL REQ|REF | | AMP.|VxS. |BUS O| Rmag|
C | | | E6.2| E6.2| A6 | E6.2|
TRANSFORMER TR1
C AMPERES | VOLTSxSEG | CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
C ***** CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO x CORRENTE
9999
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2 | | RES.|REAT.|Vnom. |
C A6 | A6 | | E6.2 |E6.2 | E6.2|
1 M01 M04 .00001 .1000
2EXCITA 6.7121.00001 7.97
C *****
C BOBINA DE TAP'S -TRAFO "IDEAL" COM 13 ENROLAMENTOS, 12 TAPS
C *****
C SPECIAL REQ|REF | | AMP.|VxS. |BUS O| Rmag|
C | | | E6.2| E6.2| A6 | E6.2|
TRANSFORMER TR2
C AMPERES | VOLTSxSEG | CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
C ***** CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO x CORRENTE
9999
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2 | | RES.|REAT.|Vnom. |
C A6 | A6 | | E6.2 |E6.2 | E6.2|
1 M01 M02 1.E-07 .1000
2ATAP6EATAP5E .010721.E-07 .759
3ATAP5EATAP4E .010721.E-07 .664
4ATAP4EATAP3E .010721.E-07 .587
5ATAP3EATAP2E .010721.E-07 .520
6ATAP2EATAP1E .010721.E-07 .467
7ATAP1EATAP00 .010721.E-07 .419
8ATAP00ATAP1A .010721.E-07 .380
9ATAP1AATAP2A .010721.E-07 .345
C *****
C -> REATOR SATURAVEL - COLUNA DO NUCLEO MAGNETICO
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VxS. |
98 M01 M03 6.9440 .3751
C AMPERES | VOLTSxSEG | CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
5.8523 0.3547
6.3505 0.3648
6.9440 0.3751
8.2808 0.3880
10.7151 0.3990
17.5946 0.4101
25.3616 0.4190
9999
C *****
C -> REATOR SATURAVEL - CULATRA DO NUCLEO MAGNETICO
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VxS. |
98 M01 M05 12.001 .3751
C AMPERES | VOLTSxSEG | CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
10.1144 0.3547
10.9554 0.3648

```

```

12.0010          0.3751
14.3114          0.3880
18.5161          0.3990
30.4081          0.4101
43.8312          0.4190

          9999
$VINTAGE, 1
C *****
C ->    CAPACITANCIAS DE FUGA DO REGULADOR
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM)      |INDUT( OHM/mH) |  CAP(mMHO/uF) |      |
ATAP2AATAP1A          .01                3.50E-03
ATAP1AATAP00          .01                3.50E-03
ATAP00ATAP1E          .01                3.50E-03
ATAP1EATAP2E          .01                3.50E-03
ATAP2EATAP3E          .01                3.50E-03
ATAP3EATAP4E          .01                3.50E-03
ATAP4EATAP5E          .01                3.50E-03
ATAP5EATAP6E          .01                3.50E-03
ATAP2A                .01                1.75E-03
ATAP1A                .01                1.75E-03
ATAP00                .01                1.75E-03
ATAP1E                .01                1.75E-03
ATAP2E                .01                1.75E-03
ATAP3E                .01                1.75E-03
ATAP4E                .01                1.75E-03
ATAP5E                .01                1.75E-03
ATAP6E                .01                1.75E-03
C XCARGA              .01                1.75E-03
C XCARGA              .01                0.75
XCARGA                .01                2.75
C *****
C ->    RESISTENCIAS DAS CHAVES ESTATICAS
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM)      |INDUT( OHM/mH) |  CAP(mMHO/uF) |      |
1TAP2AATAP2A          0.0001
1TAP1AATAP1A          0.0001
1TAP00ATAP00          0.0001
1TAP1EATAP1E          0.0001
1TAP2EATAP2E          0.0001
1TAP3EATAP3E          0.0001
1TAP4EATAP4E          0.0001
1TAP5EATAP5E          0.0001
1TAP6EATAP6E          0.0001
C *****
C ->    PÁRA-RAIOS DE PROTECAO CONTRA SOBRETENSOES DEVIDO A SURTOS DE MANOBRA
C *****
C ***** CARTAO DE IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS - 12 kV-TAP6E
$VINTAGE, 0
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |          5555. |          |          |          |
92PRTP6EBARRA1          5555.          |          |          |          | 4
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          | COL |
      24.E03          |      -1.          |          |          | 1
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q)          |      VMININO          |          |
          0.04557920305          |      8.8251092594          |      0.64869431468          |          |
          1.7402205841          |      26.073439104          |      0.80963708333          |          |
          9999
C ***** CARTAO DE IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS - 9kV-TAP 6E
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |          5555. |          |          |          |
C 92PRTP6EBARRA1          5555.          |          |          |          | 3
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          | COL |
C      18.E03          |      -1.          |          |          | 1
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q)          |      VMININO          |          |
C          125.          |      17.319433605          |      0.50782199481          |          |
C          198.28624247          |      11.555036924          |      1.0833333333          |          |
C          506.51695294          |      8.1973579923          |      1.322222222          |          |
C          928.81537917          |      6.5309656632          |      1.4388888889          |          |
C          9999

```

```

C ***** CARTAO DE IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS -10.5kV-TAP6E
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |          5555. |          |          |
C 92PRTP6EBARRA1          5555.          |          |          |
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          |COL |
C      21.E03          |      -1.          |          |          |
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q) |      VMININO          |
C          16.67938586          |      17.100426634          |      0.56636322459
C          48.678298607          |      11.714180146          |          1.22
C          298.98360718          |      7.184536491          |          1.485
C          9999
C *****
C -> PÁRA-RAIOS DE PROTECAO CONTRA SOBRETENSOES DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFERICAS
C *****
C -> IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS - 12 kV NA ENTRADA DO RT
C -> PARA-RAIOS COM TENSÃO RESIDUAL PARA 10 kA/FO 8x20us = 34,36 kV (CRISTA)
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |          5555. |          |          |
C 92PRENTD          5555.          |          |          |
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          |COL |
C      2.4E04          |      -1.          |          |          |
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q) |      VMININO          |
C          0.04557920305          |      8.8251092594          |      0.64869431468
C          1.7402205841          |      26.073439104          |      0.80963708333
C          9999
C *****
C -> IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS - 12 kV NA ENTRADA DO SISTEMA - LINHAL-TERRA
C -> PARA-RAIOS COM TENSÃO RESIDUAL PARA 10 kA/FO 8x20us = 34,36 kV (CRISTA)
C *****
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 |          5555.          |          |          |
C 92PRLINE          5555.          |          |          |
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          |COL |
C      2.4E4          |      -1.          |          |          |
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q) |      VMININO          |
C          0.04557920305          |      8.8251092594          |      0.64869431468
C          1.7402205841          |      26.073439104          |      0.80963708333
C          9999
C *****
C -> IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS - 12 kV NA LINHA 3 DO SISTEMA LINHA3-TERRA
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 |          5555.          |          |          |
C 92PRLIN2          5555.          |          |          |
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          |COL |
C      2.4E4          |      -1.          |          |          |
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q) |      VMININO          |
C          0.04557920305          |      8.8251092594          |      0.64869431468
C          1.7402205841          |      26.073439104          |      0.80963708333
C          9999
C *****
C -> IMPLEMENTACAO PARA RAIOS - 9 kV NA CHAVE DO TAP 2A PARA BARRA DE CARGA
C *****
C ***** CARTAO DE IMPLEMENTACAO DO PARA RAIOS - 9kV-TAP 2A
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |          5555. |          |          |
C 92PRTP2ABARRA5          5555.          |          |          |
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          |COL |
C      18.E03          |      -1.          |          |          |
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q) |      VMININO          |
C          125.          |      17.319433605          |      0.50782199481
C          198.28624247          |      11.555036924          |      1.0833333333
C          506.51695294          |      8.1973579923          |      1.3222222222
C          928.81537917          |      6.5309656632          |      1.4388888889
C          9999
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |          5555. |          |          |
C 92PRTP2ABARRA5          5555.          |          |          |
C      VREF          |      VFLASH          |      VZERO          |COL |
C      24.E03          |      -1.          |          |          |
C      COEFICIENTE (P) |      EXPOENTE (q) |      VMININO          |
C          0.04557920305          |      8.8251092594          |      0.64869431468
C          1.7402205841          |      26.073439104          |      0.80963708333
C          9999

```

```

$VINTAGE, 1
C *****
C RAMOS LINEARES DO CIRCUITO MAGNETICO REG -
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM) |INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) | |
      M03  M04                0.009227      { L1 }
      M04  M02                0.002532      { L2 }
      M02  M05                0.001153      { L2 }
      M01  M05                34.5006   {PERDA NA CULATRA }
      M01  M03                59.6269   {PERDA NA COLUNA }
$VINTAGE, 0
C *****
C *** LT'S DE 1 KM CADA, LIGANDO A FONTE AO RT - SURTO ATMOSFÉRICO ENTRE LT'S
C *****
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
-1LINHA1LINHA2          .005   1..01111   1. 0 0
-1LINHA2LINHA3          .005   1..01111   0.5 0 0
-1LINHA3EXCITA          .005   1..01111   1. 0 0
$VINTAGE, 1
C *****
C -> CONECTIVIDADE DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM) |INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) | |
      EXCITAATAP00        .00001
      LINHA LINHA1        .0001          10.
C VTCD                    10.          45.0
C VTCD1                   10.          45.0
C VTCD                     5.          33.75
C VTCD1                    5.          33.75
      AUX02                1.0          {AUXILIAR TACS}
      AUX03                1.0          {AUXILIAR TACS}
      AUX05                1.0          {AUXILIAR TACS}
C FIMTAPAU04              1.0          {AUXILIAR TACS}
      M02                  1.E-03        {REFERENCIA}
      ATAP2A               1.E+09
      ATAP00               1.E+09
      ATAP6E               1.E+09
C *****
C -> CONECTIVIDADE DOS PARA-RAIOS COM O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM) |INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) | |
      BARRA3LINHA2        .00001      { FONTE DE SURTO - LINHA2 }
      1TAP6EPRT6E         .0000010   { TAP6E - PARA-RAIOS TAP 6E }
      BARRA2PRENTD        .0000010   { PARA-RAIOS ENTRADA RT - EXCITA }
      BARRA4PRLINE        .00001      { PARA-RAIOS ENTRADA SISTEMA - LINHA2 }
      BARRA6PRLIN2       .00001      { PARA-RAIOS ENTRADA SISTEMA - LINHA3 }
      1TAP2APRT2A        .0000010   { TAP2A - PARA-RAIOS TAP 2A }
C *****
C ***** CARGA RL DIVIDIDA EM DUAS CARGAS RL EM PARALELO *****
C XCARGA                  112.67      298.86      {V=7.967KV} 1
C XCARGA                  112.67      298.86
C ***** CARGA RL 50 A -FP 0,707/RL 25A FP 0,85/ CARGA RC 25A FP 0,707
C XCARGA                  112.67      298.86      {carga 50 A}
C XCARGA                  270.975     445.48      {carga 25 A}
C XCARGA                  225.34      {carga 25 A} 11.77
C XCARGA                  195.1614     517.664
C ***** COMPOSICAO DE CARGA EQUIVALENTE A RL 100A; FP 0.707 *****
C ***** CARGA RL 25 A -FP 0,707/0,8/0,95 E CARGA RC 25 A FP 0,8 *****
C XCARGA                  254.94      {CARGA 25A FP 0,8 CAP} 13.87 1
C XCARGA                  10.79          323.95      {CARGA 64.98A FP =0.088IND}1
C XCARGA                  270.975     445.48      {CARGA 25A FP =0.85 IND} 1
C XCARGA                  302.75      263.87      {CARGA 25A FP =0.95 IND} 1
C ***** COMPOSICAO DE CARGA EQUIVALENTE A RL 100A FP 0.94 *****
C **1CARGA RL 64.98A-FP 0.08;2CARGAS RL 25 A -FP 0,85/0,95;1CARGA RC 25 A FP 0,8
C XCARGA                  270.975     {CARGA 25A FP =0.85 CAP} 15.80 1
C XCARGA                  24.62          889.60      {CARGA 23.7 A FP =0.078IND}1
C XCARGA                  293.30      331.36      {CARGA 25A FP =0.92 IND} 1
C XCARGA                  302.86      263.976     {CARGA 25A FP =0.95 IND} 1

```

```

C XCARGA          309.25          205.43  {CARGA 25A FP =0.97 IND}  1
C *****
C ***** CARGA RL ÚNICA COM AMORTECIMENTO SOMENTE NO INDUTOR *****
C XCARGAXG01      56.335          {CARGA RL C/ AMORTECIMENTO NO INDUTOR}  1
C XG01                                149.43
C XCARGA          6.E+04
C ***** CARGAS COM DIFERENTES FATORES DE POTENCIA SEM AMORTECIMENTO ****
C XCARGA          56.335          149.43  {CARGA 100A FP =0.707IND}  1
C EXCITA                                1.00
C XCARGA          0.0001
C XCARGA          112.68          298.87  {CARGA 50A FP =0.707IND}  1
C XCARGA          127.47          253.58  {CARGA 50A FP =0.8 IND}  1
C XCARGA          151.377         131.93  {CARGA 50A FP =0.95 IND}  1
C XCARGA          225.36          597.74  {CARGA 25A FP =0.707IND}
C XCARGA          270.975         507.18  {CARGA 25A FP =0.80 IND}  1
C XCARGA          270.975         445.48  {CARGA 25A FP =0.85 IND}
C XCARGA          293.30          331.36  {CARGA 25A FP =0.92 IND}
C XCARGA          302.86          263.976 {CARGA 25A FP =0.95 IND}
C XCARGA          309.25          205.43  {CARGA 25A FP =0.97 IND}
C XCARGA          318.68          {CARGA 25 A}  1
C XCARGA          159.34          {CARGA 50 A}  1
C XCARGA          79.70          {CARGA 100A}  1
C XCARGA          211.33 {CARGA 100A FP 0 IND}  1
C XCARGA          422.65 {CARGA 50A FP 0 IND}  1
C XCARGA          112.67 {CARGA 50A FP0.707 CAP}  23.54  1
C XCARGA          127.47 {CARGA 50A FP 0,8 CAP}  27.75  1
C XCARGA          302.754 {CARGA 25A FP 0,95 CAP}  26.66  1
C XCARGA          254.94 {CARGA 25A FP 0,8 CAP}  13.87  1
C XCARGA          225.34 {CARGA 25A FP 0.707CAP}  11.77  1
C XCARGA          270.87 {CARGA 25A FP =0.85 CAP}  15.80  1
C *****
C -> RESISTENCIA PARA MEDIÇÃO DAS TENSOES NAS CHAVES DE TAPS
C *****
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM) |INDUT( OHM/mH) | CAP(mMHO/uF) | |
C 1TAP2AVCARGA          6000000000.  2
C 1TAP1AVCARGA          6000000000.  2
C 1TAP00VCARGA          6000000000.  2
C 1TAP1EVCARGA          6000000000.  2
C 1TAP2EVCARGA          6000000000.  2
C 1TAP3EVCARGA          6000000000.  2
C 1TAP4EVCARGA          6000000000.  2
C 1TAP5EVCARGA          6000000000.  2
C 1TAP6EVCARGA          6000000000.  2
C $VINTAGE, 0
C *****
C BLANK ENCERRA OS RAMOS
C *****
C -> CHAVES COMANDADAS PELA TAC'S PARA COMUTAÇÃO DE TAP'S
C -> AS CHAVES DEVEM ESTAR ABERTAS NO INSTANTE DE SURTO ATMOSFÉRICO
C *****
C BUS1 | BUS2| >CLOSED< >SPARK>TACS <
C 121TAP2AVCARGA 1
C 121TAP1AVCARGA 1
C 121TAP00VCARGA 1
C 121TAP1EVCARGA 1
C 121TAP2EVCARGA 1
C 121TAP3EVCARGA 1
C 121TAP4EVCARGA 1
C 121TAP5EVCARGA 1
C 121TAP6EVCARGA 1
C *****
C 1TAP2AVCARGA -1.0250 3.050 4
C 1TAP1AVCARGA -1.1667 1.0500 1
C 1TAP00VCARGA -1.0531 .1240 1
C 1TAP1EVCARGA -1.1667 1.0500 1
C 1TAP2EVCARGA 0.082299 1.0500 1
C 1TAP3EVCARGA 0.05667 3.0500 1
C 1TAP4EVCARGA 0.05450 3.0126 1

```

C *****

C -.M S2EXO(HAINDEPENDENT(HASISTEMA ETm(ICO - RTm(ETm(DORTTmAO - CARGATm()T#TEMC /P <</M2ID 1

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)