

ANÁLISE DE FALHAS DE UM REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTADOR
ELETRÔNICO DE TAPS

RAPHAEL SANTOS BAPTISTA

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

**Prof. Maurício Aredes, Dr.Ing
(Orientador)**

Prof. Marcos Vicente de Brito Moreira, D.Sc.

Lucas Frizera Encarnação, D.Sc.

RIO DE JANEIRO – RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2010

Dedicatória

Dedico este projeto aos meus pais, Divino e Maria Sônia, à minha irmã Leandra e à minha namorada Carolina. A vida sem vocês não faria sentido.

Obrigado!

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à força Deus e à minha família por toda dedicação e atenção para que eu me tornasse um engenheiro, o amor dedicado a mim e a essencial cobrança nas horas devidas.

Agradeço também a minha namorada Carolina, por estar sempre ao meu lado me incentivando e me dando forças nas horas boas e difíceis. Agradeço também à sua família por me tratarem como um filho por todo esse tempo, e é com certeza que digo que eles possuem uma parcela grande na minha formação profissional, me ajudando de várias maneiras no período em que cursei a faculdade.

Agradeço aos meus amigos Alexandre e Marcus pela grande amizade, que com certeza será para sempre.

Agradeço aos amigos da faculdade Daniel Botelho, Beatriz Levy, Felipe Chaves, Antônio Ribeiro, Miguel Zamora, César Augusto, Rodrigo Delgado, Felipe Ribeiro, Thiago Americano, Marcus Ferreira, Rodrigo Neves e Marcos Serrão. Vocês foram muito importantes para minha formação e guardarei para sempre na memória os momentos de descontração, parceria, amizade, estudo e nervosismo na hora das provas, que fizeram parte do curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço aos excelentes professores do Departamento de Engenharia Elétrica, no qual tive o prazer de conhecer e aprender com suas aulas, Guilherme Rolim, Sebastião, Antônio Carlos Ferreira, Carmem Lucia, Maria Karla, Jorge Nemésio, João Carlos Basílio e Alessandro Manzoni (Im Memoriam). Gostaria de agradecer em especial aos professores Marcos Moreira e Maurício Aredes por contribuírem de forma direta para minha formação profissional, pelos momentos de atenção prestados a mim sempre que precisei e pela amizade que se formou.

Agradeço aos companheiros do LEMT Mauro, Lucas, Vinícius, Bruno França, Daniel Mendes, Bruno Laurindo, Luiz Eduardo, João Moor, Paulo e Emanuel.

Um agradecimento especial para a aluna e grande amiga Beatriz Levy por tudo que ela fez por mim em todos esses cinco anos de faculdade.

Agradeço ao meu Pai, pelos ensinamentos técnicos em engenharia elétrica, ensinamento moral e pela dedicação total em fazer eu me tornar um Engenheiro. Você será para sempre o maior professor e amigo que tive nessa vida.

Agradeço minha Mãe pelo amor e atenção prestados a mim e seu esforço incondicional em me fazer feliz. Você é a mulher da minha vida. Amo-te.

"Brindo a casa
Brindo a vida
Meus amores
Minha família...".

O Rappa – Mar de Gente

Resumo

O texto traz a análise de dois modelos para simulação no ambiente PSCAD/EMTDC[®] de um regulador de tensão com comutador eletrônico de taps RECET. Ao fim desta análise, diante das conclusões obtidas, será proposto um terceiro modelo que consegue englobar as melhores características dos outros dois apresentados. Esse modelo terá na sua composição o transformador Umec (Unified Magnetic Equivalent Circuit), e por conta disso, um estudo do comportamento e das características deste modelo de transformador existente no PSCAD/EMTDC[®] será apresentado. Ademais, o enfoque do trabalho então, será submeter este novo modelo proposto a vários tipos de falhas e analisar o desempenho do mesmo. A primeira simulação será impor falhas diretamente nas chaves do regulador, sendo estas representadas por tiristores. Os tipos de falhas que serão analisadas são duas: os tiristores em Curto-Circuito ou em Circuito Aberto. Com isso, poderá ser visto como o modelo responderá a essas situações. Além das falhas nos tiristores, o modelo será analisado, em relação ao comportamento, mediante falhas na linha de distribuição. Essas falhas serão curto-circuito monofásico (fase-terra) montante e a jusante ao regulador de tensão.

Palavras-chave: RECET, Tiristores, VTCD's, Falhas e Modelagem.

Abstract

The text brings the analysis of two models for simulation in PSCAD/EMTDC[®] of a voltage regulator with electronic tap changer RECET. After this analysis, will be proposed a third model that can incorporate the best features of the other two presented. This model presents in the composition the Umec (Unified Magnetic Equivalent Circuit) transformer, and for that reason, a study of the characteristics of this type of transformer will be presented. Moreover, the focus of the work then, will be submit this new model to types of failures and analyze this performance. The first simulation will be imposed failures directly on the power thyristors of the electronic tap changer. The types of failures that will be analyzed are two: the damaged

thyristors in Short circuit or in Open Circuit. Besides, the model will be also analyzed during single phase to ground faults in the distribution line.

Keywords: RECET, Tiristores, VTCD's, Falhas e Modelagem.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Organização do Texto	2
CAPÍTULO II – REGULADORES DE TENSÃO	4
2.1 Introdução	4
2.2 Reguladores de Tensão com Comutador Eletromecânico de Tap's	8
CAPÍTULO III – DESCRIÇÃO DO RECET E LÓGICA DE FALHAS.....	10
3.1 Introdução	10
3.2 Descrições Gerais do RECET	10
3.2.1 Circuito de Potência	10
3.2.2 Estratégia de Controle do RECET.....	14
3.3 Lógica de Falhas	17
3.3.1 Montagem do Modelo de Falha dos Tiristores	17
3.3.2 Criação de um Bloco de Tiristores com Possibilidade de Falhas	20
3.3.3 Montagem da Lógica de Falha dos Tiristores.....	21
3.3.4 Lógica de Falhas Final	24
CAPÍTULO IV – MODELOS DE SIMULAÇÃO DO RECET	27
4.1 Primeiro Modelo – “Modelo Autotrafo”	27
4.2 Segundo Modelo – “Modelo Umec”	30
4.2.1 Transformador “Umec”	32
4.2.1.1 Análise do Transformador “Umec” Monofásico	33
4.3 Simulações e Análise de Resultados para os Modelos do RECET	37
4.3.1 “Modelo Autotrafo”	37
4.3.2 “Modelo Umec”	40
CAPÍTULO V – ANÁLISE DE FALHAS NOS TIRISTORES.....	44
5.1 Primeira Simulação de Falha nas Chaves	45
5.2 Segunda Simulação de Falha nas Chaves	54
5.3 Terceira Simulação de Falha nas Chaves.....	59
5.4 Quarta Simulação de Falha nas Chaves.....	62
5.5 Simulação de Falha na Linha de Distribuição	66
5.5.1 Curto-Circuito Fase – Terra Montante ao RECET	66
5.5.2 Curto-Circuito Fase – Terra Ajustante ao RECET	71
5.5.2.1 Curto-Circuito Fase – Terra Ajustante ao RECET – Primeiro Caso ..	72
5.5.2.2 Curto-Circuito Fase – Terra Ajustante ao RECET – Segundo Caso ..	76
CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO	80
6.1 Trabalhos Futuros	81
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E ELETRÔNICAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquemático do regulador de tensão tipo A.....	4
Figura 2.2 - Esquemático do regulador de tensão tipo B.....	5
Figura 2.3 – Regulador de tensão como redutor – Tipo B.....	5
Figura 2.4 - Regulador de tensão como elevador – Tipo B.....	6
Figura 2.5 – Regulador de tensão Tipo B geral.....	6
Figura 2.6 – Ilustração da adição do reator de equalização.....	7
Figura 2.7 – Diagrama geral do regulador eletromecânico.....	8
Figura 3.1 – Arranjo adotado para a composição de uma célula do circuito de potência.....	11
Figura 3.2 – Visão geral do RECET.....	11
Figura 3.3 – Topologia proposta para o RECET.....	12
Figura 3.4 – Lógicas de compensação do RECET.....	14
Figura 3.5 – Pontos de medição utilizado pelo controlador.....	14
Figura 3.6 – Diagrama de blocos do algoritmo de controle.....	15
Figura 3.7 – Modelo de falhas do par de tiristores.....	17
Figura 3.8 – Lógica de controle das chaves.....	18
Figura 3.9 – Bloco de falha dos tiristores.....	20
Figura 3.10 – Modelo de falha dos tiristores dentro do bloco “Falha Tiristor”.....	20
Figura 3.11 – Bloco “Lógica de Falhas”.....	21
Figura 3.12 – Programa principal da “Lógica de Falhas”.....	22
Figura 3.13 – Controle de tempo de falhas.....	23
Figura 3.14 – Lógica de falha completa.....	24
Figura 3.15 – Resultado da falha no primeiro par de tiristores.....	25
Figura 3.16 – Lógica de falha completa.....	26
Figura 3.17 – Resultado da falha no quinto e décimo pares de tiristores.....	26
Figura 4.1 – Esquema de ligações do “Modelo Autotrafo”.....	28
Figura 4.2 – Janela de configuração da saturação do transformador do “Modelo Autotrafo”.....	30
Figura 4.3 – Esquema de ligações do “Modelo Umec”.....	31
Figura 4.4 – Modelo do transformador Umec monofásico: (a) caminho do fluxo no núcleo e (b) circuito magnético equivalente.....	33

Figura 4.5 – Curva característica de magnetização.....	34
Figura 4.6 – Implementação do Umec no PSCAD/EMTDC.....	36
Figura 4.7 – Rede na qual o RECET está inserido.....	37
Figura 4.8 – Comportamento do RECET para fase A do “Modelo Autotrafo”	38
Figura 4.9 – Comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Autotrafo”	39
Figura 4.10 – Zoom no comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Autotrafo”	40
Figura 4.11 – Comportamento do RECET para fase A do “Modelo Umec”	41
Figura 4.12 – Comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Umec”	41
Figura 4.13 – Zoom no comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Umec”	42
Figura 5.1 – Esquema de ligações do “Modelo Três Enrolamentos”	44
Figura 5.2 – Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T2 aberto.....	46
Figura 5.3 – Tensões na fonte e na carga para T2 aberto.....	47
Figura 5.4 – Corrente entregue a carga para T2 aberto.....	48
Figura 5.5: Tensão na fonte e na carga para T2 aberto, em 1,0 e 1,5 segundo.....	49
Figura 5.6 – Zoom na corrente entregue a carga com T2 aberto.....	49
Figura 5.7 – Dinâmica dos fluxos dos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” para T2 aberta.....	50
Figura 5.8 – Zoom na dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” entre 0,95 e 1,125 segundos.....	51
Figura 5.9 – Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T2 aberto com valores da geometria do núcleo padrões.....	52
Figura 5.10 – Dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos para T2 aberta com geometria do núcleo padrão.....	53
Figura 5.11 – Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T9 aberto.....	54
Figura 5.12: Tensão na fonte e na carga para T9 aberto em 0,7 e 1,3 segundo.....	56
Figura 5.13 – Corrente entregue a carga para T9 aberto.....	57
Figura 5.14 – Zoom na corrente entregue a carga com T9 aberto.....	57

Figura 5.15 – Dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” para T9 aberta.....	58
Figura 5.16 – Zoom na dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” entre 1,2 e 1,4 segundo.....	59
Figura 5.17 – Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T4 em curto.....	60
Figura 5.18 – Corrente nos enrolamentos dos transformadores.....	62
Figura 5.19 – Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T3 em curto.....	63
Figura 5.20 – Comparação das tensões reguladas antes e após a falha em T3.....	64
Figura 5.21 – Corrente no primeiro enrolamento do transformador.....	65
Figura 5.22 – Dinâmica de compensação da tensão com curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.....	67
Figura 5.23 – Forma de onda da tensão na fonte e na carga durante o curto.....	68
Figura 5.24 – Comportamento da corrente entregue a carga com curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.....	69
Figura 5.25 – Comportamento do fluxo nos transformadores com curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.....	70
Figura 5.26 – Corrente de curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.....	71
Figura 5.27 – Dinâmica de compensação da tensão com curto monofásico na linha de distribuição após o regulador.....	73
Figura 5.28 – Forma de onda da tensão na fonte e na carga durante o curto.....	73
Figura 5.29 – Comportamento da corrente entregue a carga com curto monofásico na linha de distribuição após o regulador.....	74
Figura 5.30 – Falha no controle para o rastreamento de fase	75
Figura 5.31 – Corrente de curto monofásico na linha de distribuição após o regulador.....	75
Figura 5.32 – Dinâmica de compensação da tensão com curto monofásico de longa duração na linha de distribuição após o regulador.....	77
Figura 5.33: Forma de onda da tensão na fonte e na carga durante o curto.....	78

Figura 5.34 – Comportamento da corrente entregue a carga com curto monofásico de longa duração na linha de distribuição após o regulador	78
Figura 5.35 – Controle de fase para curto monofásico de longa duração na linha de distribuição após o regulador.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Look up table utilizada pelo controlador RECET.....	16
Tabela 2 – Relação do Estado das Chaves com o Tipo de Falha.....	18
Tabela 3 – Relação inteiro e funcionamento.....	19

SIGLAS

LEMT – Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão

RECET – Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps

VTCD's – Variação Transitória de Curta Duração

LUT – Look Up Table

UMEC – Unified Magnetic Equivalent Circuit

Capítulo I – Introdução

Com a expansão do sistema elétrico, criou-se a necessidade de implantação de dispositivos para a regulação da tensão. Essa regulação tem como principal objetivo fazer com que cada consumidor receba uma tensão dentro dos limites adequados as suas necessidades.

As concessionárias de energia e os órgãos reguladores atentam para uma contínua necessidade da melhoria dos serviços. Com isso, a utilização dos Reguladores de Tensão tem se mostrado importante para que se mantenham os níveis de tensão em um alimentador dentro dos limites especificados.

Nos dias de hoje, devido ao aumento da população e, por conseguinte o aumento do consumo de energia elétrica, a maioria dos sistemas de potência está operando próximo ao seu limite. Comprometendo assim, a qualidade da tensão fornecida.

Os Reguladores de Tensão são largamente utilizados no Brasil. Os tipos mais usados são os equipamentos com comutadores automáticos eletromecânicos, constituídos por sistemas mecânicos que permitem uma ação sob carga e possibilitam um bom desempenho na regulação da tensão em regime permanente [1]. Porém, para variações rápidas de tensão, o regulador eletromecânico não possui uma dinâmica de compensação rápida o suficiente para corrigir essas variações.

Tão logo, viu-se a necessidade da adoção de Reguladores de Tensão com Comutador Eletrônico de tap possibilita que seja obtida uma regulação de tensão mesmo diante de VTCD's (Variação Transitória de Curta Duração), ou seja, poderá ser obtida uma regulação de tensão em uma faixa mais ampla, em comparação ao regulador eletromecânico utilizado pela ITB, que será apresentado com mais detalhes no capítulo seguinte.

Isso é possível pelo fato do comutador baseado em semicondutores de potência, possibilitar uma mudança de tap de forma direta, sem a necessidade de ir passando de um nível até outro desejado de forma seqüencial (um a um), como ocorre no comutador eletromecânico. Sendo assim, o comutador eletrônico proporcionará a variação direta entre os diferentes *taps* que forem especificados em um comutador eletrônico utilizado em um Regulador de Tensão.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo mostrar as características de dois modelos de simulação propostos do regulador de tensão com comutador eletrônico de taps (RECET), e a partir dos resultados encontrados, propor um terceiro modelo que melhor representa as características desse regulador. Para este novo modelo proposto, serão simuladas falhas, sendo estas representadas quando o tiristor do circuito de potência for condicionado a estar em curto-circuito ou em circuito aberto. Logo após a análise sob essas condições, será feita uma segunda análise submetendo o modelo proposto a falhas no sistema de distribuição. Ou seja, curtos-circuitos montante e a jusante ao RECET, sendo estes representados por curtos monofásicos (fase-terra).

1.2 Organização do Texto

O trabalho pode ser dividido como se segue.

Neste capítulo é feita uma apresentação geral do tema do trabalho, mostrando o contexto no qual ele está inserido. Também é relatada a organização do texto, descrevendo o que será abordado em cada capítulo.

O capítulo 2 é dedicado a descrever os fundamentos básicos dos Reguladores de Tensão em geral e descrever também o Regulador de Tensão com Comutador Eletromecânico de Taps, que é muito utilizado pelas concessionárias atualmente

O capítulo 3 mostra uma descrição específica do RECET, assim como seu princípio de funcionamento. E logo após, será mostrado como foi realizada toda a construção da Lógica de Falhas feita no PSCAD/EMTDC[®] para a simulação de falhas nos tiristores.

No capítulo 4, apresentam-se o primeiro modelo, denominado de “Modelo Autotraço”, e também o segundo modelo denominado “Modelo Umec”. Será mostrado como foram feitas as modelagens, e será dado um enfoque maior na explicação do modelo que possui o transformador “Umec”. Em seguida, será avaliado o desempenho desses modelos em relação à dinâmica do RECET em

regime permanente. A partir da análise de resultados, será proposto um novo modelo para simulação do RECET.

No capítulo 5, é avaliado o comportamento do novo modelo proposto, chamado de “Modelo Três Enrolamentos”. Este modelo será primeiramente simulado mediante falhas nos tiristores. O foco será colocar os tiristores do circuito de potência em curto-circuito e em circuito aberto e analisar como o novo modelo de simulação do RECET reage a essas falhas em relação ao desempenho e ao comportamento dos transformadores. Além disso, serão simuladas situações na qual a falha ocorre na linha de distribuição. Essas falhas serão curto-circuito fase-terra montante e ajusante ao regulador, com os resultados, será analisado como o mesmo se comporta perante essas situações.

Finalmente, o capítulo 6 são apresentadas as conclusões com comentários acerca dos resultados obtidos nos capítulos anteriores. São expostas, ainda, sugestões e propostas de trabalhos futuros.

No final do texto estão presentes as referências bibliográficas e eletrônicas.

Capítulo II – Reguladores de Tensão

2.1 Introdução

Um regulador de tensão atua quando há uma variação de tensão fora dos limites especificados em uma rede de distribuição, seu objetivo é corrigir sempre a tensão a um determinado nível de tensão pré-definido.

Os reguladores vêm sendo muito utilizado atualmente pelas concessionárias de energia elétrica com o objetivo de manter uma boa qualidade no fornecimento de energia, na forma de tensão, aos seus consumidores.

O princípio de funcionamento deste equipamento pode ser comparado a um autotransformador, no qual são considerados taps variáveis que possibilitam a comutação em carga. Com isso, passa a ser estabelecido um acoplamento elétrico e não apenas um acoplamento magnético. Neste caso, uma parte da potência é transferida eletromagneticamente e outra parte é transferida por meio de condução.

De acordo com as normas atuais, existem dois tipos diferentes de reguladores de tensão. O Tipo A, é conhecido como regulador com excitação variável, pois a bobina de excitação sente qualquer variação que ocorra na tensão [5]. O enrolamento de excitação é localizado em paralelo com a fonte, fazendo com que o enrolamento de excitação seja submetido diretamente às variações de tensão na fonte. A figura 2.1 ilustra esse tipo de regulador.

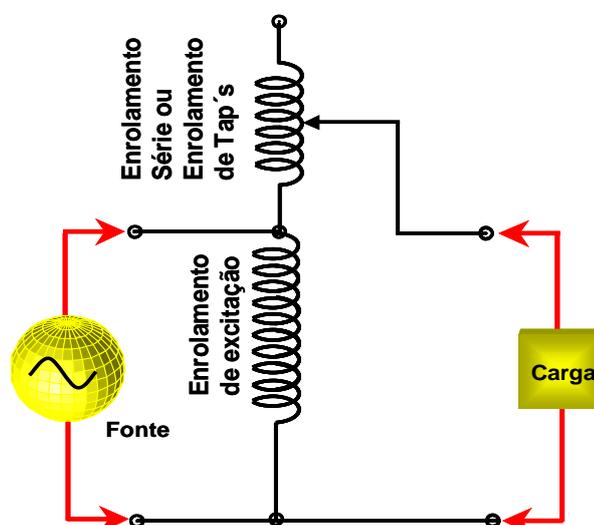


Figura 2.1: Esquemático do Regulador de Tensão Tipo A

Já o tipo B, é chamado de regulador de excitação constante, pois a bobina de excitação se localiza ao lado da carga, fazendo com que o mesmo não seja submetido às variações da tensão na fonte [5]. A figura 2.2 ilustra esse tipo de regulador:

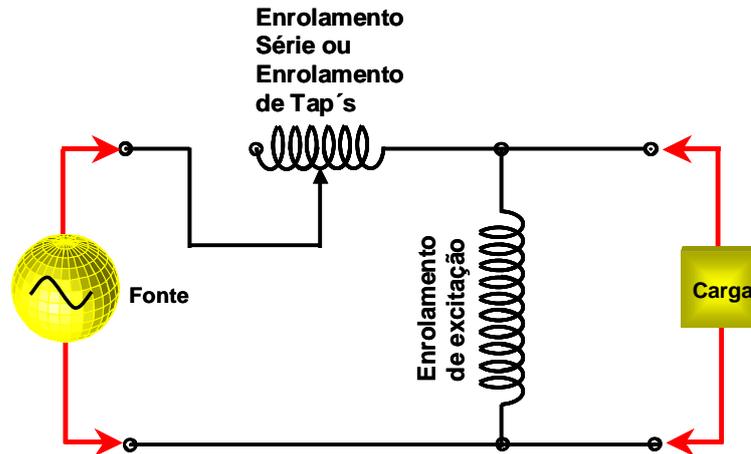


Figura 2.2: Esquemático do Regulador de Tensão Tipo B

O regulador de tensão que faz parte deste estudo é do Tipo B, sendo que este tipo de regulador pode ser representado de duas maneiras: como redutor de tensão ou como elevador de tensão.

Para a configuração de redutor de tensão, temos que a ocorrência de uma elevação de tensão no lado da fonte é regulada de forma a manter a tensão no patamar anterior a ocorrência do distúrbio que originou a elevação da tensão. Na figura 2.3 é ilustrado esse tipo de regulador redutor de tensão:

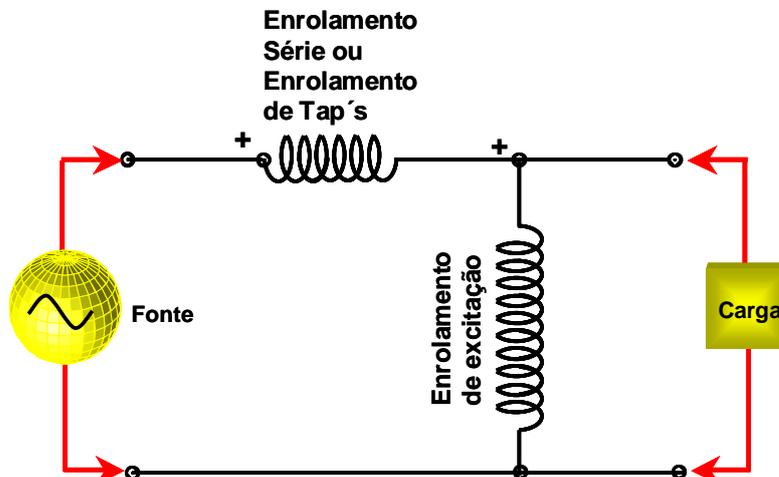


Figura 2.3: Regulador de Tensão como Redutor - Tipo B

Já para a configuração de elevador de tensão, temos que para um evento qualquer que acarrete na queda de tensão na fonte, o regulador atue fazendo com que a tensão na saída seja aquela anterior a ocorrência do distúrbio que motivou a queda de tensão. Na figura 2.4 é ilustrado esse tipo de regulador elevador de tensão:

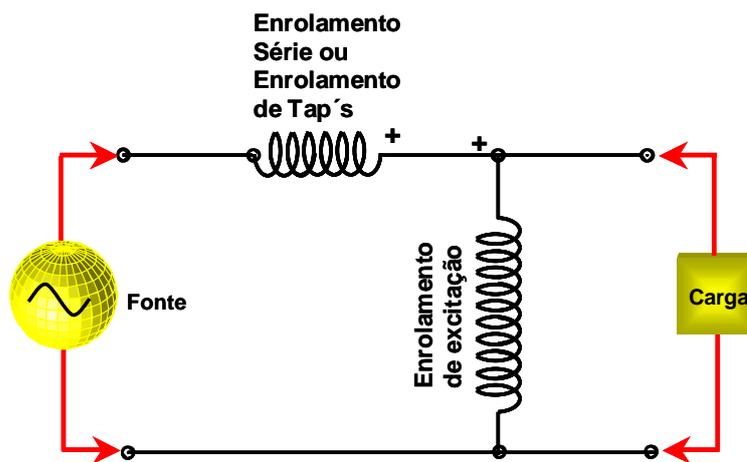


Figura 2.4: Regulador de Tensão como Elevador - Tipo B

Quem determina se o Regulador de Tensão do Tipo B opera como redutor ou elevador de tensão é a polaridade da bobina série ao lado da fonte. Então, se utilizarmos uma chave de reversão que é inserida ao circuito conforme mostra a figura 2.5, é possível subtrair ou adicionar a tensão do enrolamento série, possibilitando que o Regulador de Tensão opere como redutor ou elevador, respectivamente.

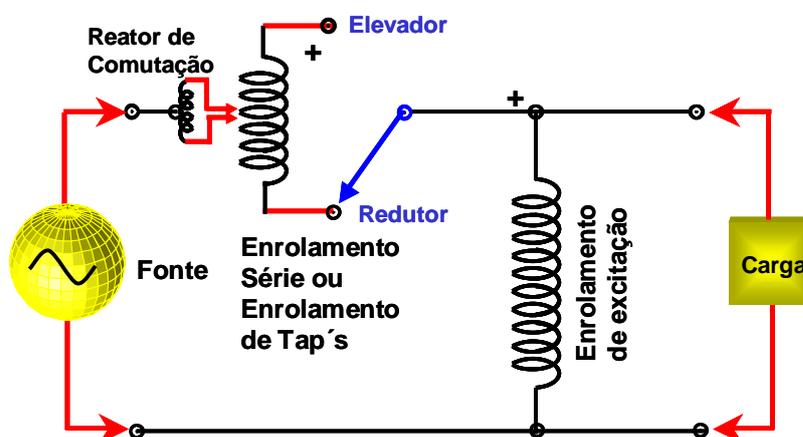


Figura 2.5: Regulador de Tensão Tipo B Geral

O enrolamento série é composto por diversas derivações, também conhecido como tap's. Esses tap's determinam os degraus de tensão a serem considerados no circuito, de forma aditiva ou subtrativa dependendo da polaridade da chave de reversão. Para que haja a comutação de uma tap para o outro, a corrente no circuito deveria ser obrigatoriamente interrompida. Para que essa interrupção de corrente não ocorra, é adicionado um reator de comutação ao circuito, como pode ser observado na figura 2.5.

Para limitar o desgaste dos contatos do reator de comutação, em decorrência da taxa de variação de corrente ($L_R \frac{di}{dt}$) circulante entre o reator de comutação e as derivações dos taps, é inserido um reator de equalização conforme mostra a figura 2.6.

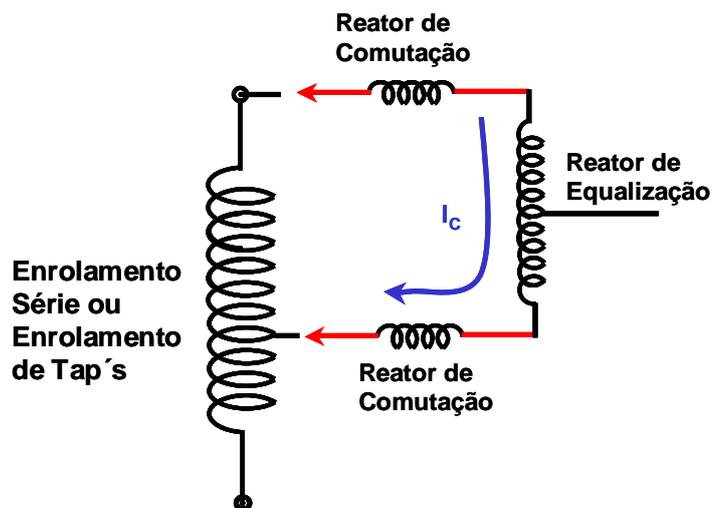


Figura 2.6: Ilustração da Adição do Reator de Equalização

Outro problema seria o arco voltaico que a mudança de posição da chave direcionadora causa. É por isso que o comutador de tap deve estar inserido num compartimento com óleo isolante. Mas mesmo assim, devido a operação contínua, o óleo no compartimento se deteriora devido à ação do arco.

2.2 Reguladores de Tensão com Comutador Eletromecânico de Tap's

Os reguladores de tensão com comutador eletromecânico de tap's vêm sendo muito utilizado em todo o mundo há várias décadas. Com o passar do tempo, o projeto destes equipamentos modificou-se bastante de modo a atender as normas gerais de operação.

Atualmente no Brasil são muito utilizados os reguladores do Tipo B, como descrito anteriormente. Esse regulador é um autotransformador em óleo isolante com enrolamento série do lado da fonte, equipado com comutador de derivação em carga que, em conjunto com o reator, possibilita 33 derivações, 16 para cima, 16 para baixo e a posição neutra [3]. Além disso, permite a regulação da linha com desvios de até $\pm 10\%$ com passos de $0,625\%$ da tensão nominal. Esse tipo de regulador descrito se trata do modelo utilizado pela ITB, e serviu como referência para a criação do RECET. O diagrama geral de potência é mostrado na figura 2.7.

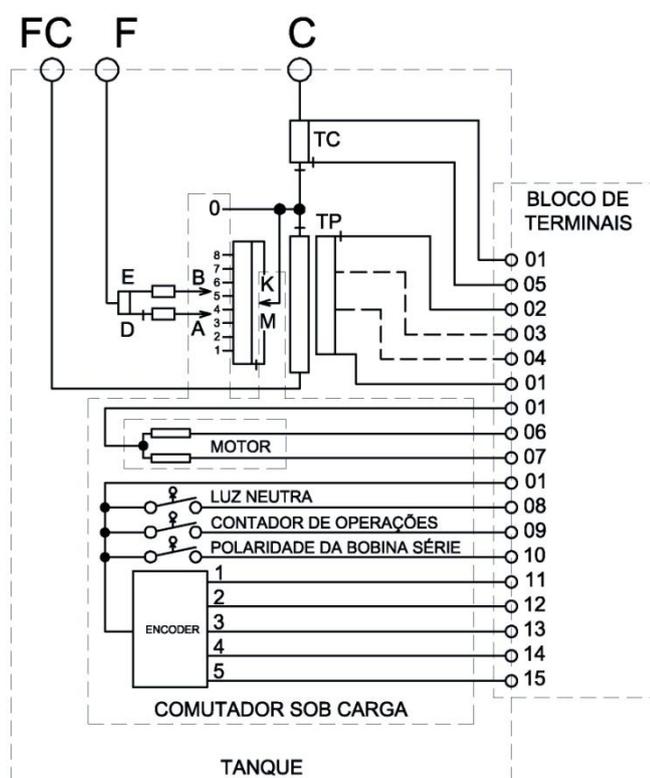


Figura 2.7: Diagrama Geral do Regulador Eletromecânico

Fonte: ITB DATASHEET [3]

As medições e análises dos valores das tensões são feitas por um dispositivo de controle eletrônico micro-controlado, que comanda automaticamente o comutador e ainda acumula funções de registrador e indicador de posição [3].

A mudança de tap's é realizada com a ajuda de um motor, em geral uma engrenagem, que se locomove até a posição desejada. Esta conexão é feita sempre seqüencialmente, o que significa que se houver uma elevação ou uma queda de tensão, o regulador sentirá o desnível e será acionado para corrigir, passando por vários níveis até a estabilização. O comutador mecânico conecta a próxima posição de tap antes de desconectar a posição em que ele se situa. Isso limita o tempo de resposta em torno de 5 a 8 segundos, o que é insuficiente para proteger cargas sensíveis quando há a ocorrência de VTCD's.

Outro aspecto importante, de quando estamos falando sobre Reguladores Eletromecânicos, é a manutenção, que é muito crítica.

A manutenção é um fator importante para o desempenho, confiabilidade, tempo e custos de operação. As causas da deterioração do equipamento podem ser:

- ambientais, devido à exposição à chuva e sol;
- “stresses” térmicos causados pelos ciclos de operação de carga (load cycling);
- umidade interna e perda de óleo;
- mecânicas, por falhas no sistema de ventilação, motor, e outros elementos que compõe o circuito eletromecânico do comutador de tap's.

Dentre as falhas citadas, temos que a falha mecânica pode ser considerada a mais grave.

A necessidade freqüente de manutenção, que quando freqüentes demais podem também induzir falhas, e a dinâmica de regulação de tensão lenta, não sendo capaz de corrigir VTCD's, fez com que houvesse a necessidade da criação de um regulador com menos manutenção e capaz de corrigir VTCD's. É sobre essa visão que foi desenvolvido o RECET que será explicado com mais detalhes no capítulo seguinte.

Capítulo III – Descrição do RECET e Lógica de Falhas

3.1 Introdução

Este capítulo traz uma descrição geral do RECET. Será mostrada a configuração do seu circuito de potência e como o autotransformador se aplica ao princípio de funcionamento do regulador.

Além disso, é discutido também neste capítulo como foi realizada a montagem no software PSCAD/EMTDC[®] do modelo denominado “Lógica de Falhas”.

3.2 Descrições Gerais do RECET

3.2.1 Circuito de Potência

O novo regulador RECET apresenta como principal característica básica um circuito magnético com a funcionalidade de um autotransformador, e é considerado que a variação da relação de transformação é realizada por intermédio do acréscimo ou decréscimo do número de espiras do enrolamento série. Este novo regulador possui um número maior de níveis de compensação em comparação ao regulador tradicional com comutador eletromecânico de taps, utilizado pela ITB e que foi apresentado com detalhes no capítulo anterior.

O regulador convencional possui um comutador eletromecânico, este irá apresentar variações das tensões em degraus, ou seja, de nível em nível. No caso do RECET, o tipo de chave semicondutora adotada para realizar a comutação dos tap's é o tiristor. Este pode não ser uma chave semicondutora totalmente controlada, apresentando somente o controle de disparo, mas pode realizar esta funcionalidade de forma similar. O tiristor pode realizar a mesma operação do regulador convencional de forma mais rápida, podendo comutar do nível mais baixo de tensão para o nível mais alto de forma direta, sem necessidade de excursionar por todos os níveis intermediários. Além disso, esta chave semicondutora apresenta uma dinâmica de comutação de 1/2 ciclo de onda o que é equivalente a cerca de 8ms, bem menor que o tempo de comutação do regulador eletromecânico.

O novo regulador RECET será inserido na rede de distribuição por intermédio de uma conexão série. Deste modo, o comutador eletrônico deverá operar de modo bidirecional em relação à corrente de carga do sistema. Como o tiristor conduz somente durante um semi-ciclo de onda, faz-se necessário o uso de um par de tiristores conectados em anti-paralelo, para que seja possível a condução durante todo o ciclo de onda. Na figura 3.1 é mostrado o arranjo anti-paralelo escolhido para compor cada célula do circuito de potência.

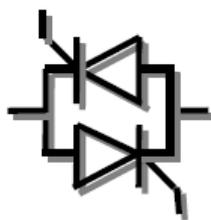


Figura 3.1 – Arranjo adotado para a composição de uma célula do circuito de potência

Na figura 3.2 que se segue é ilustrada a visão geral da conexão do autotransformador com o comutador eletrônico de taps baseado em células compostas por tiristores em antiparalelo conforme mostrado na figura 3.1 anteriormente.

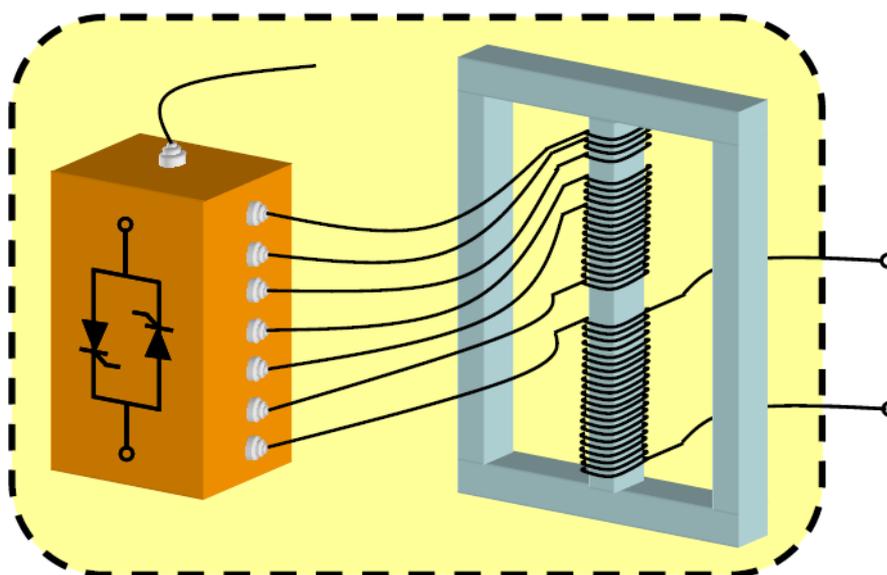


Figura 3.2 – Visão geral do RECET

A topologia monofásica do RECET está apresentada na figura 3.3. O circuito eletromagnético do autotransformador é composto no total por três bobinas distintas. A bobina principal, normalmente denominada como bobina de excitação, está diretamente conectada a carga, enquanto as outras duas bobinas serão utilizadas pelo circuito comutador.

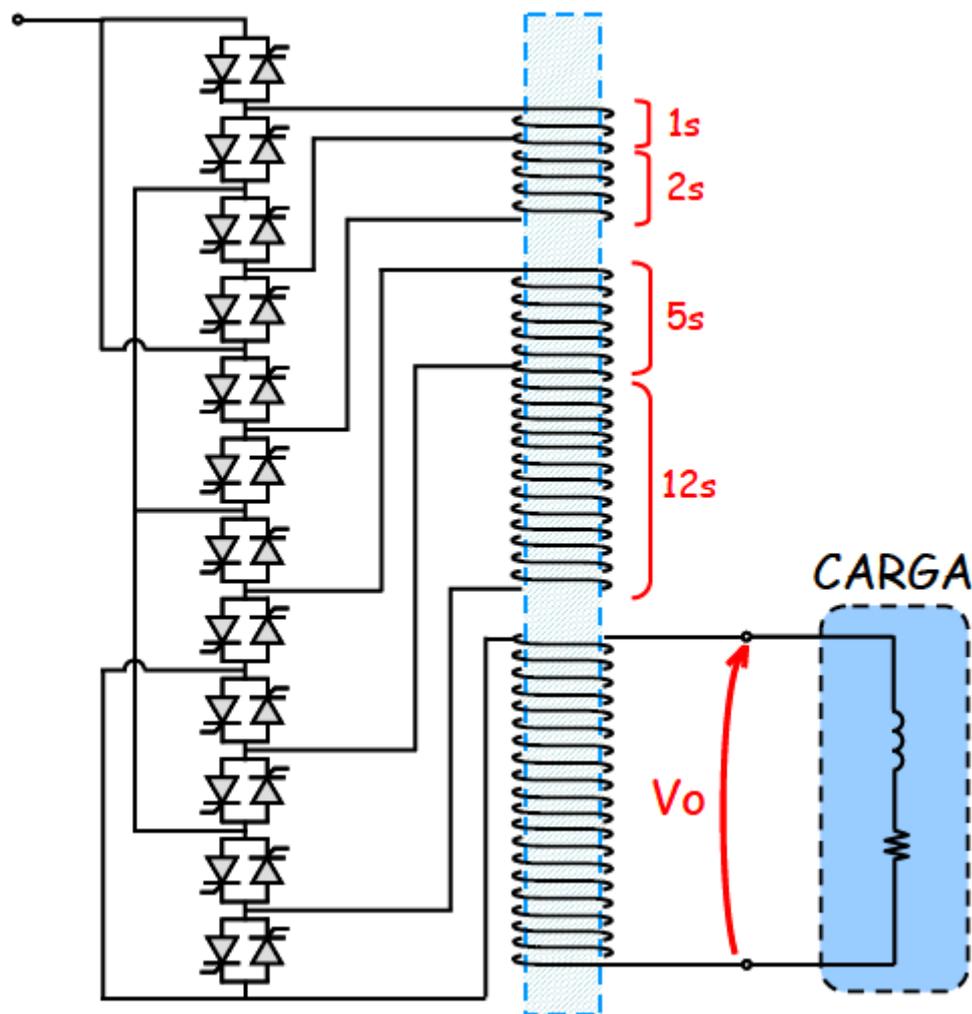


Figura 3.3 – Topologia proposta para o RECET

Em relação às duas bobinas conectadas ao circuito de potência do RECET, vale ressaltar que ambas possuem três pontos de saídas, os quais estão conectados às células tiristorizadas. Devido a essa configuração, cada uma dessas bobinas pode ser considerada como uma associação de duas bobinas distintas em série, formando no total um conjunto de quatro bobinas. Esta configuração possibilita a

utilização de somente uma até o máximo de quatro bobinas. Vale lembrar que esta topologia não permite que as bobinas conectadas em série sejam utilizadas com as suas polaridades invertidas entre elas. Para melhor esclarecimento, as bobinas 1s / 2s ou 5s /12s, por exemplo, não poderão ser subtraídas entre si, tendo em vista que nessa situação as mesmas terão seus terminais externos curto-circuitados.

A estrutura monofásica do comutador é composta por doze células de tiristores em antiparalelo conectadas em série, totalizando um conjunto de vinte e quatro chaves semicondutoras. Esta conexão possibilita uma variação de quarenta e um níveis de tensão, sendo vinte delas em degraus positivos (diminuição de tensão de carga), vinte em degraus negativos (aumento de tensão de carga) e um nível zero, ou seja, sem compensação. As variações de tensão ocorrem na proporção de 0,625% da tensão de entrada.

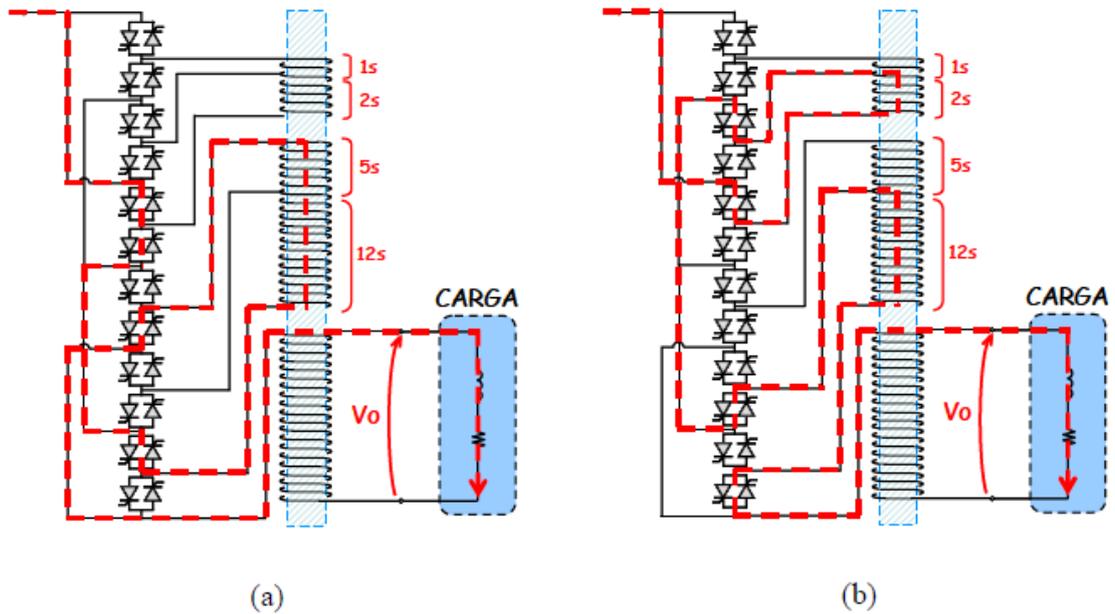
O funcionamento do comutador eletrônico é baseado na escolha do conjunto de chaves que irão conduzir por um intervalo de tempo determinado, regulando a tensão da carga. Para que a regulação da tensão seja obtida, é determinado um total de quatro células que irão conduzir durante um ciclo completo. Sendo que quatro tiristores conduzirão no semi-ciclo positivo enquanto os outros quatro restantes conduzirão no semi-ciclo negativo, permitindo assim que a carga seja alimentada durante o ciclo completo.

Devido ao número máximo de degraus, positivo e negativo, serem de vinte, a relação de transformação das bobinas foi definida de forma a garantir que a excursão do menor nível até o maior nível de compensação ocorra gradualmente de acordo com o menor nível permitido. Sendo assim a relação de transformação da primeira bobina (1s) obrigatoriamente terá que ser de 0,625%. As relações de transformação das bobinas restantes são estabelecidas de forma a garantir que as variações não ultrapassem o limite de 0,625% por degrau.

Então, foi estabelecido que as relações das bobinas fossem as seguintes: 0,625% (1s), 1,25%(2s) 3,125%(5s) 7,5%(12s). Com este conjunto de bobinas, é possível obter excursões de tensão do ponto mínimo ($\pm 0,625\%$) até o ponto máximo ($\pm 12,5\%$) de compensação, sempre garantindo que as mesmas ocorram em degraus de no máximo 0,625%.

A figura 3.4 mostra duas situações de compensação distintas. No caso (a) uma compensação negativa de dezessete degraus é aplicada à tensão de carga no

intuito de aumentar a mesma. Já no segundo caso, uma compensação positiva de dez graus é utilizada para reduzir a tensão da carga.



Figuras 3.4 – Lógicas de Compensação do RECET

3.2.2 Estratégia de Controle do RECET

O controle monofásico do RECET atua regulando a tensão de saída com base na informação da amplitude da componente fundamental da tensão de entrada. A estratégia de controle do RECET é baseada apenas em duas medições, da corrente e tensão de entrada conforme ilustrado na figura 3.5.

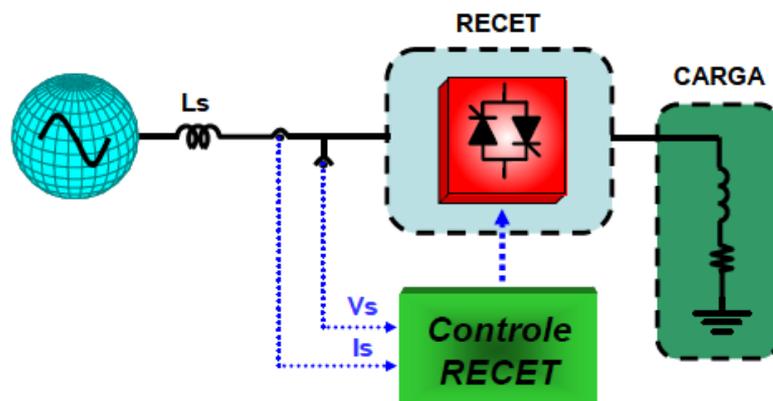


Figura 3.5 – Pontos de Medição utilizados pelo Controlador

O diagrama de blocos do algoritmo de controle do RECET está ilustrado na figura 3.6. A partir da medição da tensão de entrada, o bloco “Detector de Amplitude” irá calcular o valor de pico referente a esta tensão. Esta amplitude é comparada com valores pré-definidos de referência (“LUT – Look Up Table”) com o intuito de determinar o conjunto de quatro chaves a serem disparadas a fim de regular a tensão de saída.

Ao mesmo tempo, a partir da medição da corrente de entrada, o bloco “Detector de Fase” irá rastrear o ângulo de fase da corrente para que esta informação seja utilizada, juntamente com o conjunto de quatro chaves determinados pela LUT, no “Circuito de Disparo”. Deste modo os sinais de disparo serão aplicados aos quatro tiristores determinados possibilitando a compensação da VTCD.

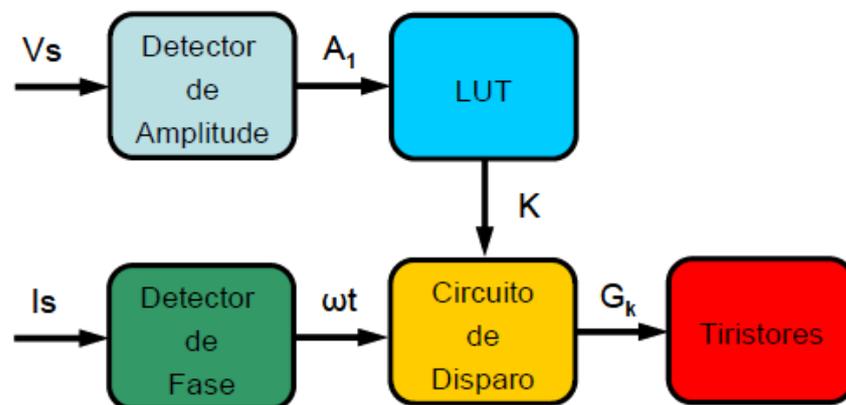


Figura 3.6 – Diagrama de Blocos do Algoritmo de Controle

Os detectores de amplitude e fase utilizados no algoritmo de controle são baseados em um PLL (Phase Locked Loop), que além de rastrear a frequência e o ângulo de fase da componente fundamental medida, é capaz de determinar a amplitude de pico desta mesma componente.

O algoritmo de controle foi estruturado de forma a utilizar informações pré definidas em uma tabela. O valor da amplitude da componente fundamental da tensão é comparado com os vários níveis de compensação pré-calculados de acordo com a relação de transformação das bobinas. Assim, será acionado o conjunto de quatro chaves que possibilitará a melhor compensação.

A tabela 1 mostra a tensão de entrada (coluna Ventrada) com a qual a amplitude calculada pelo detector amplitude será comparada com o objetivo de definir o conjunto de quatro chaves que serão disparadas (coluna Tiristores).

A razão (coluna Razão (Vsaída/Ventrada)) representa o nível de compensação que será necessário em cada caso particular. Os Steps (coluna Steps) quantificam o número de degraus que serão utilizados em cada situação, enquanto a coluna Lógica de Compensação Direta apresenta de que forma as bobinas serão interligadas entre si.

Tabela 1– Look Up Table utilizada pelo controlador do RECET.

	Ventrada (V)	Razão (Vsaída / Ventrada)	Tiristores	Steps	Lógica de Compensação Direta
Elevação de Tensão	8.96288	88.889%	(G1G6G7G12)	20	12 + 5 + 2 + 1
	8.91308	89.385%	(G4G6G7G12)	19	12 + 5 + 2
	8.86329	89.888%	(G1G3G7G12)	18	12 + 5 + 1
	8.81349	90.395%	(G1G2G7G12) (G5G6G7G12)	17	12 + 5
	8.76370	90.909%	(G2G4G7G12)	16	12 + 5 - 1
	8.71391	91.429%	(G3G5G7G12)	15	12 + 5 - 2
	8.66411	91.954%	(G4G6G10G12)	14	12 + 2
	8.61432	92.486%	(G1G3G10G12)	13	12 + 1
	8.56453	93.023%	(G1G2G10G12) (G5G6G10G12)	12	12
	8.51473	93.567%	(G2G4G10G12)	11	12 - 1
	8.46494	94.118%	(G3G5G10G12)	10	12 - 2
	8.41514	94.675%	(G2G5G10G12)	9	12 - 2 - 1
	8.36535	95.238%	(G1G6G7G9)	8	5 + 2 + 1
	8.31556	95.808%	(G4G6G7G9)	7	5 + 2
	8.26576	96.386%	(G1G3G7G9)	6	5 + 1
	8.21597	96.970%	(G1G2G7G9) (G5G6G7G9)	5	5
	8.16618	97.561%	(G2G4G7G9)	4	5 - 1
	8.11638	98.160%	(G1G6G7G8) (G1G6G11G12)	3	1 + 2
8.06659	98.765%	(G4G6G7G8) (G4G6G11G12)	2	2	
8.01679	99.379%	(G1G3G7G8) (G1G3G11G12)	1	1	
7.96700	100.000%	(G1G2G7G8) (G1G2G11G12)	0	0	
Afundamento de Tensão	7.91721	100.629%	(G2G4G7G8) (G2G4G11G12)	-1	-1
	7.86741	101.266%	(G3G5G7G8) (G3G5G11G12)	-2	-2
	7.81762	101.911%	(G2G5G7G8) (G2G5G11G12)	-3	-1 - 2
	7.76783	102.564%	(G1G3G8G10)	-4	-5 + 1
	7.71803	103.226%	(G1G2G8G10) (G5G6G8G10)	-5	-5
	7.66824	103.896%	(G2G4G8G10)	-6	-5 - 1
	7.61844	104.575%	(G3G5G8G10)	-7	-5 - 2
	7.56865	105.263%	(G2G5G8G10)	-8	-5 - 2 - 1
	7.51886	105.960%	(G1G6G9G11)	-9	-12 + 2 + 1
	7.46906	106.667%	(G4G6G9G11)	-10	-12 + 2
	7.41927	107.383%	(G1G3G9G11)	-11	-12 + 1
	7.36948	108.108%	(G1G2G9G11) (G5G6G9G11)	-12	-12
	7.31968	108.844%	(G2G4G9G11)	-13	-12 - 1
	7.26989	109.589%	(G3G5G9G11)	-14	-12 - 2
	7.22009	110.345%	(G4G6G8G11)	-15	-12 - 5 + 2
	7.17030	111.111%	(G1G3G8G11)	-16	-12 - 5 + 1
	7.12051	111.888%	(G1G2G8G11) (G5G6G8G11)	-17	-12 - 5
	7.07071	112.676%	(G2G4G8G11)	-18	-12 - 5 - 1
7.02092	113.475%	(G3G5G8G11)	-19	-12 - 5 - 2	
6.97113	114.286%	(G2G5G8G11)	-20	-12 - 5 - 2 - 1	

3.3 Lógica de Falhas

Esse modelo consiste na criação de tiristores que possuem uma lógica de falhas, ou seja, a partir de um dado comando, eles entram em curto-circuito e através de outro comando os mesmos entram em modo de circuito aberto. O tempo para que eles entrem nesses modos de falhas e voltem ao modo de operação normal, ou não, também é algo controlável e toda essa lógica será explicada detalhadamente nesta seção.

O objetivo então é encontrar um programa que trabalhe em paralelo ao programa padrão do RECET e coloque os tiristores em modo de falha para que se possa analisar como cada modelo se comportará mediante as falhas introduzidas nas chaves estáticas.

3.3.1 Montagem do Modelo de Falha dos Tiristores

Para a montagem deste modelo foi usado uma ferramenta do PSCAD/EMTDC® denominada de “Single Phase Breaker”, que consiste em uma chave que abre ou fecha de acordo com um comando digital.

Com isso, a união dessa ferramenta com os tiristores conectados em antiparalelo criou o circuito que será comandado por um controle, também construído com ferramentas (blocos) do PSCAD/EMTDC® para que se coloque esse par de tiristores em curto-circuito ou circuito aberto.

Segue na figura 3.7 o circuito descrito anteriormente:

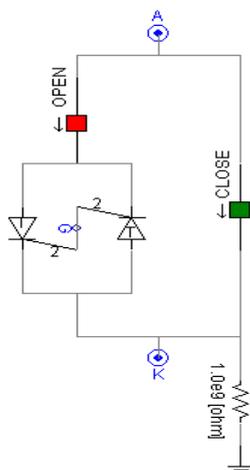


Figura 3.7 – Modelo de Falhas do Par de Tiristores

O modelo apresentado na figura 3.7 mostra o funcionamento normal do par de tiristores, nenhuma falha está sendo aplicado aos mesmos. A chave na cor vermelha significa que a mesma está em modo de condução, enquanto a chave na cor verde significa que a mesma está aberta, ou seja, não está conduzindo.

Logo, para que o par de tiristores esteja em curto-circuito ou em circuito aberto dependerá do estado das chaves. A tabela 2 abaixo mostra como a variação do estado das chaves determina o tipo de falha no par de tiristores

Tabela 2– Relação do Estado das Chaves com o Tipo de Falha

Chave "OPEN"	Chave "CLOSE"	Tipo de Falha
Vermelha	Verde	Func. Normal
Verde	Verde	Aberto
Verde	Vermelha	Curto-Circuito

Tão logo, como se faz a mudança do estado dessas chaves é o que será explicado adiante. Através da figura 3.8, pode-se observar o controle que dita o estado das mesmas.

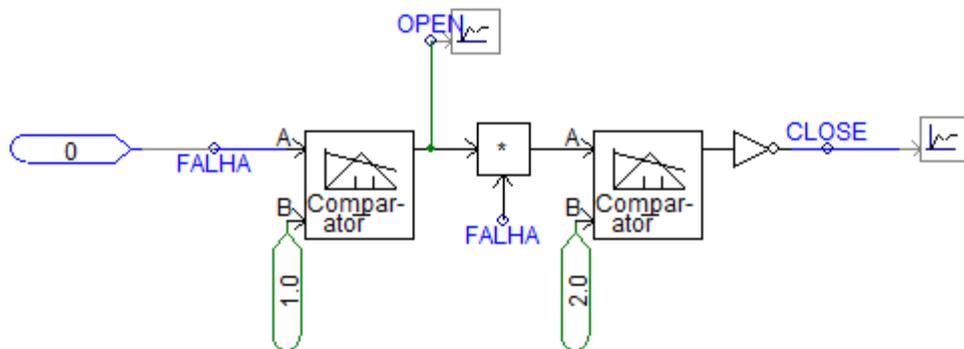


Figura 3.8 – Lógica de Controle das Chaves

De uma forma geral, quem determina se haverá funcionamento normal, curto-circuito ou circuito aberto é o valor que se encontra a esquerda dos blocos, representado pelo número zero. A tabela 3 abaixo mostra a relação dos valores inteiros da entrada com o tipo de funcionamento das chaves.

Tabela 3– Relação Inteiro e Funcionamento

Inteiro	Funcionamento
<i>0</i>	<i>Normal</i>
<i>1</i>	<i>Normal</i>
<i>2</i>	<i>Aberto (queima)</i>
<i>3</i>	<i>Curto - Circuito</i>

O primeiro bloco comparador da figura 3.8, da esquerda para a direita, possui a seguinte lógica: se A for maior que B, o nível lógico um será enviado na saída do bloco. E se A for menor ou igual a B, o nível lógico enviado será zero. Essa mesma lógica serve para o segundo bloco comparador.

Como no primeiro bloco o valor de B é sempre o inteiro 1(um), basta que a entrada do inteiro, que está conectado em A, seja 2(dois) ou 3(três) para que na saída do bloco comparador tenha o nível lógico 1(um).

Com a saída do bloco comparador sendo o nível lógico 1(um), o estado da chave “open” será alterado do vermelho para o verde, lembrando que o vermelho é sempre o estado inicial da chave.

Na mesma analogia, se o inteiro a esquerda do bloco for menor ou igual a 1(um), na saída do primeiro bloco comparador sairá o nível lógico zero, e com isso o estado da chave “open” não será alterado, permanecendo em vermelho.

Agora que já foi explicado o funcionamento da lógica da chave “open”, será explicado o funcionamento da chave “close”. Pode-se observar que o valor do inteiro a esquerda do primeiro bloco comparador é utilizado a esquerda do segundo bloco comparador através de um multiplicador. Esse valor é denominado de “falha” na lógica de controle da figura 3.8.

Então, para que na saída desse segundo bloco comparador esteja o nível lógico zero, basta que a entrada “falha” seja menor ou igual a 2(dois). Com isso, esse nível lógico zero na saída passará por um inversor e passará a ser 1(um), fazendo com que o estado da chave “close” mude fechado para aberto.

Se esse valor “falha” for maior que 2(dois), pois B vale 2(dois), a saída terá o nível lógico 1(um). Esse nível lógico na saída passará por um inversor e passará a ser zero, logo não alterará o estado inicial da chave “close”, permanecendo em modo de condução.

3.3.2 Criação de um Bloco de Tiristores com Possibilidade de Falhas

Após a criação do modelo de falha dos tiristores, passou-se a focar na etapa da criação de um bloco que representasse esse modelo. Para isso, foi utilizada a função “create new component” do PSCAD/EMTDC® e um bloco denominado TF (tiristor falha) foi criado.

O bloco criado apresenta uma conexão elétrica superior e uma inferior denominadas A (Anodo) e K (catodo), respectivamente. Além dessas, existem duas entradas a esquerda denominadas Fx e G. A primeira será explicada com mais detalhes no decorrer do projeto e a segunda representa o Gate do Tiristor.

Com isso, o seguinte bloco foi montado, como mostra a figura 3.9:

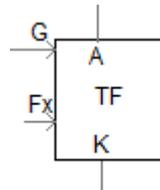


Figura 3.9 – Bloco de Tiristores com Possibilidade de Falhas

Dentro desse bloco, se encontra o modelo de falha, como pode se observar na figura 3.10.

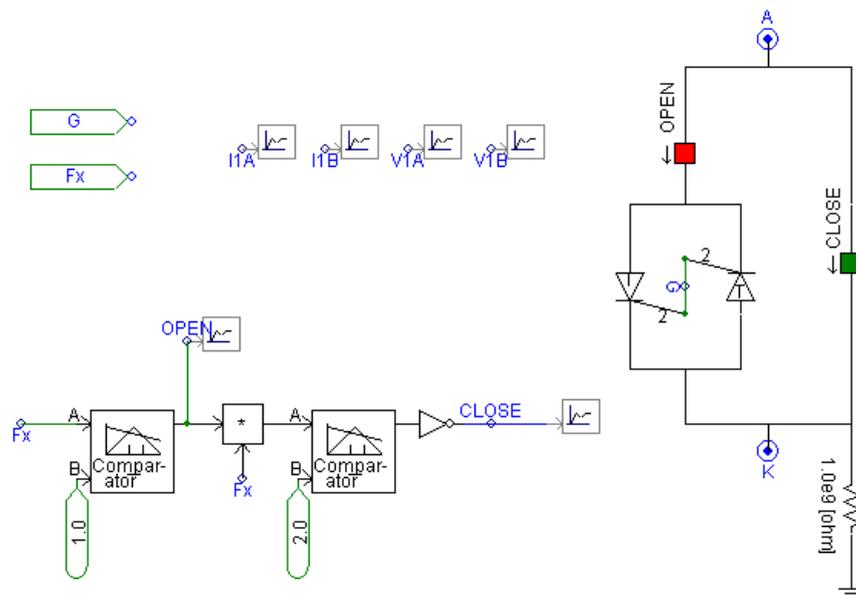


Figura 3.10 – Modelo de Falha dos Tiristores dentro do Bloco “Falha Tiristor”

3.3.3 Montagem da Lógica de Falha dos Tiristores

Após a criação de todo o bloco de falha dos tiristores, tornou-se necessária a criação de um ambiente que interagisse com o programa principal do RECET e também fosse de fácil utilização. Houve atenção especial na criação de um ambiente no qual fosse simples enviar o comando de falha, ou seja, escolher o tipo de falha, o tempo em que ela se iniciaria e também o tempo que ela terminaria.

Foi criado um programa denominado de “Lógica de Falha” que terá a função de desempenhar o que foi explicado acima.

Segue abaixo, na figura 3.11 o ambiente descrito:

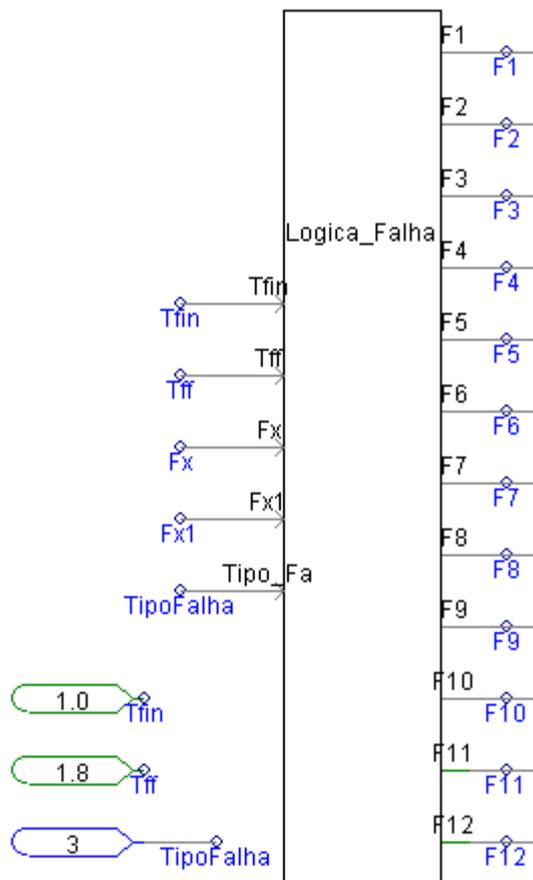


Figura 3.11: Bloco “Lógica de Falha”

Esse bloco da figura 3.11 representa apenas a interface que terá entre o bloco de falha de tiristores, apresentado anteriormente, e o programa principal do RECET. O detalhamento do bloco pode ser visto abaixo na figura 3.12.

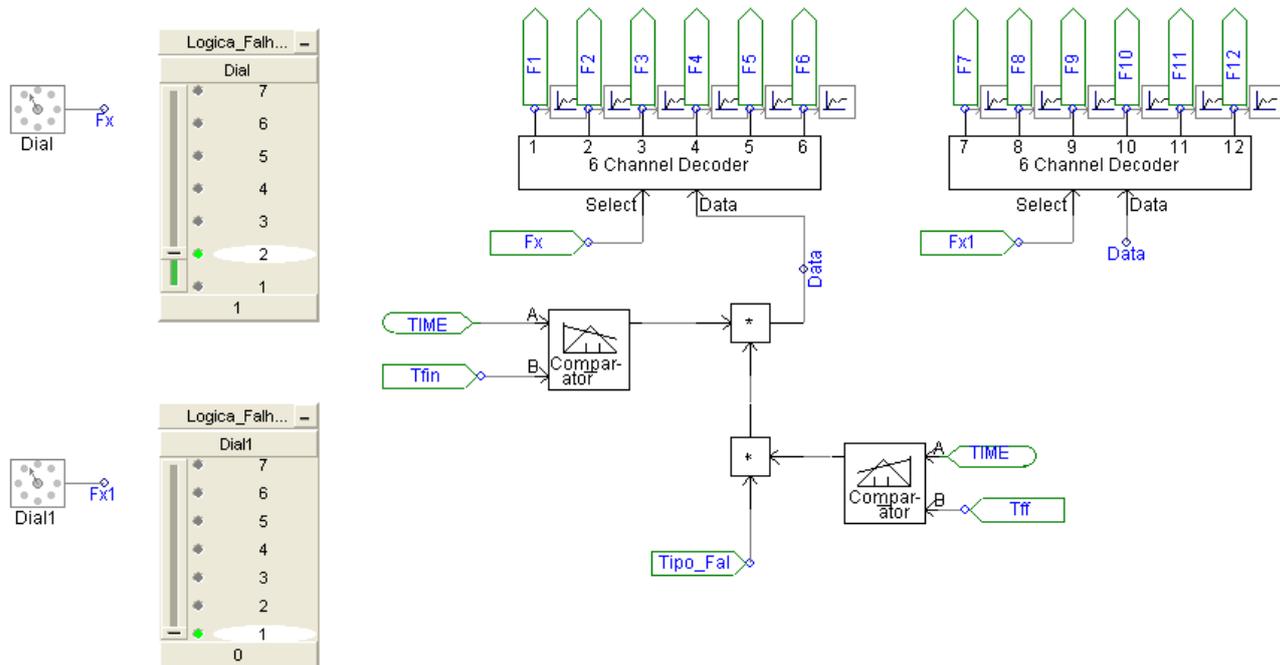


Figura 3.12: Programa Principal da “Lógica de Falha”

A preocupação a partir de agora será em explicar como funciona essa lógica apresentada acima.

Primeiramente, pode-se observar na figura 3.12 uma interface na qual podemos variar os níveis de um a sete. Isso serve para que se escolha qual par de tiristores sofrerá a falha. Lembrando que o RECET possui um total de doze pares de tiristores, que de acordo com uma lógica de chaveamento compensam as variações de tensão da fonte para entregar a carga uma tensão fixa.

Com isso, observa-se um total de 14 níveis. O primeiro nível representa nenhum tiristor selecionado, ou seja, não haverá falha em nenhum par de tiristores. E os outros níveis, na interface superior da figura 3.12, representam os seis primeiros pares.

Na interface inferior, temos os outros sete níveis que representam as falhas no outros seis pares de tiristores que restavam, somando um total de doze níveis, sendo o nível um representando por nenhuma falha.

No “Channel Decoder”, existe uma entrada denominada “Select” e nela entram os sinais “Fx” e “Fx1”. Esses sinais representam o estado que está selecionado na interface de variação de níveis. Ou seja, é através desses sinais que há a comunicação entre a escolha do nível e qual par de tiristores sofrerá a falha.

Na entrada “Data” do “Channel Decoder” se encontra uma lógica na qual controla o tempo de que se iniciará a falha e terminará a falha.

Objetivo a partir de agora é explicar a lógica de tempo descrita. Observa-se com mais clareza essa lógica na figura 3.13 abaixo:

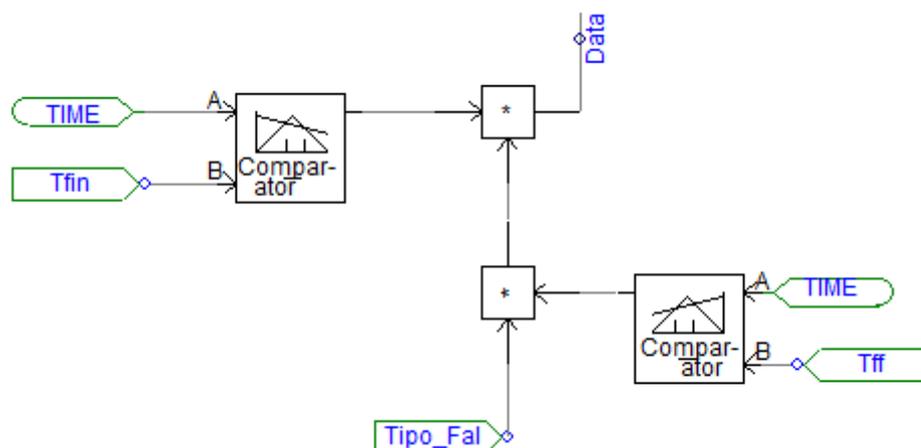


Figura 3.13: Controle de tempo de falhas

O primeiro comparador a esquerda possui a seguinte lógica: se A for maior que B, então o sinal de saída será o nível lógico 1(um). E se A for menor ou igual a B, o sinal de saída será o nível lógico zero.

A variável “TIME” que está conectada em A, corresponde ao tempo de simulação, ou seja, é um contador que começa a contar quando a simulação inicia e pára de contar quando a simulação termina. Logo, na entrada B está conectado um inteiro que representa o tempo que a falha se iniciará. Ou seja, quando “TIME” for maior que o tempo que foi estipulado em B, sairá um nível lógico 1(um) na saída do comparador. Então, é em “Tfin” conectado em B que se determina o tempo no qual a falha começará.

O outro comparador a direita da figura 3.13 possui uma lógica trocada. Se A for maior que B, então na saída do comparador terá o nível lógico zero, e se A for menor ou igual a B, o sinal de saída será o nível lógico 1(um). Então, é em “Tff” conectado em B que se determina o tempo no qual a falha terminará.

Com isso, o sinal representado por “Data” na figura 3.13 será 1(um) ou zero, acionando ou não, a saída do “Channel Decoder”, sendo essa saída, selecionada na interface de variação de níveis explicada anteriormente.

O sinal “Data” também se encontra no segundo “Channel Decoder” e representa a segunda interface de variação de níveis, que controla os pares de tiristores de 7 a 12.

O tipo de falha também é uma variável que entrará no “Channel Decoder”, então a união dos dados de tempo e falha, que se pode visualizar na figura 3.13, determinará quanto tempo durará e qual falha será aplicada no tiristor selecionado na interface de variação de níveis. Bastando apenas alterar os valores das entradas para selecionar o tempo de início e fim da falha, assim como o tipo de falha.

3.3.4 Lógica de Falhas Final

A partir de agora, será mostrada toda a interface de falha e também os resultados para comprovar que a mesma funciona. Na figura 3.14 abaixo, se encontra toda a lógica de falha completa para que se possa compreendê-la melhor e analisar seus resultados.

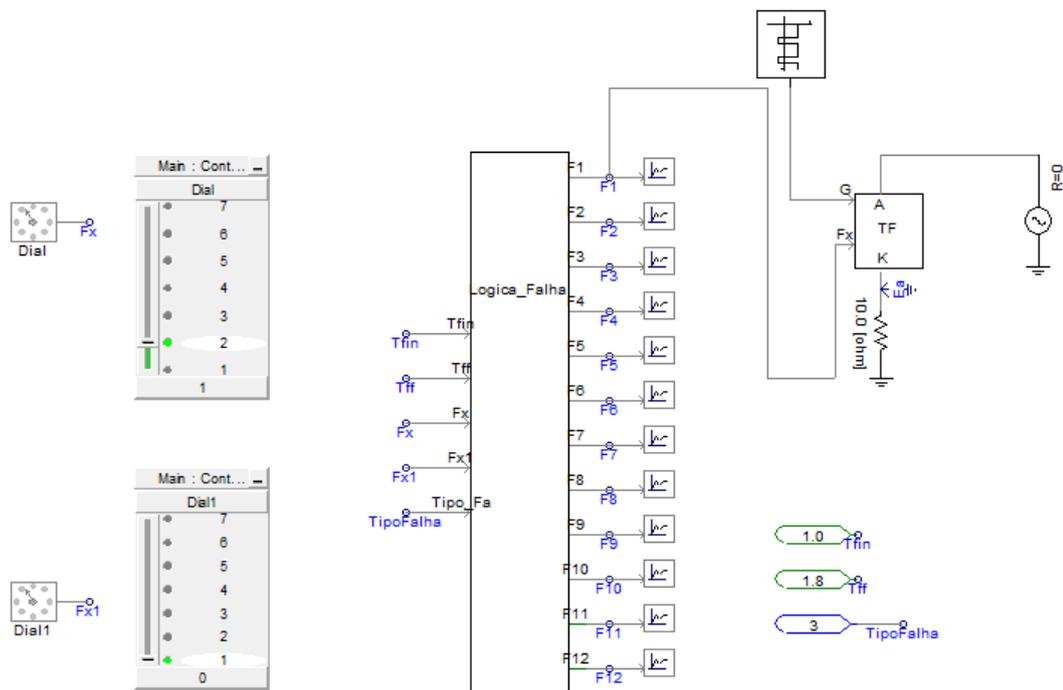


Figura 3.14: Lógica de falha completa

Nesta interface, está selecionado o primeiro par de tiristores para sofrer a falha número 3, que representa o curto-circuito, e essa falha se iniciando em 1 segundo e terminando em 1.8 segundos. Esses ajustes podem ser observados no canto direito

inferior da figura 3.14. É através dos ajustes desses valores que se escolhe o tempo das falhas e o tipo de falha.

Com isso, observando a figura 3.15 abaixo, veremos que acontece exatamente o previsto e os outros pares de tiristores permanecendo em zero todo o tempo, ou seja, não sofrendo nenhum tipo de falha.

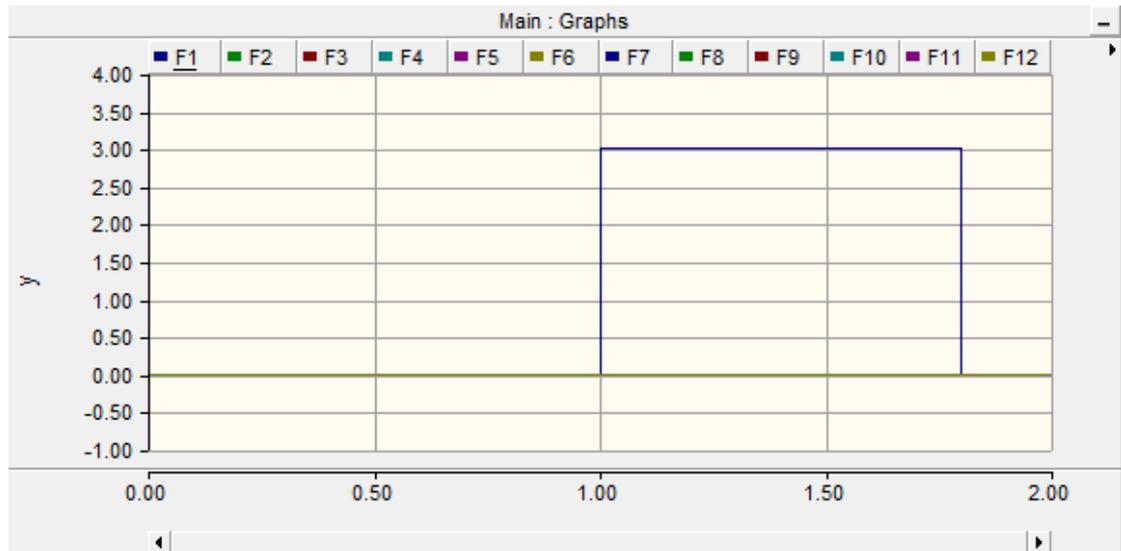


Figura 3.15: Resultado da Falha no Primeiro Par de Tiristores.

É fácil observar que a falha 3 ocorre no tempo determinado e volta ao normal no tempo também determinado. E mais uma vez, todos os tiristores permanecendo no estado zero, ou seja, sem falha.

Agora, será imposto como se pode ver na figura 3.16, a falha número 2, circuito aberto, ocorrendo no par de tiristores 5 e 10 ao mesmo tempo. Essa falha começando em 0,5 segundo e terminando em 1,5 segundos.

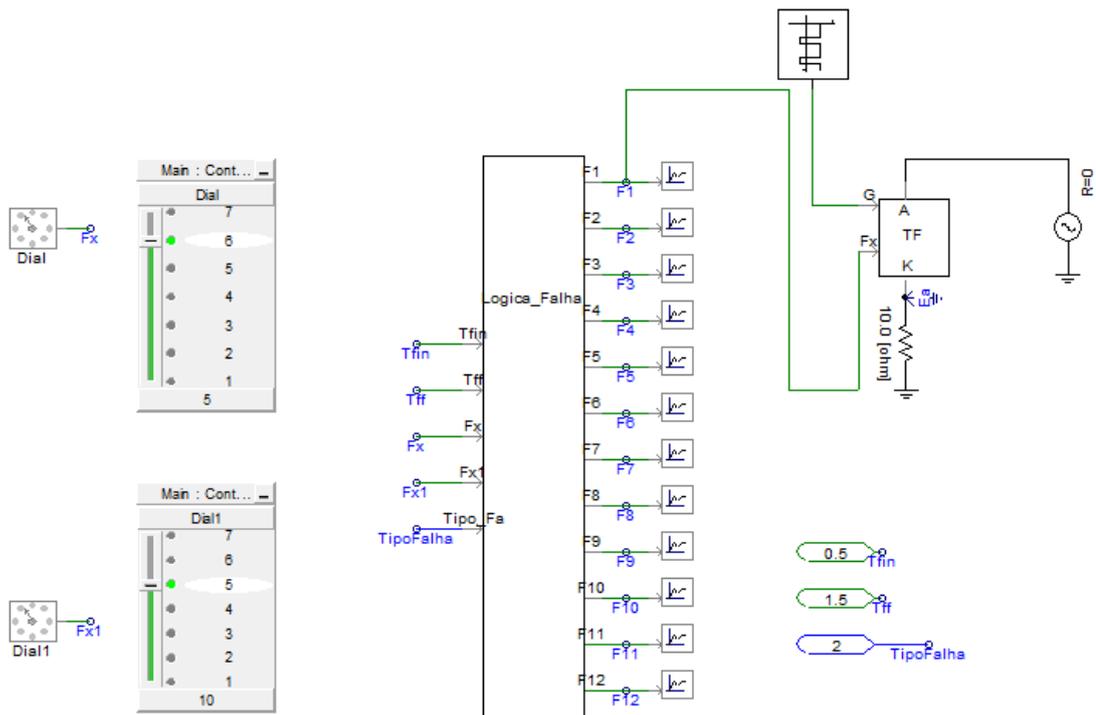


Figura 3.16: Lógica de falha completa

Com isso, observa-se na figura 3.17 abaixo, o resultado encontrado:

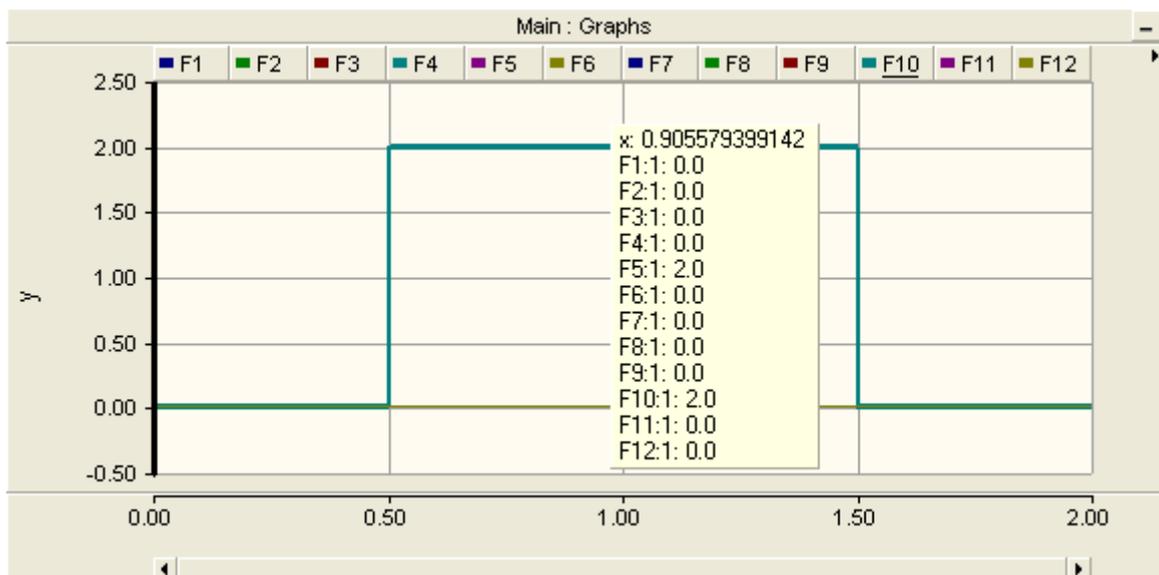


Figura 3.17: Resultado da Falha no Quinto e Décimo Pares de Tiristores.

O resultado encontrado foi exatamente o esperado, a falha número 2 de circuito aberto começou em 0.5 segundo e terminou em 1.5 segundos para os pares de tiristores 5 e 10. Sendo os outros pares, se comportando normalmente, ou seja, permanecendo no estado zero sem falha.

Capítulo IV – Modelos de Simulação do RECET

Neste capítulo, serão apresentados os dois modelos de simulação para o RECET. O primeiro modelo, que será chamado de “Modelo Autotrafo”, apresenta uma modelagem mais simples que o segundo, que será chamado de “Modelo Umec”.

O principal objetivo neste capítulo é mostrar como cada modelo se comporta, e se atendem as características do RECET em situações de compensações em regime permanente. Ainda não serão analisadas situações de falhas.

O segundo modelo, possui na sua configuração o transformador de quatro enrolamentos e o de três enrolamentos, “Umec”, disponível nas versões mais recentes do PSCAD/EMTDC®. Como se trata de um modelo novo, será feita uma análise mais detalhada do que esse tipo de modelo de transformador representa.

4.1 Primeiro Modelo – “Modelo Autotrafo”

O primeiro modelo utiliza dois transformadores de três enrolamentos disponíveis no PSCAD/EMTDC®. A conexão desses transformadores às células tiristorizadas pode ser observada na figura 4.1.

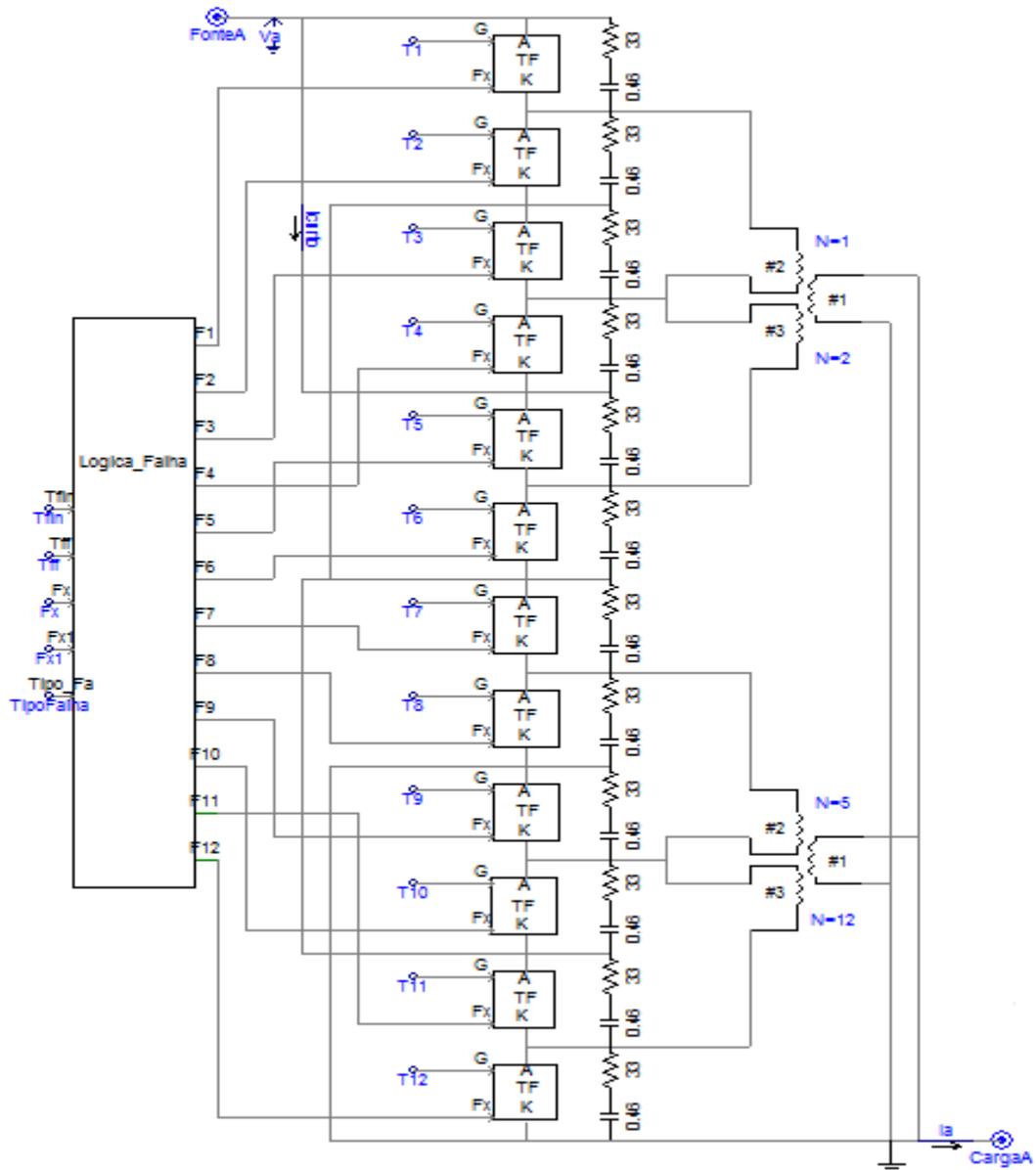


Figura 4.1: Esquema de ligações do “Modelo Autotrafo”

Observando a figura acima, percebe-se que a montagem do modelo seguiu as características do RECET apresentadas no Capítulo 3. No lado primário, existem quatro enrolamentos que serão conectados em série de acordo com a lógica de chaveamento e a necessidade de compensação. De cima para baixo, esses enrolamentos do primário representam as bobinas 1s/2s/5s/12s, sendo s igual a 0,625%.

A tensão nominal utilizada para o RECET é de 13,8kV fase-fase. Como estão sendo utilizadas três modelos monofásicos, uma para cada fase, de modo a formar um banco trifásico, a tensão nominal passou a ser de 7,967kV fase-neutro.

Logo, as tensões nas bobinas 1s/2s/5s/12s são proporcionais a esse valor de tensão fase-neutro, ou seja, 1s é 0,625% do valor de 7,967kV de tensão. As outras bobinas seguem o mesmo raciocínio.

A idéia da conexão das duas bobinas do secundário em “shunt” é fazer com que o fluxo magnético entre todos os enrolamentos seja o mesmo, pois o princípio de funcionamento do RECET, baseado na teoria do autotransformador, diz que existe um ferro comum, onde todas as bobinas estão acopladas, ou seja, o fluxo deve ser comum para todas as bobinas, inclusive a bobina que é conectada diretamente a carga.

Através da variação do fluxo comum às bobinas, que é feito se adicionando ou retirando enrolamentos através do chaveamento dos tiristores, pode-se entregar para a carga uma tensão compensada, sempre que houver variação da tensão na fonte.

Como o objetivo do projeto é submeter esse modelo a condições de falhas, os transformadores estão trabalhando com suas saturações ativas. A modelagem da saturação para este tipo de transformados no PSCAD/EMTDC[®], não é muito completa, existem apenas as possibilidades de ativá-la ou não, e configurar alguns parâmetros da curva de saturação. Na figura 4.2, segue a janela de configuração da saturação para estes transformadores.

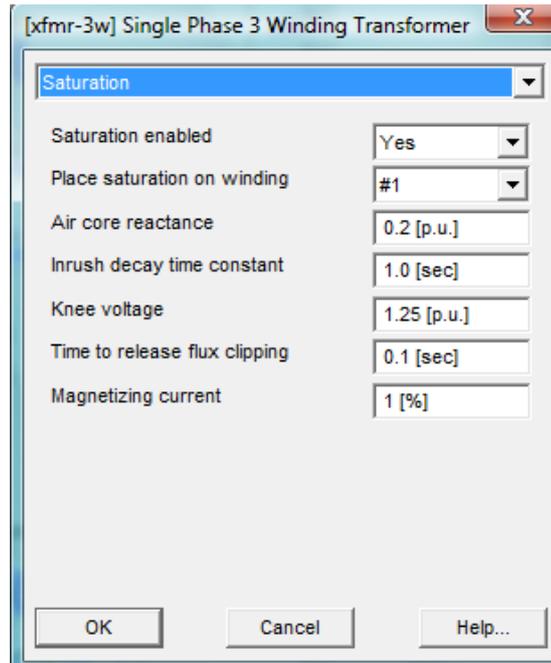


Figura 4.2: Janela de Configuração da Saturação do Transformador do “Modelo Autotrafo”

Como se pode observar na figura 4.2, as condições de saturação, ativa ou não, pode ser selecionada, e também pode se selecionar em qual enrolamento essa saturação ocorrerá. O parâmetro “Air core reactance” serve para configurar a reatância do núcleo. O “Knee voltage” é a tensão do joelho da curva de saturação. E por fim, o parâmetro “Magnetizing current” é a corrente de magnetização que pode ser parametrizada. Com isso, estão disponíveis apenas alguns parâmetros de saturação e da curva de saturação. Como não são conhecidas as características do transformador que será utilizado no equipamento real, foram utilizadas as características de saturação padrão do transformador do PSCAD/EMTDC[®].

4.2 Segundo Modelo – “Modelo Umec”

Esse segundo modelo utiliza dois transformadores, um de quatro enrolamentos e outro de três enrolamentos, sendo ambos “Umec”. Na figura 4.3 pode ser observada a conexão desses transformadores às células tiristorizadas.

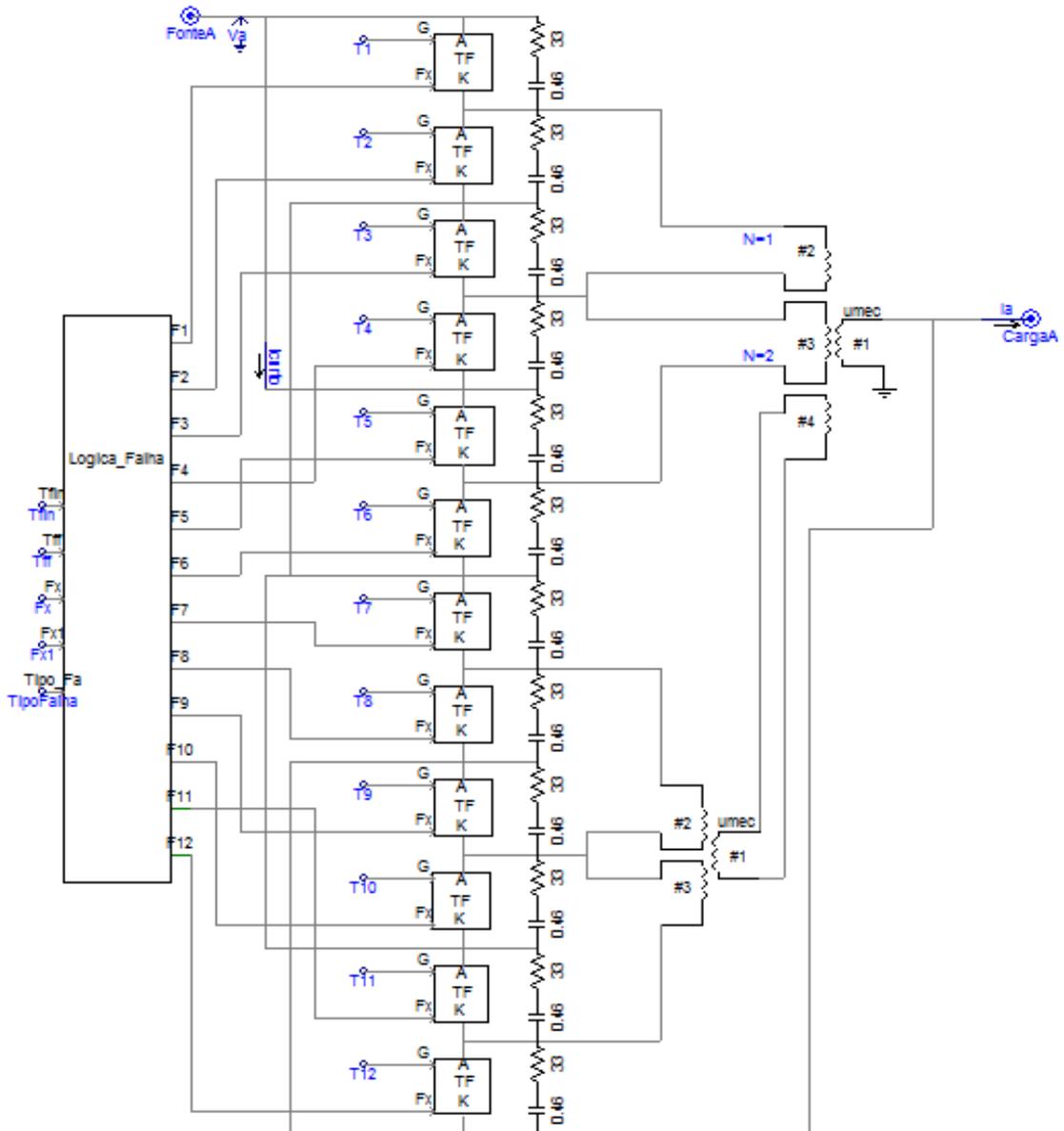


Figura 4.3: Esquema de ligações do “Modelo Umec”

Da mesma forma que o “Modelo Autotrafo”, o “Modelo Umec” apresenta quatro bobinas no primário, conectadas às células tiristorizadas de forma a atender o princípio de compensação do RECET. Os valores da tensão e a conexão são a mesma e foram explicados com mais detalhes no item anterior.

A grande diferença está na utilização de um transformador de quatro enrolamentos, e na conexão de uma bobina do primário (transformador de quatro enrolamentos) a uma bobina do secundário (transformador de três enrolamentos). Isso se dá para que seja forçado que atravesse o mesmo fluxo em todos os enrolamentos, validando a característica de autotransformador do RECET. Essa

conexão a mais para forçar o caminho do fluxo, é que se faz necessária a utilização do transformador de quatro enrolamentos.

Porém, como o PSCAD/EMTDC[®] possui o modelo “Umec” como modelo de transformador de quatro enrolamentos, esse segundo modelo apresenta características particulares intrínsecas ao modelo “Umec”. Por este motivo, na próxima seção será feita uma análise mais detalhada deste modelo de transformador.

4.2.1 Transformador “Umec”

Este modelo de transformador, conhecido como Umec possui a opção de que o usuário possa modelar a característica da saturação do núcleo diretamente por uma curva $I \times V$ (tensão por corrente). Se desejado, o ramo de magnetização pode ser eliminado completamente, deixando o transformador no modo Ideal, onde tudo que permanece é uma reatância série. Alguns elementos da geometria do núcleo, isto é, tipo do núcleo, dimensões do membro e do enrolamento também são exigidos na entrada de dados [7].

Com isso, a principal diferença entre o transformador convencional, utilizado no “Modelo Autotrafo”, e o transformador Umec é que se torna possível dimensionar, ou seja, modelar a geometria do núcleo. Como o modelo Umec leva em conta a topologia magnética do transformador, se torna possível caracterizar melhor o comportamento do transformador em um sistema de potência.

A saturação também pode ser parametrizada com mais eficiência. A possibilidade de inserir até 10 pontos da curva de saturação é uma considerável diferença em relação ao modelo convencional, pois assim a curva de saturação poderá ser mais fiel ao transformador que está sendo utilizado na prática, e com isso os resultados da simulação também terão mais sentido prático. Porém, para este trabalho, o valor da curva de saturação utilizado foi o que vêm de padrão para o modelo Umec no PSCAD/EMTDC[®], tendo em vista que os valores reais não estão disponíveis ainda.

4.2.1.1 Análise do Transformador “Umec” Monofásico

As figuras 4.4(a) e 4.4(b) apresentam o modelo Umec. A fonte de força magneto motriz $N_1 i_1(t)$ e $N_2 i_2(t)$ representam cada enrolamento individualmente. As tensões dos enrolamentos primários e secundários, $v_1(t)$ e $v_2(t)$, são usadas para calcular o fluxo ϕ_1 e ϕ_2 do membro onde se encontra o enrolamento [8].

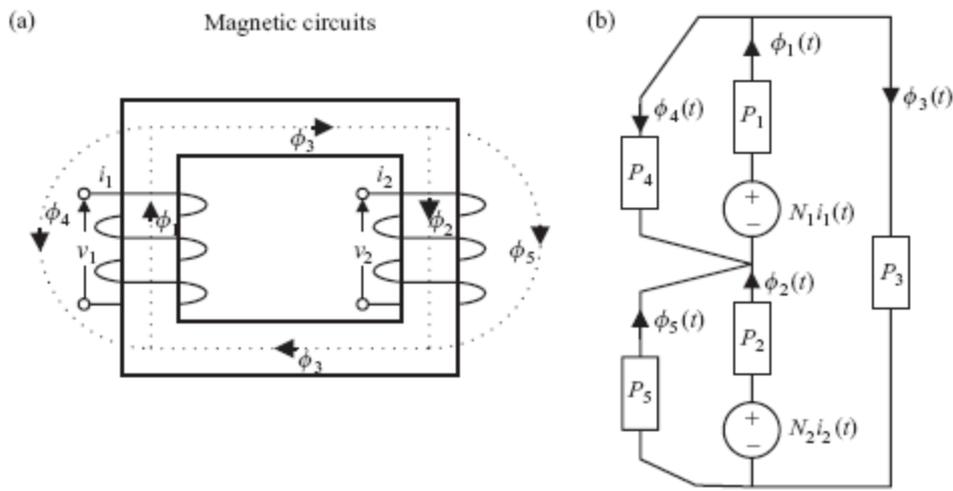


Figura 4.4: Modelo do transformador Umec monofásico: (a) caminhos do fluxo do núcleo e (b) circuito magnético equivalente

Fonte: Neville Watson, Jos Arrillaga, “Power Systems Electromagnetic Transients Simulation”

O fluxo do membro onde se encontra o enrolamento divide-se entre o fluxo de dispersão e o fluxo que percorre o garfo (yoke), então, o fluxo no núcleo não pode ser considerado uniforme.

Na figura 4.4(b), P_1 e P_2 representam as permeâncias dos membros onde se encontram os enrolamentos do transformador e P_3 representa a permeância do garfo. Se o comprimento total do núcleo L_w cercado pelos enrolamentos têm uma seção-transversal uniforme A_w , então $A_1=A_2=A_w$. É assumido também que o garfo superior e inferior possua o mesmo tamanho L_y e uma seção-transversal A_y . Ambos os garfos são representados por um único ramo, chamado de ramo 3 no modelo Umec, de distância $L_3=2L_y$ e área $A_3=A_y$ [8].

A informação da dispersão é obtida através de ensaios de circuito aberto e curto-circuito e, conseqüentemente, os comprimentos eficazes e as áreas de seção transversal dos caminhos dos fluxos de dispersão não são exigidos para calcular as permeâncias P_4 e P_5 de dispersão [8]. São exigidos apenas para calcular as permeâncias P_1 , P_2 e P_3 .

A curva característica de magnetização mostrada na figura 4.5 mostra como o núcleo do transformador se move na região do joelho da curva de magnetização, mudanças na permeância incremental (P_k) é muito maior e mais repentina (especialmente de estivermos tratando de núcleos com alta eficiência) do que mudanças nas permeância reais P_k^* . Embora a permeância incremental dê forma ao modelo do transformador, o uso da permeância real é favorecido para a representação do transformador para simulação dinâmica [8]

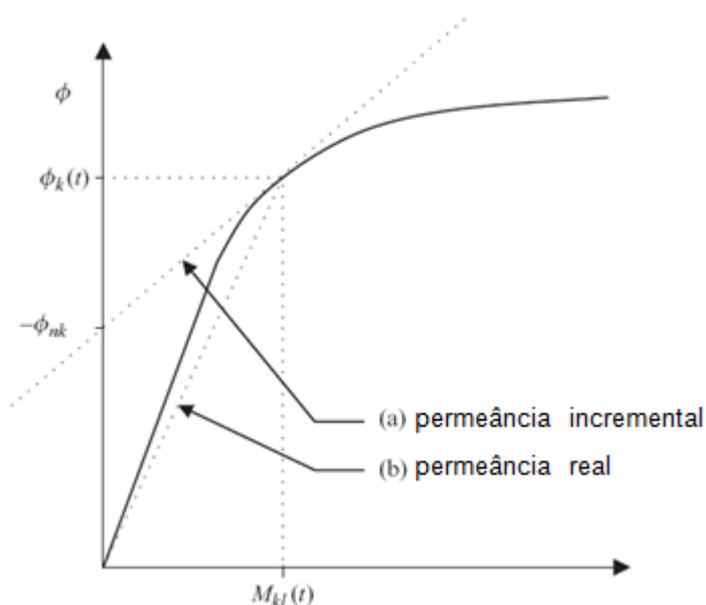


Figura 4.5: Curva Característica de Magnetização.

Fonte: Neville Watson, Jos Arrillaga, "Power Systems Elettromagnetic Transients Simulation"

No transformador Umec, o fluxo é expresso utilizando a permeância real, isto é:

$$\phi_k = P_k^* M_{k1}(t) \tag{4.1}$$

A geometria do núcleo irá determinar diretamente as permeâncias dos membros onde se encontram os enrolamentos e a permeância do garfo. Essas permeâncias serão utilizadas como parâmetros da curva de magnetização do núcleo, e logo após, os pontos dessa curva serão utilizados para determinar o fluxo no núcleo do transformador. Percebe-se então, que os pontos da curva de magnetização e as relações de comprimento e área do núcleo são primordiais para uma modelagem correta do transformador.

A figura 4.6 abaixo apresenta um diagrama de blocos que mostra o passo a passo das etapas que o PSCAD/EMTDC[®] segue para calcular as permeâncias e caracterizar o funcionamento do transformador através dos parâmetros inseridos no modelo de simulação.

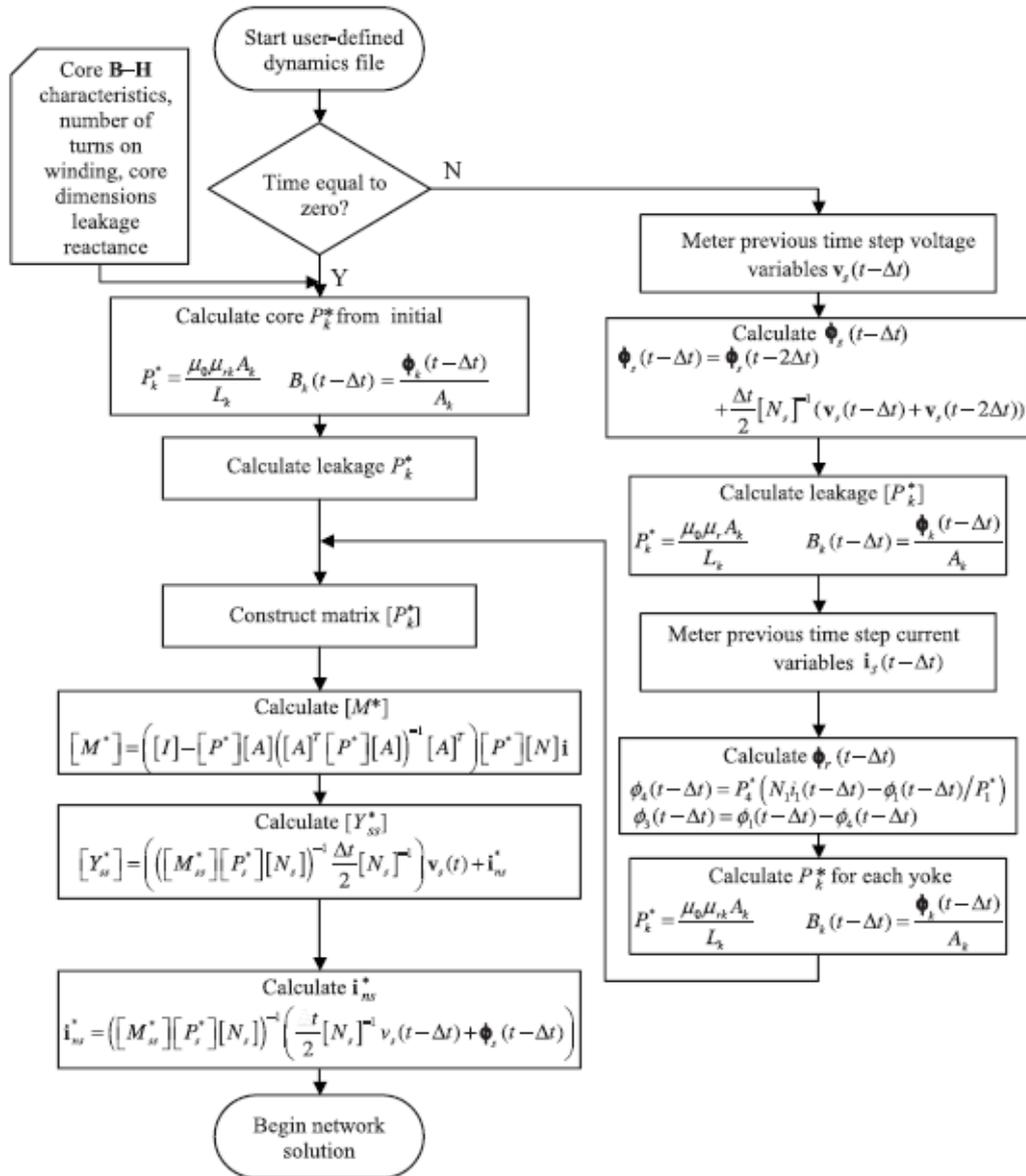


Figura 4.6: Implementação de UMEC em PSCAD / EMTDC

Fonte: Neville Watson, Jos Arrillaga, "Power Systems Electromagnetic Transients Simulation"

O modelo Umec possui uma equação particular para a modelagem do fluxo no núcleo do transformador. E com isso, é mais apropriado para simulações onde há variações abruptas do fluxo, como é o caso de falha no RECET.

A análise de transientes deve levar em conta a topologia em particular do núcleo, para que se tenham resultados mais exatos. Em vista disso, o modelo Umec está mais preparado para esse tipo de simulação de análises não-lineares.

4.3 Simulações e Análise de Resultados para os Modelos do RECET

A partir de agora, será mostrado como os modelos irão reagir para situações de compensação da tensão em regime permanente. Serão impostas variações de tensão na fonte, tanto elevação como afundamento, e será analisado se os modelos atendem aos requisitos do RECET, e como o fluxo nos transformadores desses dois modelos se comportam.

A rede na qual o RECET está inserido segue abaixo na figura 4.7.

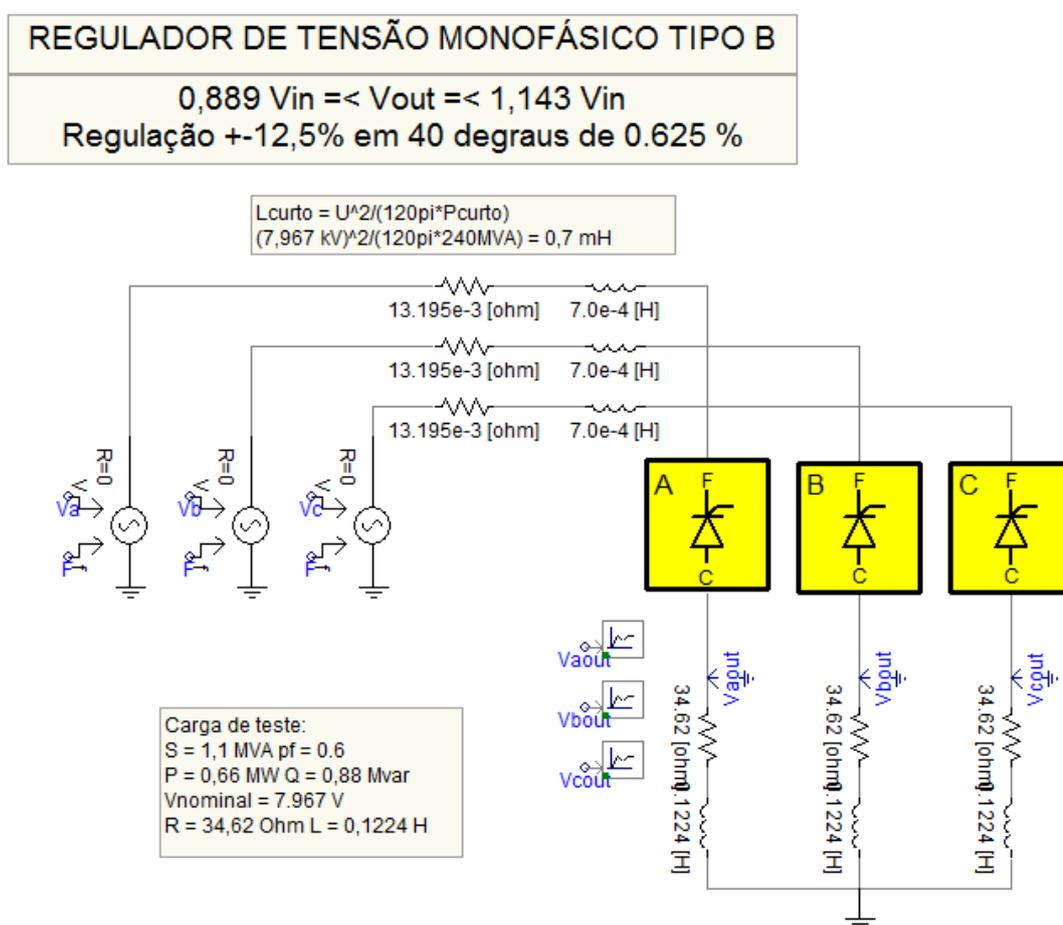


Figura 4.7: Rede na qual o RECET está inserido.

4.3.1 “Modelo Autotrafo”

A condição de simulação será a seguinte: a tensão da fonte estará em 7,967kV , ou seja, em 1p.u até 0,5 segundo. Nesse instante, a tensão na fonte

sofrerá uma elevação, e irá para um valor aproximadamente de 8,66kV, e assim permanecerá até 1(um) segundo. Nesse instante, a tensão voltará para 7,967kV e seguirá dessa forma até o fim da simulação em 1,5 segundos.

Lembrando que as análises serão feitas sempre para apenas uma fase, a fase A. O comportamento do RECET é igual para todas as fases. Basta impor as mesmas condições a elas, que o comportamento delas será o mesmo.

O comportamento de compensação do RECET para a fase A pode ser visto na figura 4.8.

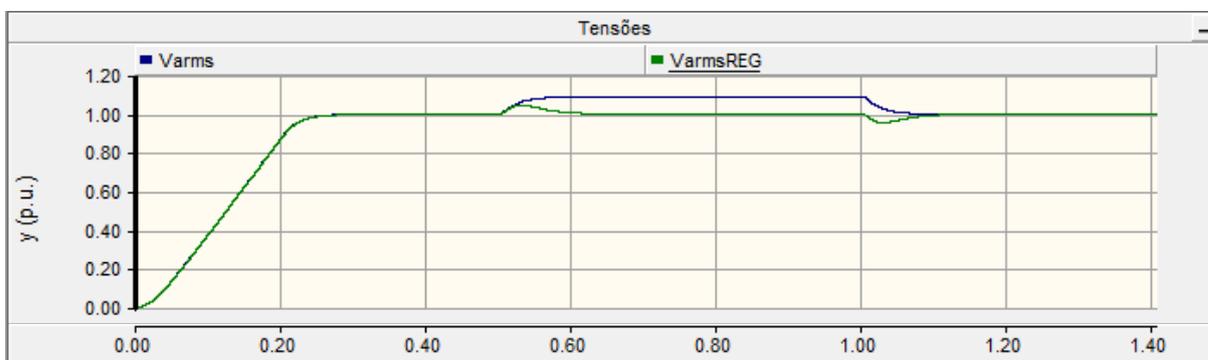


Figura 4.8: Comportamento do RECET para fase A do “Modelo Autotrafo”

Através da análise deste resultado, pode-se observar que o comportamento do RECET foi o esperado, compensando para 1p.u a tensão na carga sempre que uma variação de tensão na fonte ocorresse.

Na figura 4.9, está sendo mostrado o comportamento do fluxo nos dois transformadores do modelo.

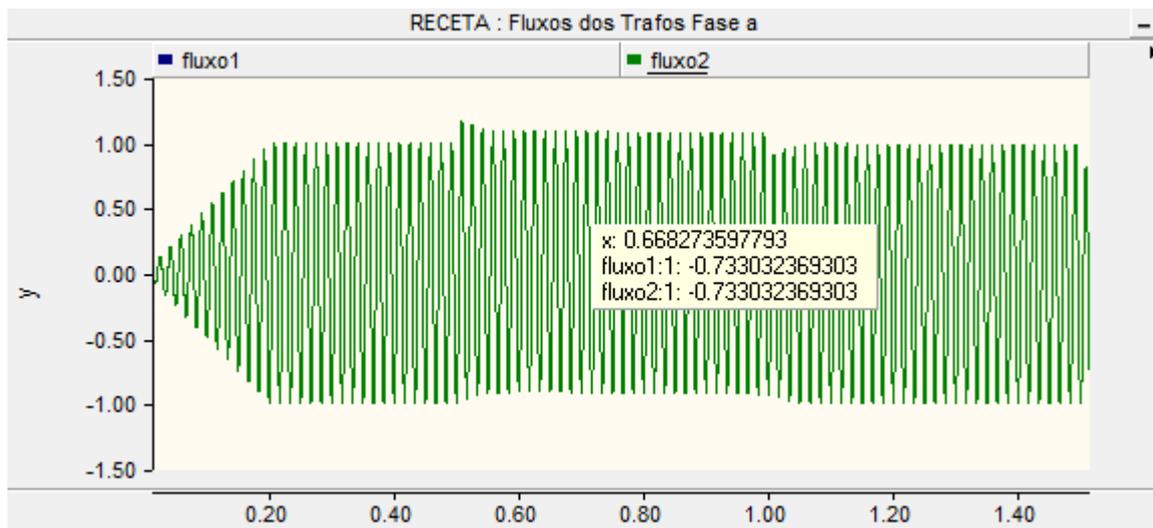


Figura 4.9: Comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Autotrafo”

Analisando a figura 4.9 observa-se que os fluxos nos dois transformadores são exatamente o mesmo. Comprovando a idéia do RECET sobre o princípio do autotransformador, que dizia que o fluxo deve ser o comum a todos os enrolamentos.

Como são os mesmos, aparece apenas o fluxo 2 em verde. Mas para provar que é realmente o mesmo, foi colocada uma observação na figura mostrando que para um tempo de aproximadamente 0,66 segundo, os fluxos são de 0,73 p.u para ambos os transformadores.

Na figura 4.10 é feito um zoom nos fluxos entre 0,4 e 0,8 segundo para mostrar com mais clareza o comportamento dos mesmos e a pequena variação que eles sofrem em 0,5 segundo, quando a tensão na fonte sofre uma elevação. Pode ser observado que eles continuam os mesmos e sofrem a mesma variação quando a tensão na fonte é alterada. Essa alteração no fluxo se deve ao início do chaveamento dos tiristores para compensar a variação da tensão.

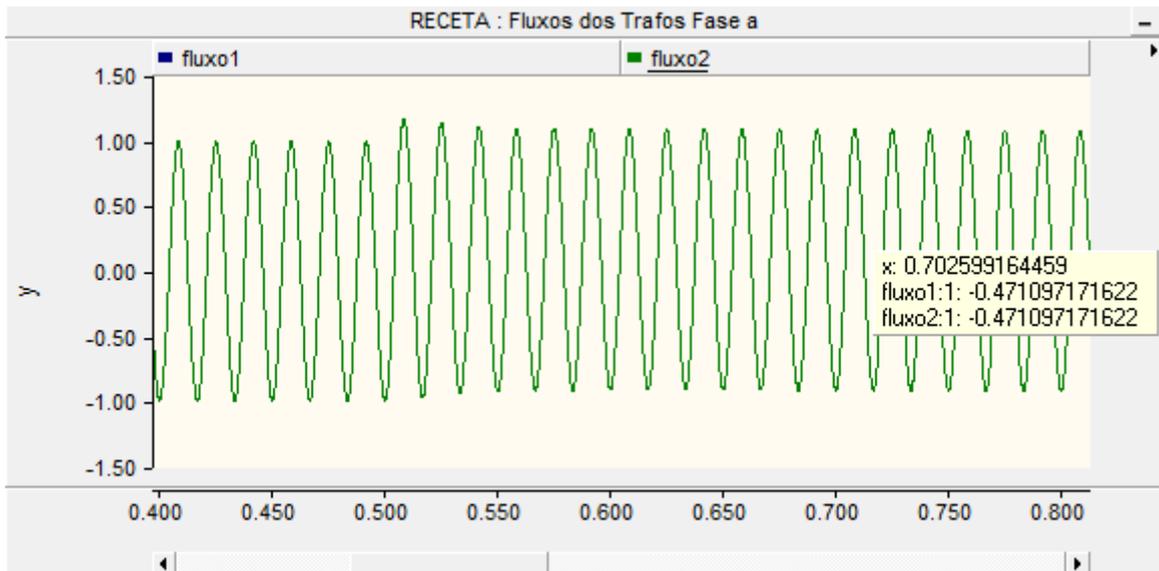


Figura 4.10: Zoom no comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Autotrafo”

Então, para este tipo de análise, o modelo se mostra correto. Ele consegue atender aos princípios de funcionamento e compensação da tensão do RECET, e consegue fazer o fluxo ser comum a todos os enrolamentos dos dois transformadores.

4.3.2 “Modelo Umec”

Para o “Modelo Umec” será considerada a mesma condição que foi imposta para o outro modelo. A tensão na fonte sofrerá as mesmas alterações descritas anteriormente e a mesma análise de compensação e fluxo nos enrolamentos dos transformadores será feita.

O comportamento de compensação da tensão do RECET para a fase A pode ser visto na figura 4.11.

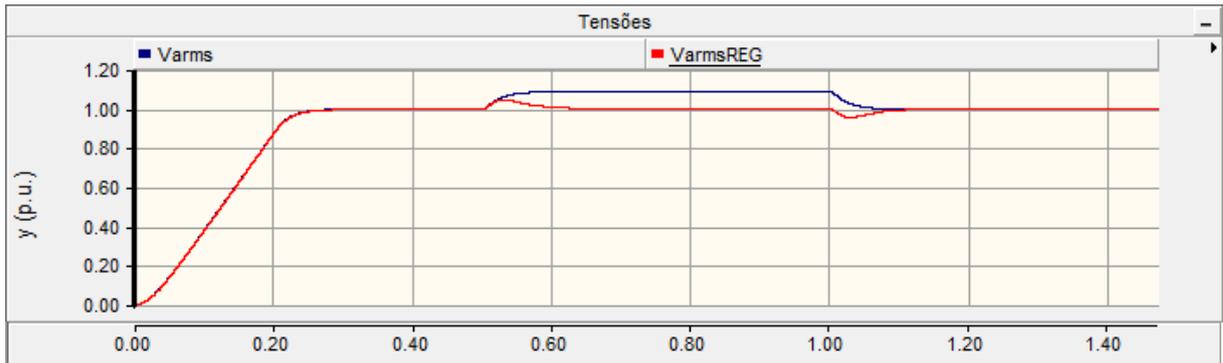


Figura 4.11: Comportamento do RECET para fase A do “Modelo Umec”

Através da análise da figura acima, pode-se observar que o comportamento do RECET foi novamente o esperado, compensando para 1p.u a tensão na carga sempre que uma variação de tensão na fonte ocorresse. É importante ressaltar que o comportamento foi idêntico ao comportamento do “Modelo Autotrafo” mostrado no item anterior.

Na figura 4.12, está sendo mostrado o comportamento do fluxo nos dois transformadores do “Modelo Umec”.

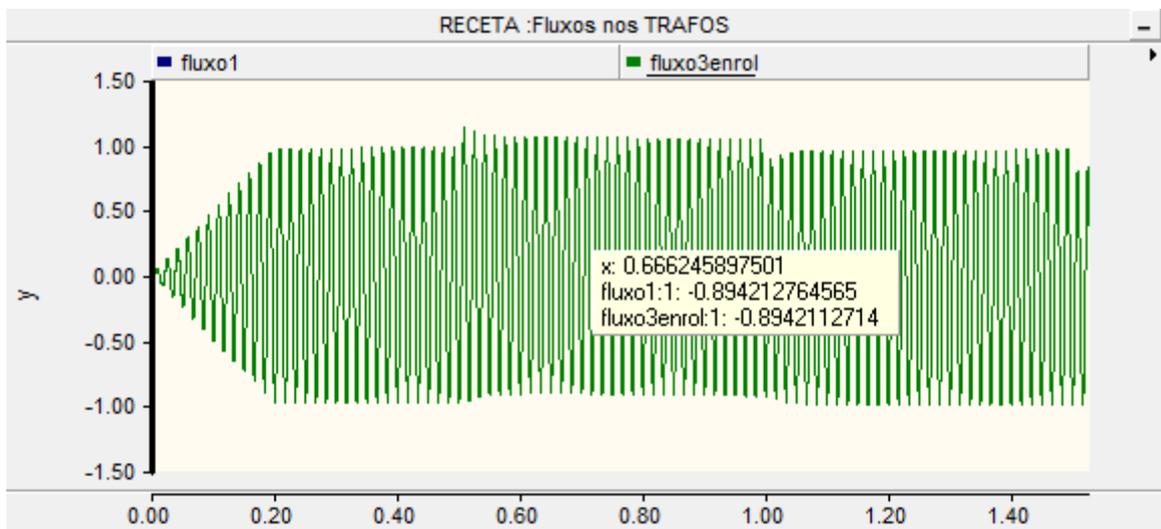


Figura 4.12: Comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Umec”

O comportamento do fluxo nos dois transformadores foi praticamente o mesmo, porém pode se observar que a partir da sexta casa decimal, os valores dos

fluxos passam a ser diferentes. Com esse resultado, percebe-se que o modelo não valida o princípio de fluxo comum aos enrolamentos. Mesmo que o comportamento tenha sido praticamente idêntico ao “Modelo Autotrafo”.

Um zoom também foi dado entre 0,4 e 0,8 segundo para mostrar que é o comportamento dos fluxos são ligeiramente diferentes entre os transformadores do “Modelo Umec”. Isso pode ser observado na figura 4.13 abaixo.

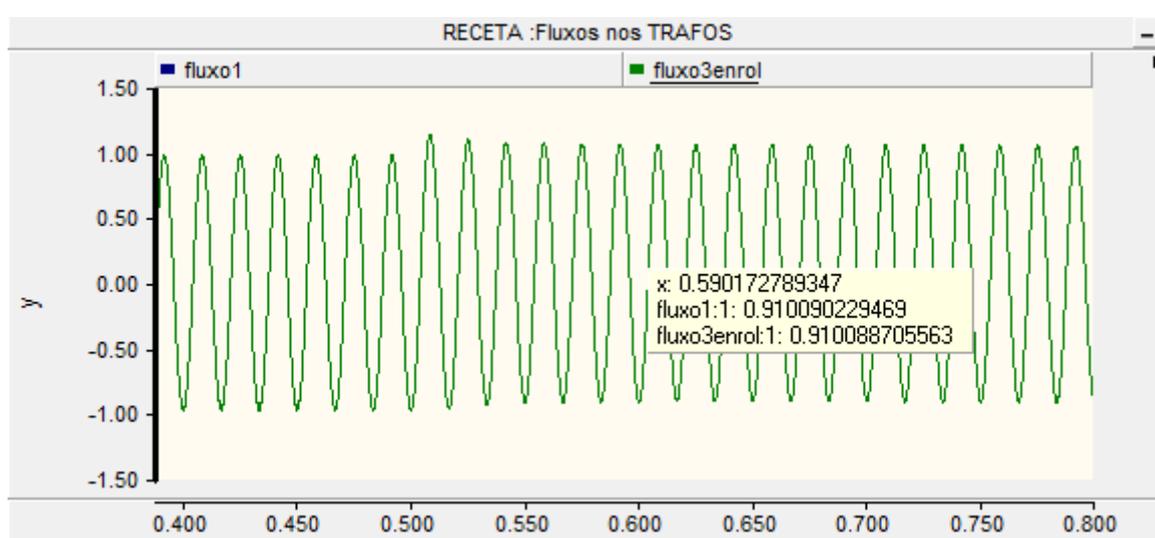


Figura 4.13: Zoom no comportamento do fluxo nos dois transformadores da fase A do “Modelo Umec”

A conclusão que pode ser tirada após essa análise dos dois modelos é que o “Modelo Autotrafo” atende as características do RECET simulação em regime permanente. Porém, o “Modelo Umec” não é totalmente correto, a conexão entre a bobina do primário (transformador de quatro enrolamentos) e a bobina do secundário (transformador de três enrolamentos) não garante que o fluxo seja exatamente igual em todos os enrolamentos.

O Capítulo 4, através das simulações e análises, trouxe duas conclusões importantes. A primeira é que o modelo de transformador Umec é melhor para simulações onde o transiente é analisado. Nos modelos convencionais, as características não lineares são feitas baseada no “Knee Point”, ou seja, joelho da

curva de saturação. Para simulações onde a saturação do núcleo é mais relevante, o modelo do Umec é mais aconselhável [6].

A outra conclusão, é que a configuração da ligação dos transformadores do “Modelo Autotrafo” representa melhor as características do RECET e atende ao princípio do autotransformador.

Logo, será criado um terceiro modelo, chamado de “Modelo Três Enrolamentos”, onde a configuração será idêntica ao “Modelo Autotrafo”, porém os transformadores que irão compor este modelo serão os transformadores de três enrolamentos Umec. Isso fará com que as características do RECET sejam atendidas, e a simulação de análise de transiente também seja feita da maneira correta, pois o transformador Umec estará sendo utilizado.

Então, seguirão no Capítulo 5, as análises de falha nos tiristores do circuito de potência e na linha de distribuição, antes e depois do regulador, para o “Modelo Três Enrolamentos” proposto.

Capítulo V – Análise de Falhas nos Tiristores

Conforme explicado no Capítulo 4, um novo modelo de simulação do RECET foi proposto, e a configuração dele pode ser vista na figura 5.1.

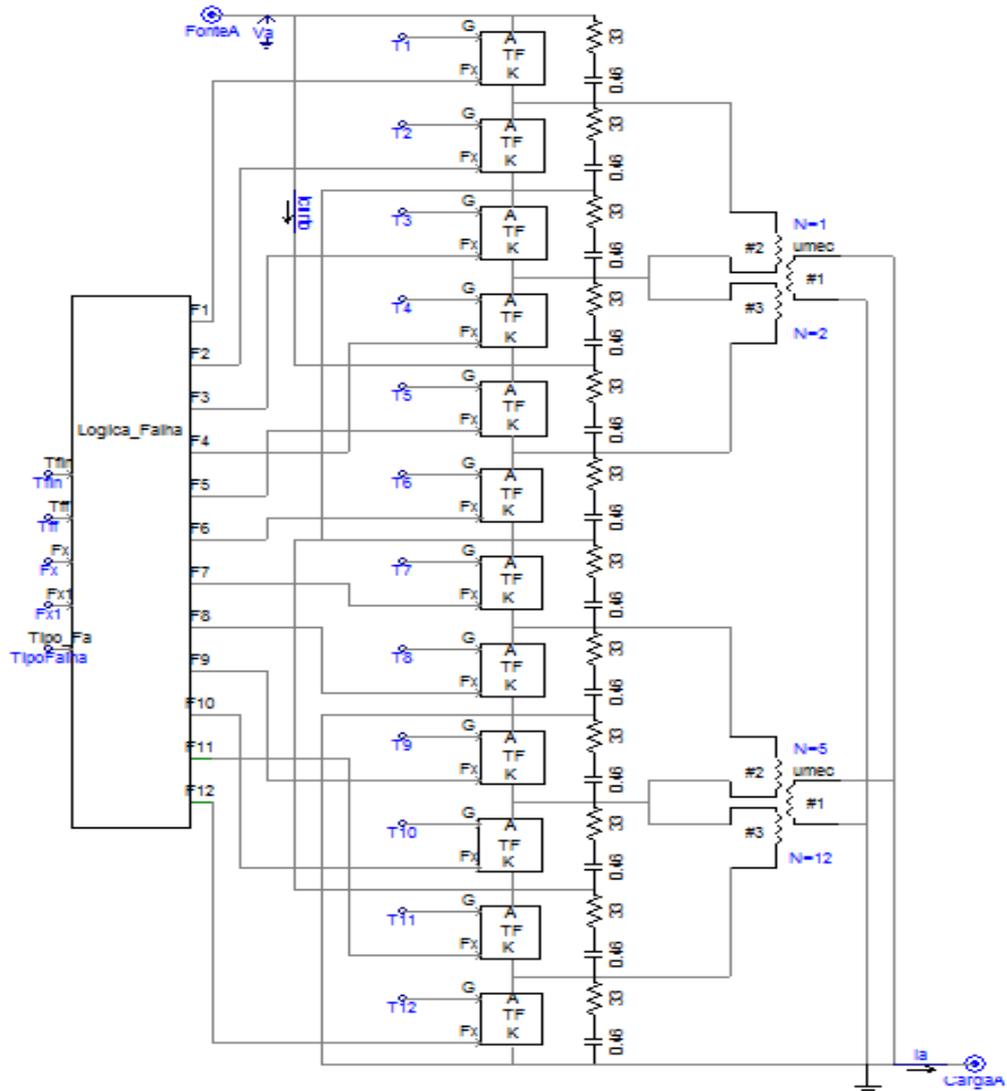


Figura 5.1: Esquema de ligações do “Modelo Três Enrolamentos”

A partir de agora, este modelo será submetido à falha nos tiristores e será avaliado seu comportamento perante essas condições.

5.1 Primeira Simulação de Falha nas Chaves

A primeira simulação se caracterizará por mostrar o comportamento do RECET diante a abertura do par de tiristores T2, o segundo de cima para baixo do modelo mostrado na figura 5.1.

Dizer que o tiristor irá abrir é simular como se estivesse sido retirado por em um determinado instante enquanto o regulador estava em funcionamento.

A simulação será a seguinte: o RECET entrará em funcionamento e com sua tensão da fonte em 7,967kV, ou seja, em 1p.u até 0,5 segundo. Nesse instante a tensão da fonte sofrerá uma elevação e irá para aproximadamente 8,016kV, e ficará assim até 1 segundo. Quando então, irá retornar a 7,967kV e assim ficará até 1,5 segundo, e a partir deste instante a tensão da fonte sofrerá um afundamento e irá para aproximadamente 7,518kV.

Paralelo a essa dinâmica de variação da tensão da fonte e da compensação da tensão entregue a carga, a par de tiristores T2 sofrerá a abertura em 0,3 segundo, ou seja, será queimado neste instante e assim permanecerá até o final da simulação. Comprometendo assim, o funcionamento normal do RECET.

Os resultados da dinâmica de compensação da tensão entregue a carga pode ser vista na figura 5.2.

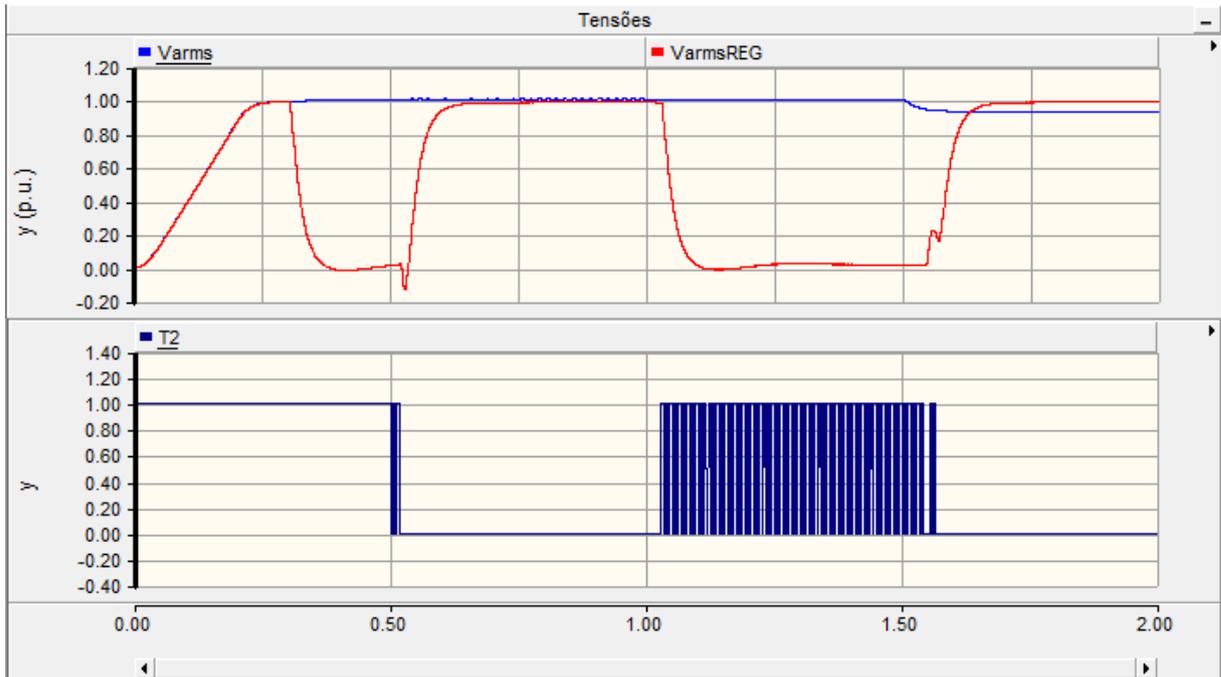


Figura 5.2: Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T2 aberto.

A figura superior mostra a tensão de entrada da fonte em azul e a tensão regulada para a carga em vermelho. Já a figura inferior, mostra os pulsos enviados a chave T2, ou seja, mostra quando a lógica de compensação do RECET precisa ou não da chave T2 para compensar a tensão na carga.

Com os resultados obtidos acima, podemos observar que o RECET se comporta de maneira correta. Em 0,3 segundo, quando o par de tiristores T2 se abre, a tensão entregue a carga vai a zero quase que instantaneamente. Pois para a tensão em 7,967kV (1p.u), o RECET utiliza os pares de tiristores T1, T2, T7 e T8 para compensar entregar a tensão de 1p.u a carga. Como o T2 está aberto, a corrente passa a não ter mais caminho, logo a tensão na carga vai a zero.

Porém, em 0,5 segundo, quando a tensão sofre uma elevação e vai para aproximadamente 8,016kV, a lógica do RECET passa a utilizar as chaves T1, T3, T7 e T8 para compensar a tensão na carga. Ou seja, T2 não é mais utilizado, então mesmo que ele esteja aberto, a corrente não precisaria circular por ele para encontrar o caminho, e com isso a tensão na carga consegue ser regulada para 1p.u. Essas afirmações referentes a variação da tensão entregue a carga podem ser observadas na figura 5.3 abaixo.

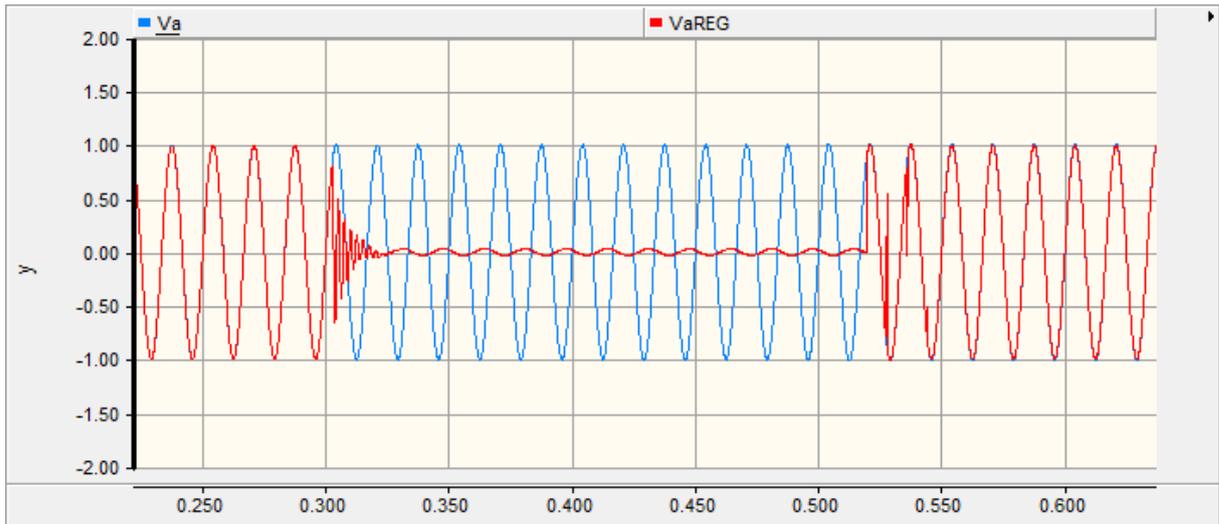


Figura 5.3: Tensões na fonte e na carga para T2 aberto.

Em 1(um) segundo, quando a tensão na fonte volta para 7,967kV (1p.u) e passa a precisar novamente da chave T2 para compensar a tensão na carga, T2 ainda está aberto, ou seja, a corrente não encontra caminho e a tensão entregue a carga vai praticamente para zero. Será visto mais a frente porque a tensão não vai a zero totalmente.

E por fim, em 1,5 segundo, quando a tensão na fonte sofre um afundamento e vai para aproximadamente 7,518kV, a lógica de compensação do RECET passa a utilizar as chaves T1, T6, T9 e T11 para compensar a tensão na carga. Logo, como T2 não faz mais parte do caminho da corrente, a tensão consegue ser compensada e passa a ser entregue 1p.u a carga. Novamente, as variações das tensões da fonte e da carga em 1(um) e 1,5 segundo podem ser observadas na figura 5.4.

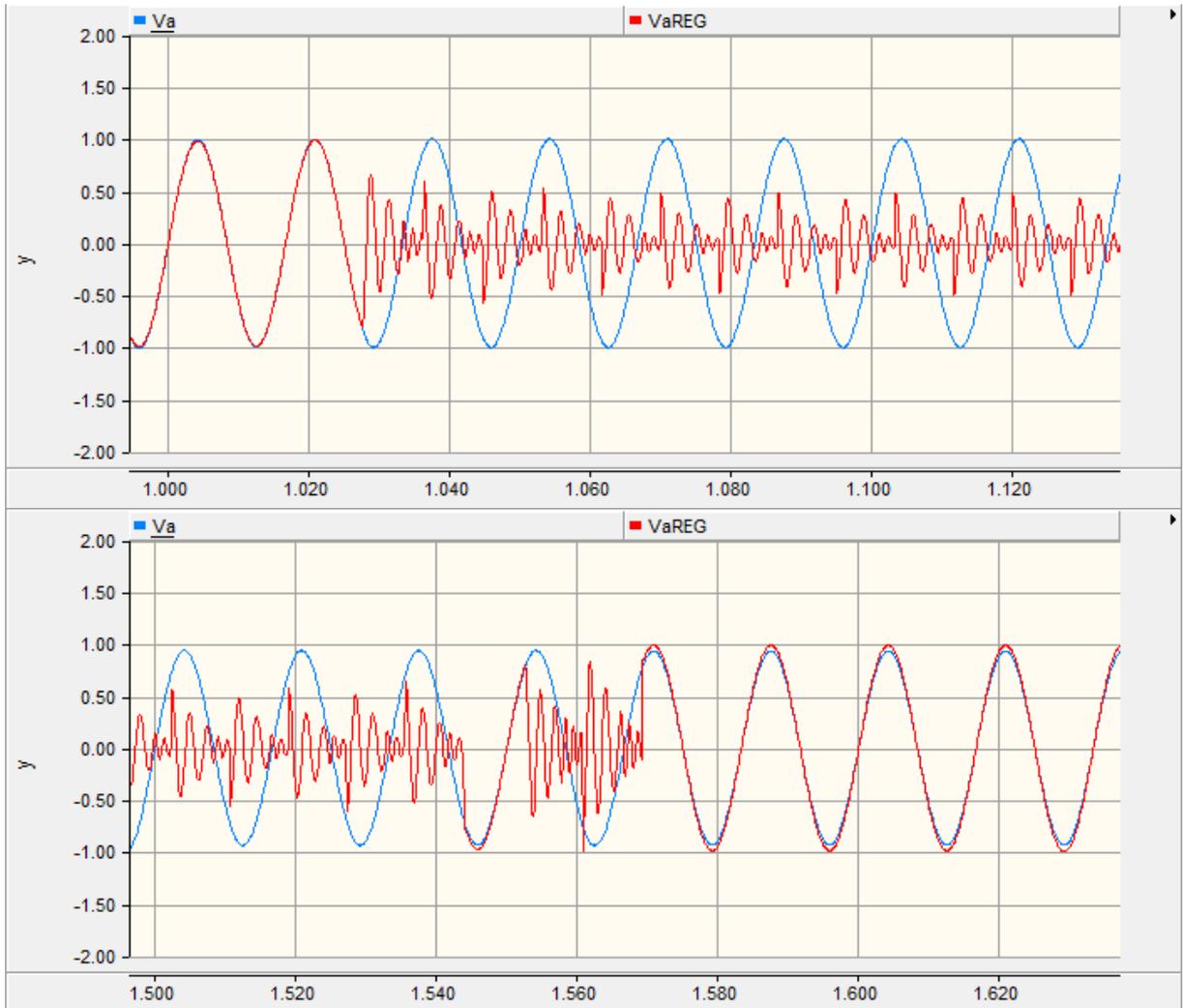


Figura 5.4: Tensão na fonte e na carga para T2 aberto, em 1,0 e 1,5 segundo.

A corrente entregue a carga pode se vista na figura 5.5.

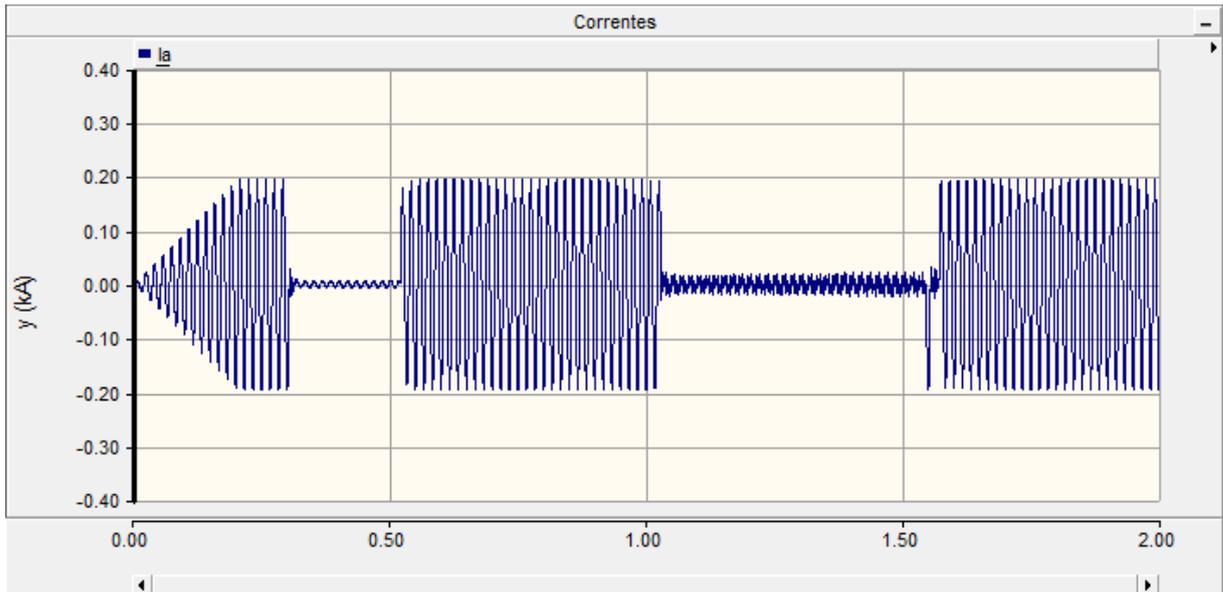


Figura 5.5: Corrente entregue a carga para T2 aberto.

A figura 5.5 mostra coerência no que foi dito anteriormente, a corrente vai praticamente a zero quando se precisa da chave T2 para compensar e a mesma se encontra aberta.

Na figura 5.6 é mostrado um zoom para se entender melhor o resultado da corrente encontrada.

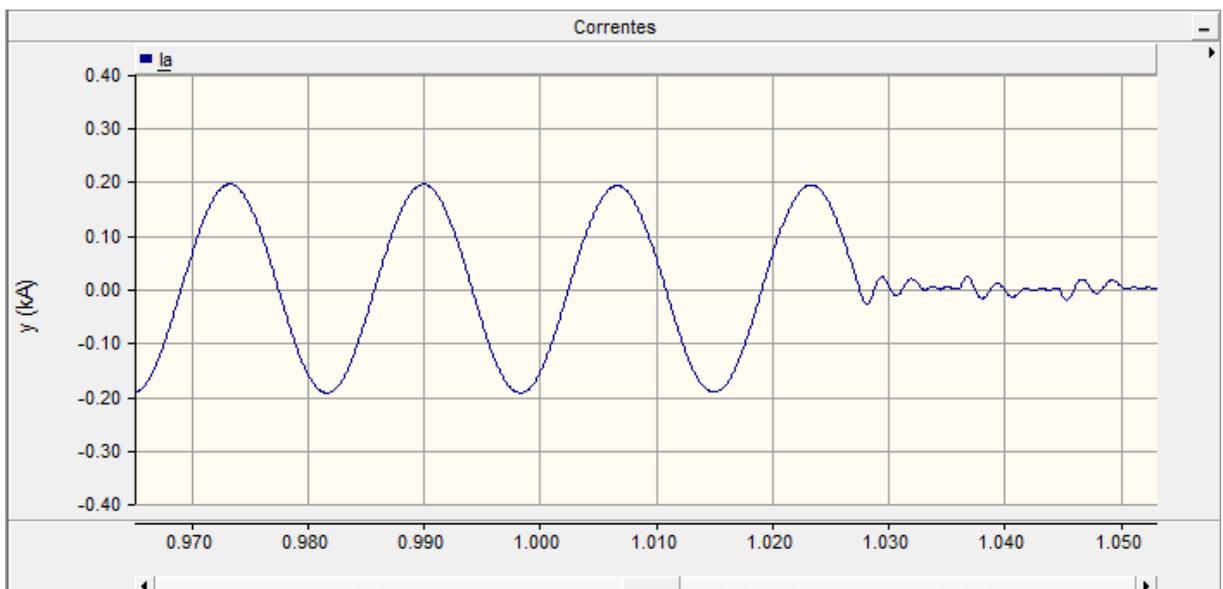


Figura 5.6: Zoom na corrente entregue a carga com T2 aberto.

Pode-se observar na figura 5.5 que a corrente possui um alto teor harmônico no instante de tempo entre 1(um) e 1,5 segundo. Se observarmos na figura 5.3, a tensão não está exatamente em zero como deveria, ela está um pouco acima. Isso se dá porque a corrente encontra caminho mesmo com a chave T2 aberta, ela percorre o snubber que está em paralelo com a chave, e como esse snubber é uma associação de resistor com capacitor em série, justifica-se então o alto teor harmônico na forma de onda da corrente e a tensão na carga não ser exatamente zero.

O fluxo nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” pode ser visto na figura 5.7.

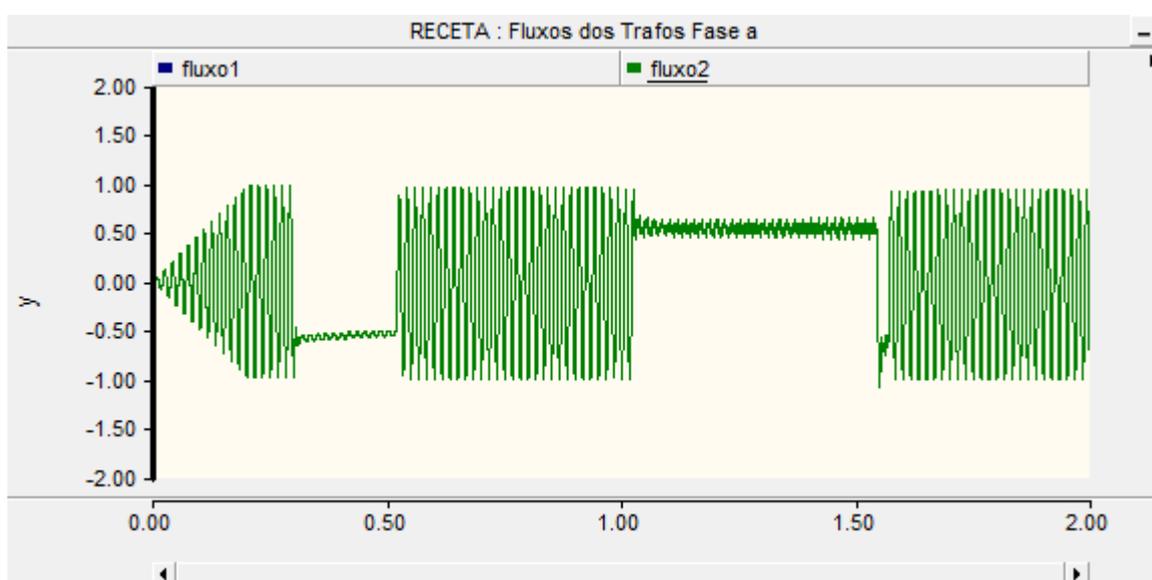


Figura 5.7: Dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” para T2 aberta.

A dinâmica do fluxo também segue a coerência, entre 0,3 e 0,5 segundo, quando a corrente passa a não ter mais caminho, pois T2 está aberto, a tensão vai praticamente a zero e conseqüentemente o fluxo também vai praticamente a zero. Entre 1(um) segundo e 1,5 segundo, o conteúdo harmônico da corrente interfere na forma do fluxo. Já quando a corrente encontra caminho pelas chaves, o fluxo se restabelece e a tensão na carga é compensada.

Na figura 5.8, é mostrado um zoom feito no fluxo entre 0,95 e 1,125 segundos para mostrar que o fluxo nos dois transformadores é exatamente o mesmo e analisar também o teor harmônico explicado anteriormente.

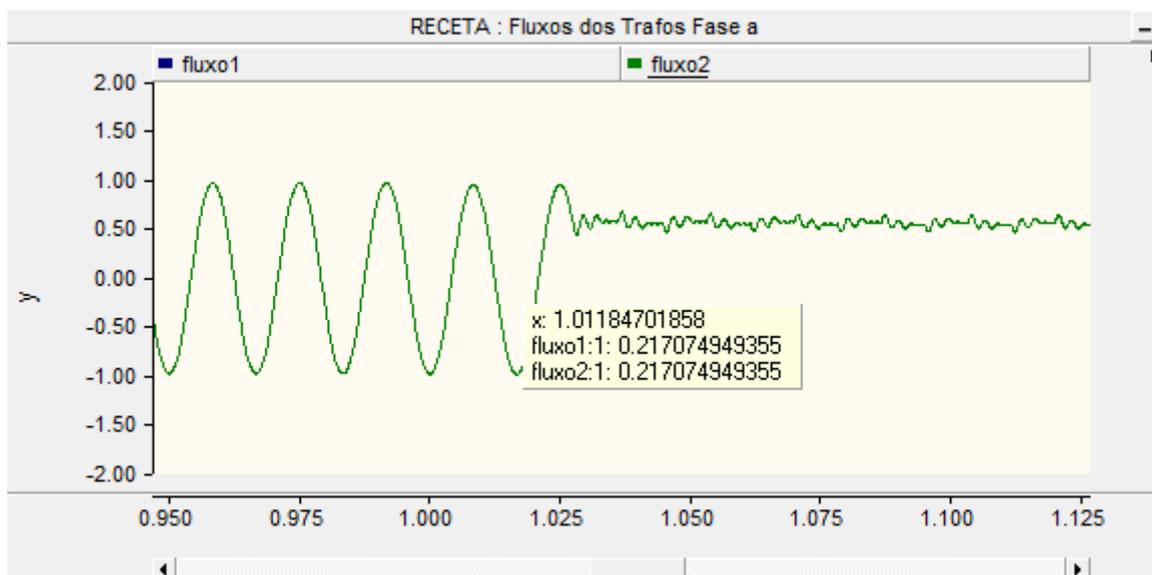


Figura 5.8: Zoom na dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” entre 0,95 e 1,125 segundo.

Observa-se que o fluxo também possui o teor harmônico no instante após 1(um) segundo. O motivo é que como a tensão se relaciona diretamente com o fluxo, se a tensão possui componentes harmônicos, o fluxo também terá.

Como explicado anteriormente no Capítulo 4, a geometria do núcleo é algo que pode ser parametrizado no modelo de transformador Umec. A título de comparação, será feita essa mesma simulação feita anteriormente, porém utilizando valores padrões da geometria do núcleo do PSCAD/EMTDC®. Lembrando que para todas as simulações, diferentemente desta a seguir, foram usados valores diferentes desses valores padrões. E o intuito com essa simulação é mostrar a grande influência que a geometria do núcleo impõe nos resultados do fluxo nos transformadores do RECET.

Na figura 5.9 abaixo, pode ser observado o comportamento do RECET.

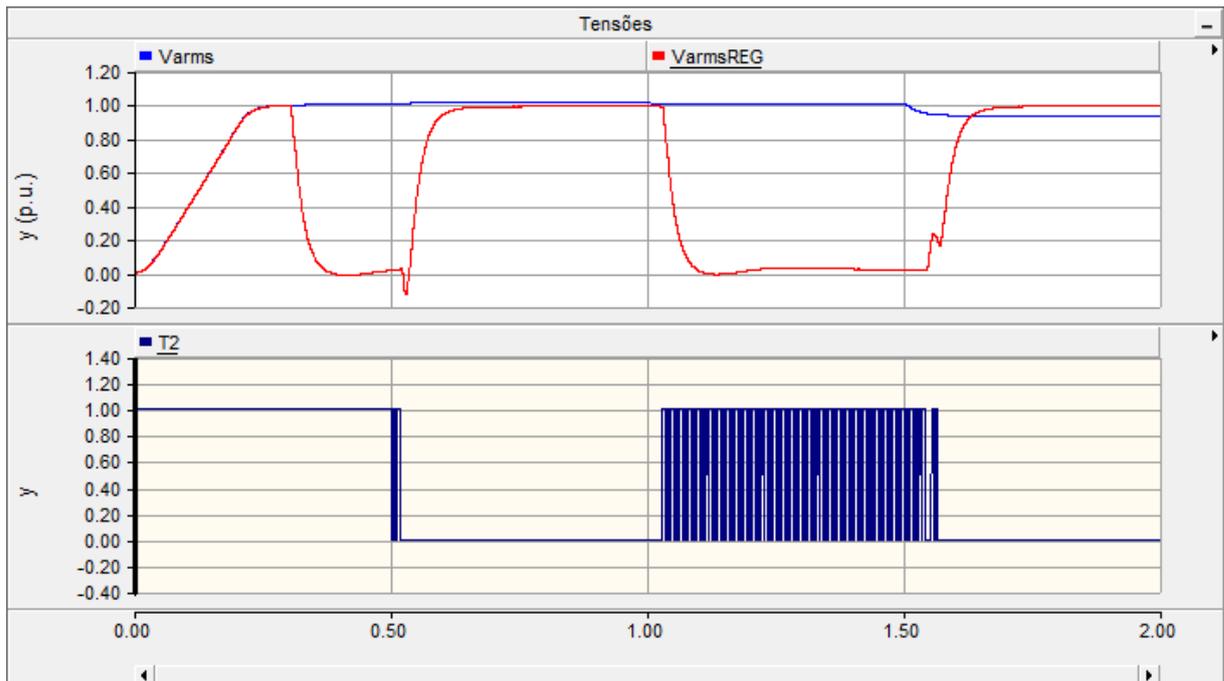


Figura 5.9: Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T2 aberto com valores da geometria do núcleo padrões.

Observa-se que a dinâmica do RECET não se altera para essa simulação. Compensando as variações da tensão na fonte e respeitando a dinâmica quando a o par de tiristores T2 é aberto. Porém, pode se observar na figura 5.10 a diferença no comportamento do fluxo nos transformadores quando se altera a geometria do núcleo.

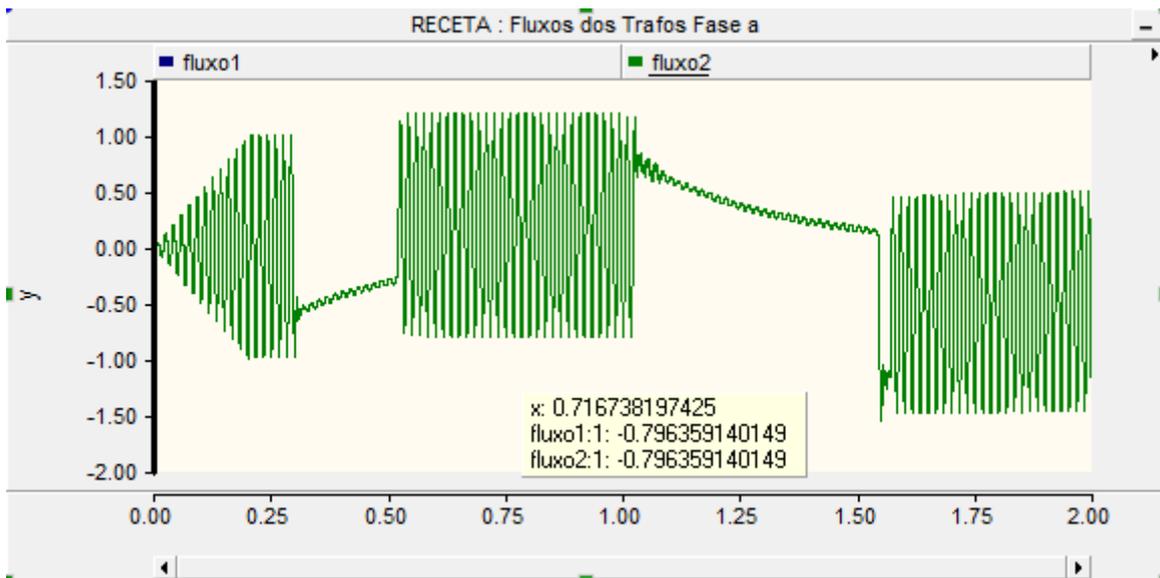


Figura 5.10: Dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos para T2 aberta com geometria do núcleo padrão.

O fluxo nos dois transformadores se manteve o mesmo, até porque o que determina esse tipo de resultado é a conexão dos transformadores. Porém, a dinâmica do comportamento foi completamente diferente. Validando assim, a influência da geometria do núcleo no comportamento dos transformadores.

As simulações que se seguem utilizam os valores usados na primeira simulação do primeiro caso, onde não são considerados os valores padrões da geometria do núcleo do transformador Umec.

Os valores utilizados para todas as simulações, exceto esta anterior que utiliza os valores padrões de geometria do núcleo, foram escolhidos a partir de um ajuste comparativo entre o comportamento do “Modelo Autotrafo” que não utiliza o Umec e o “Modelo Três Enrolamentos” que utiliza o Umec. A partir do comportamento do primeiro modelo, foi sendo alterado o valor da geometria do núcleo do transformador Umec do outro modelo de forma a tornar o comportamento do fluxo dos transformadores semelhantes para ambos.

5.2 Segunda Simulação de Falha nas Chaves

A segunda simulação mostrará o comportamento do RECET diante a abertura do par de tiristores T9, o quarto de baixo para cima do modelo mostrado na figura 5.1.

A simulação procederá da seguinte maneira: o RECET entrará novamente em funcionamento e com sua tensão da fonte em 7,967kV, ou seja, em 1p.u até 0,5 segundo. Nesse instante a essa tensão sofrerá um afundamento e irá para aproximadamente 7,269kV, e ficará assim até o final da simulação.

Paralelo a essa dinâmica de variação da tensão da fonte e da compensação da tensão entregue a carga, a par de tiristores T9 sofrerá a abertura em 0,7 segundo, ou seja, perderá o funcionamento neste instante e assim permanecerá até 1,3 segundos, quando ela voltará ao seu estado de funcionamento normal. Essa simulação mostrará o que ocorrerá com o RECET caso exista uma falha momentânea e não uma falha permanente como foi mostrada na primeira simulação.

Os resultados da dinâmica de compensação da tensão entregue a carga pode ser vista na figura 5.11.

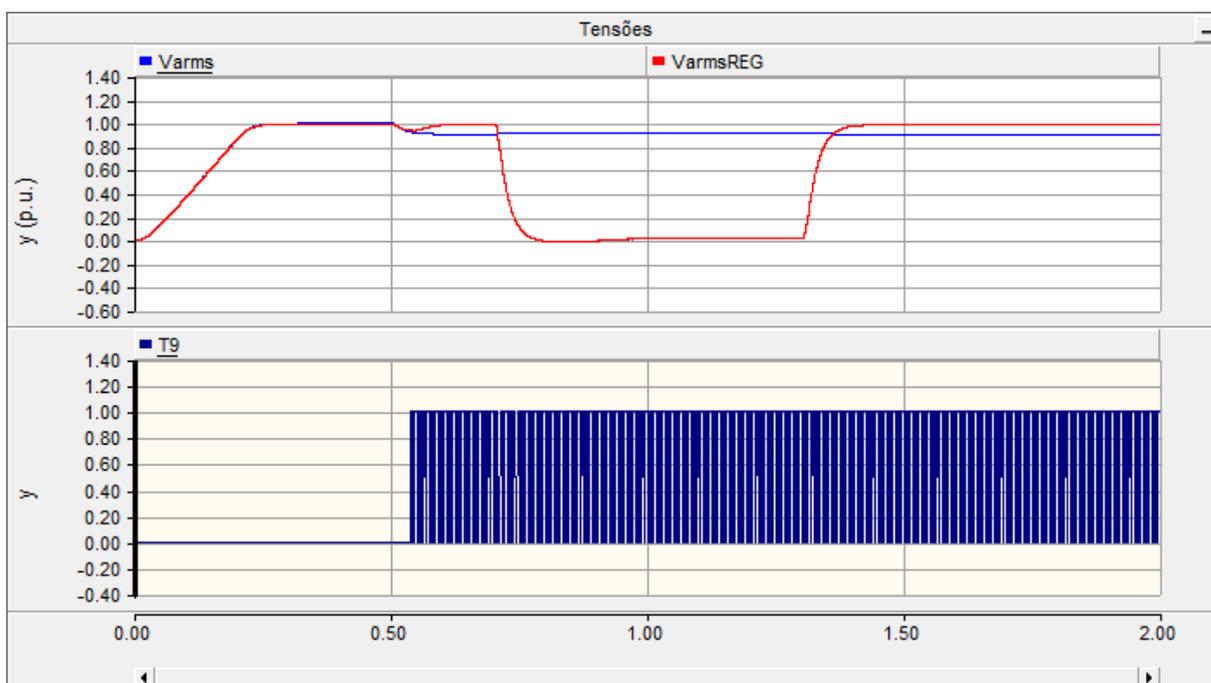


Figura 5.11: Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T9 aberto.

A figura superior mostra a tensão de entrada da fonte em azul e a tensão regulada para a carga em vermelho. Já a figura inferior, mostra os pulsos enviados a chave T9.

Através dos resultados obtidos, podemos observar que o RECET se comporta de maneira correta. Até 0,5 segundo, quando a tensão está em 7,967kV (1p.u), o RECET funciona compensando normalmente, pois além da chave ainda não ter sido aberta, para uma tensão de 7,967kV (1p.u) a chave T9 não é utilizada para compensação da tensão na carga.

Em 0,5 segundo, quando a tensão sofre um afundamento e vai para aproximadamente 7,269kV, a lógica do RECET passa a utilizar as chaves T3, T5, T9 e T11 para compensar a tensão na carga. Tudo funciona perfeitamente, pois a chave T9 ainda não sofreu a falha.

Porém, em 0,7 segundos a chave T9 é aberta e a tensão vai a aproximadamente zero. E como a tensão na fonte não sofrerá mais alterações, ou seja, permanecerá em 7,269kV até o fim, a tensão na carga permanecerá aproximadamente zero até que a chave volte ao seu funcionamento normal em 1,3 segundos e o RECET consiga compensar a variação da fonte e entregar a carga uma tensão de 1p.u.

A queda da tensão entregue a carga em 0,7 segundo e o retorno ao valor de 1p.u da mesma em 1,3 segundo, quando a chave T9 volta ao estado de funcionamento normal, podem ser observadas na figura 5.12 abaixo. Além disso, também é mostrado o comportamento da tensão de entrada da fonte.

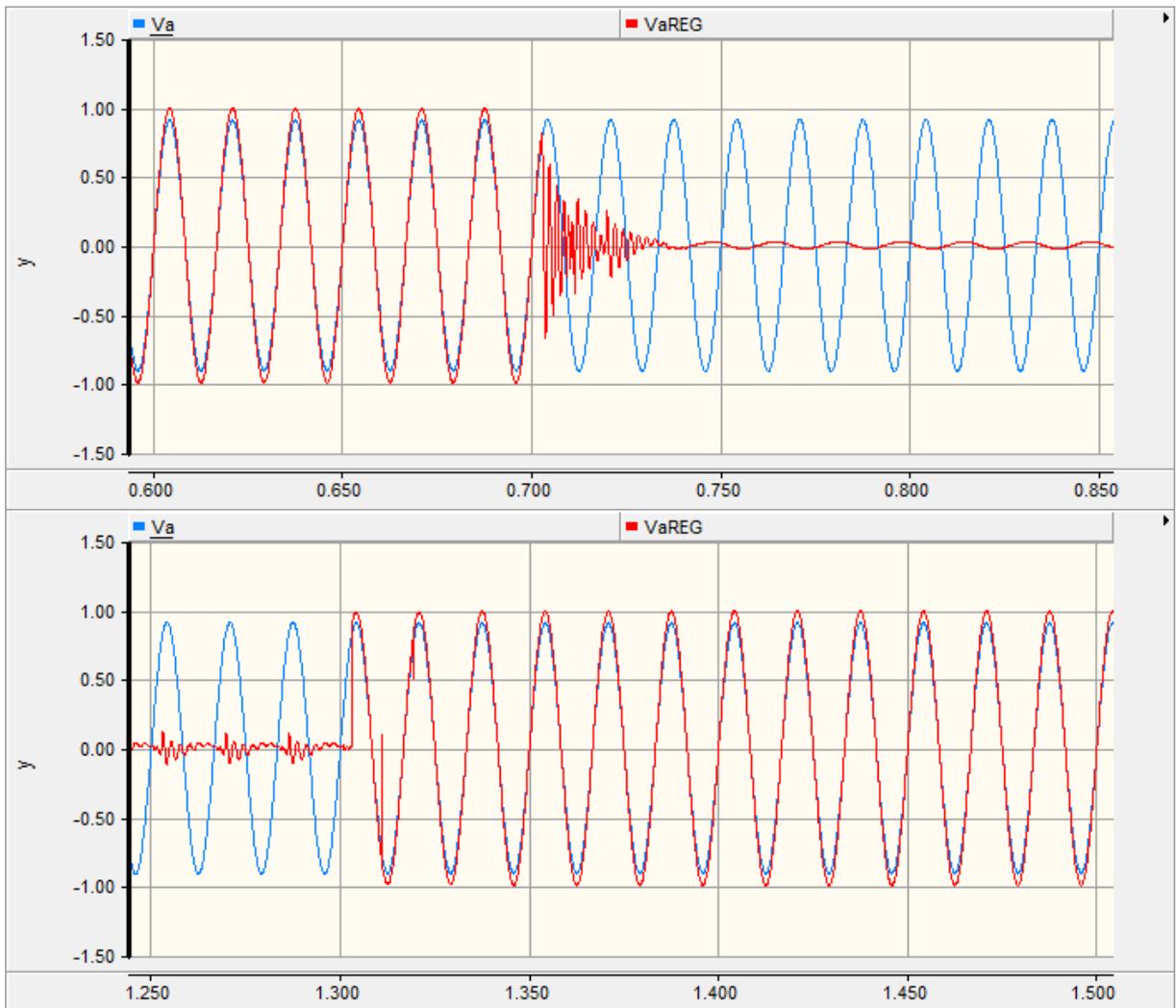


Figura 5.12: Tensão na fonte e na carga para T9 aberto em 0,7 e 1,3 segundo.

A corrente entregue a carga pode ser vista na figura 5.13 abaixo.

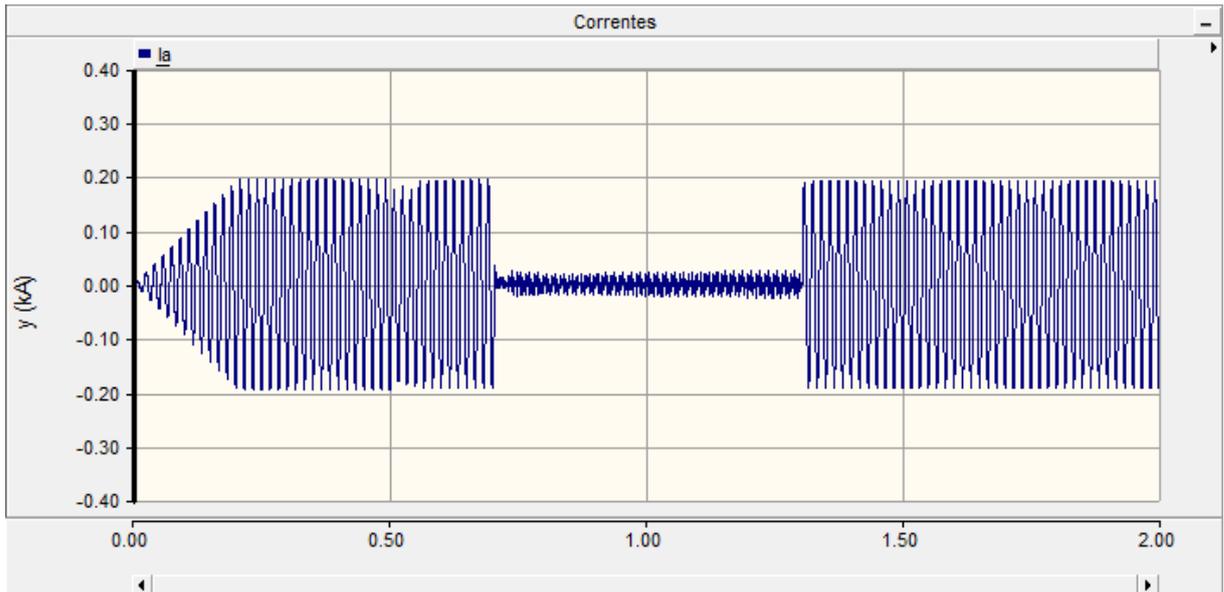


Figura 5.13: Corrente entregue a carga para T9 aberto.

A figura 5.13 mostra que a corrente vai praticamente a zero quando se precisa da chave T9 para compensar e a mesma se encontra aberta.

Na figura 5.14 é mostrado um zoom para se entender melhor o resultado da corrente encontrada.

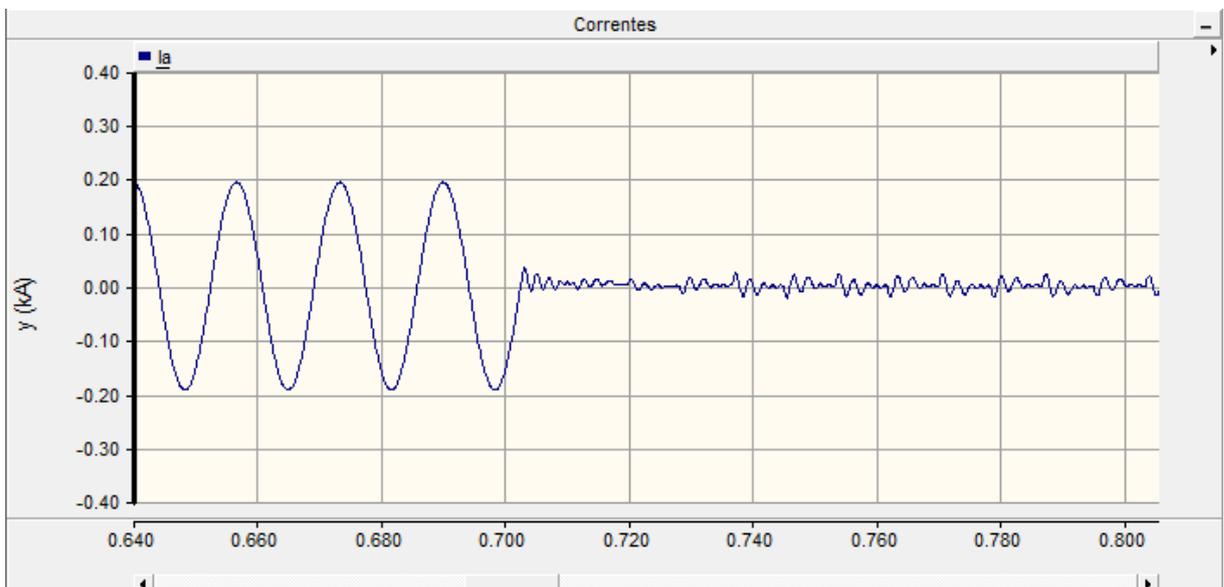


Figura 5.14: Zoom na corrente entregue a carga com T9 aberto.

Pode-se observar que acontece novamente o que aconteceu na primeira simulação, a corrente possui um alto teor harmônico no instante de tempo entre 0,7

e 1,3 segundo, quando a chave T9 está aberta. Isso se dá novamente pelo motivo da corrente encontrar caminho pelo snubber, conforme foi explicado com mais detalhe no item anterior.

O fluxo nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” pode ser visto na figura 5.15.

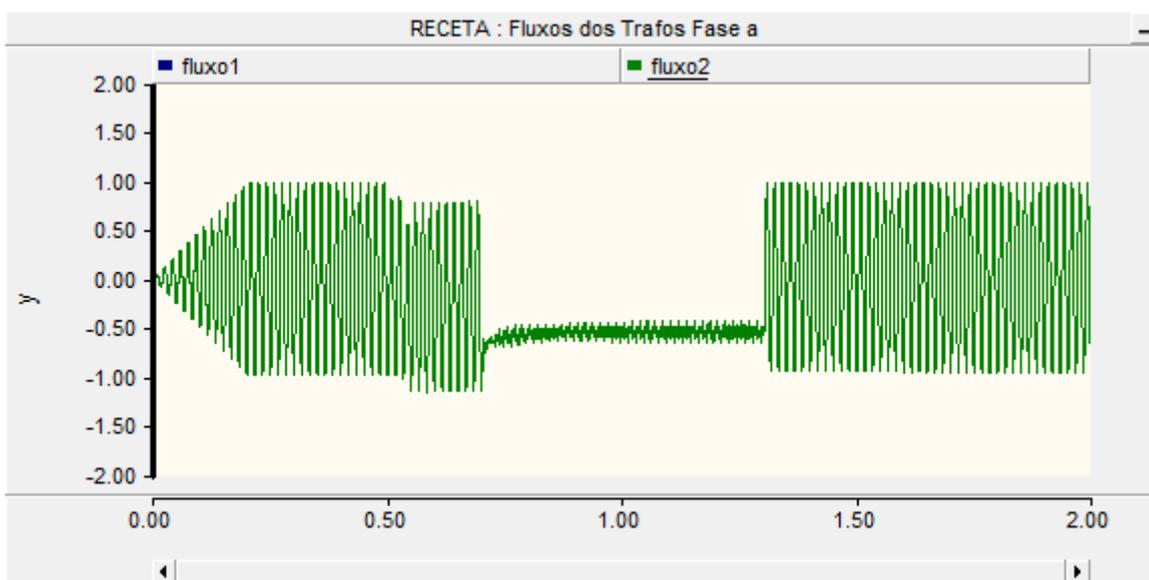


Figura 5.15: Dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” para T9 aberta.

A dinâmica do fluxo está coerente, em 0,5 segundo a tensão na fonte sofre um afundamento e perturba ligeiramente o fluxo. Em 0,7 segundo, quando a chave T9 se abre, a tensão vai a praticamente zero e o fluxo também. Já quando a chave T9 volta ao seu funcionamento normal, e a corrente encontra caminho pelas chaves, o fluxo se restabelece e a tensão na carga é compensada.

Na figura 5.16, mostra-se um zoom feito no fluxo entre 1,2 e 1,4 segundos para mostrar que o fluxo nos dois transformadores é exatamente o mesmo e comprovar o teor harmônico.

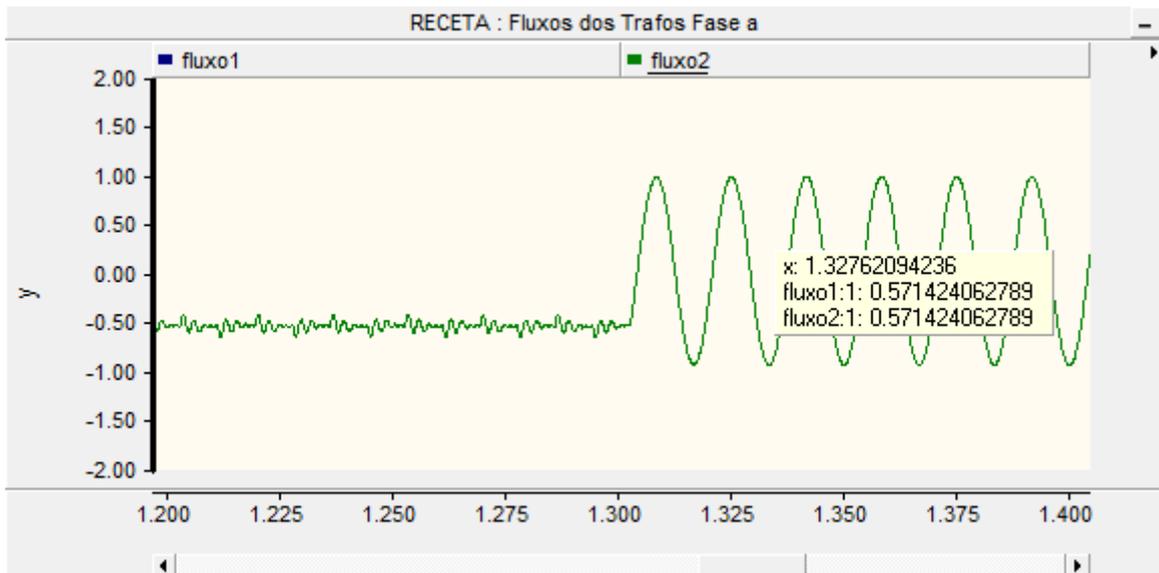


Figura 5.16: Zoom na dinâmica dos fluxos nos transformadores do “Modelo Três Enrolamentos” entre 1,2 e 1,4 segundo.

Através da figura, observa-se que o fluxo também possui o teor harmônico devido ao motivo explicado no item anterior.

5.3 Terceira Simulação de Falha nas Chaves

A terceira simulação de falha foi feita com o objetivo de mostrar o comportamento do RECET diante a imposição de um curto-circuito no par de tiristores T4.

Dizer que o tiristor será curtado é simular como se o mesmo estivesse sendo colocado no modo de condução de maneira forçada, ou seja, como se estivesse sido colocado em funcionamento por determinado instante de tempo, sem que a lógica de controle necessitasse do mesmo para compensar a tensão na carga.

A simulação será a seguinte: o RECET entrará em funcionamento e com sua tensão da fonte em 7,967kV, ou seja, em 1p.u até 0,5 segundo. Nesse instante a tensão da fonte sofrerá uma elevação e irá para aproximadamente 8,365kV, e ficará assim até o final da simulação.

Paralelo a isto, o par de tiristores T4 sofrerá um curto-circuito em 1,0 segundo, ou seja, será colocado em funcionamento neste instante e assim

permanecerá até 1,3 segundos. Assim, o funcionamento normal do RECET será comprometido.

O resultado da dinâmica de compensação da tensão entregue a carga pode ser visto na figura 5.17.

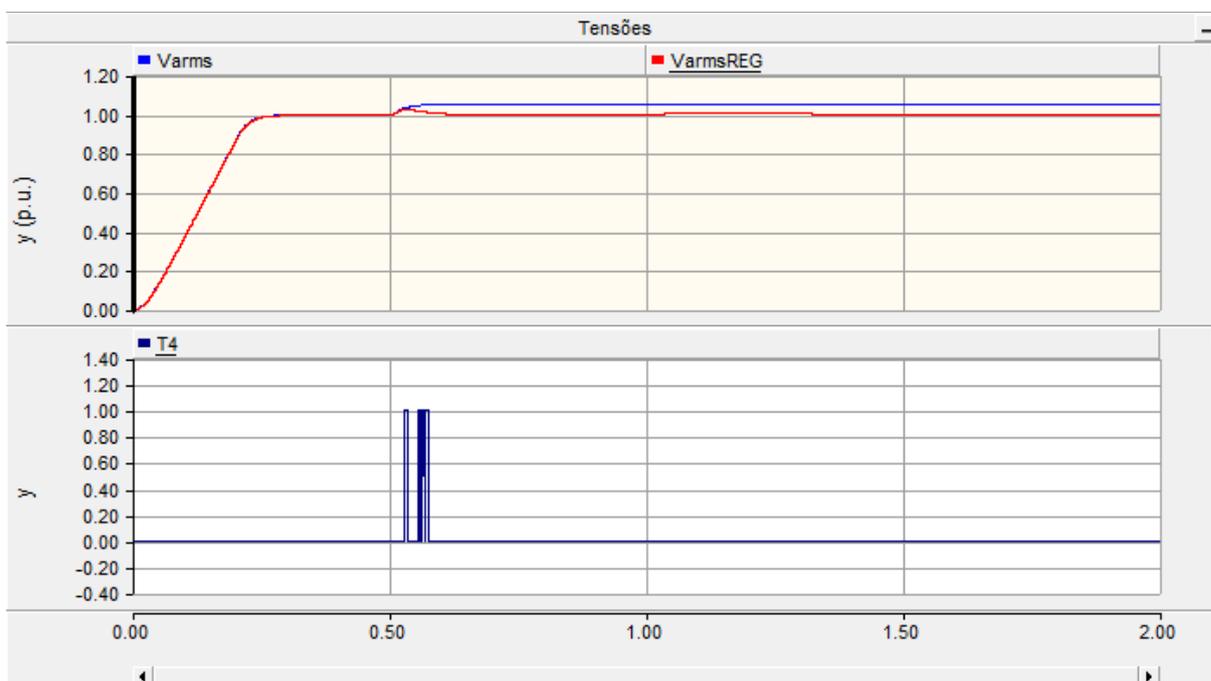


Figura 5.17: Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T4 em curto.

A figura 5.17 mostra a tensão de entrada da fonte em azul e a tensão regulada para a carga em vermelho. Já a figura inferior, mostra os pulsos enviados a chave T4, ou seja, mostra quando a lógica de compensação do RECET precisa ou não da chave T4 para compensar a tensão na carga.

Com os resultados obtidos acima, podemos observar que o RECET se comporta de maneira correta. Antes de a falha ocorrer, o RECET compensa a tensão na carga para 1p.u. Porém, em 1,0 segundo, quando o par de tiristores T4 sofre o curto, a tensão entregue a carga se eleva e passa a não ser mais 1p.u até o par de tiristores voltar ao funcionamento normal em 1,3 segundos.

Isso ocorre porque com o par de tiristores T4 em curto, a corrente encontra outro caminho para percorrer. Ao invés de percorrer as bobinas corretamente de forma a somar 8s para compensar a variação imposta na fonte, ela acaba

encontrando menos que 8s no novo caminho. E como consequência, não existe steps suficientes para compensar a tensão para 1p.u.

Quando o par de tiristores T4 não está mais em curto, a corrente se restabelece no caminho correto e a compensação passa a existir por completo até o final.

Pode-se observar na figura 5.17, que a compensação existe enquanto o tiristor T4 está em curto, mas não se apresenta suficiente. Não existem steps suficientes para fazer a tensão na carga chegar a 1p.u, ficando a mesma um pouco acima de 1p.u.

Para que a tensão seja compensada, em qualquer ocasião, são chaveados quatro pares diferentes de tiristores. Quando se coloca um par de tiristores em curto, e o mesmo não faz parte da lógica para compensar tal variação da tensão, como foi o caso apresentado, ficam cinco tiristores em modo de condução. Caso seja colocado em curto um par de tiristores que componha a lógica de compensação, a mesma irá fluir de forma correta, nada anormal irá acontecer, pois o tiristor estar em curto significa o mesmo que se estivesse conduzindo.

A não necessidade do par de tiristores T4 para compensar a elevação da tensão pode ser visto na figura 5.17, depois que a tensão se estabelece em 8,365kV, nenhum pulso é enviado a T4.

Para uma elevação para 8,365kV, a lógica coloca em condução os pares T1, T6, T7 e T9. E como o par de tiristores T4 não faz parte da compensação, mas com a falha o mesmo passa a conduzir, correntes altíssimas de curto passam a circular nos enrolamentos dos transformadores que estão conectados diretamente no par de tiristores em curto. Isto pode ser observado com clareza na figura 5.18.

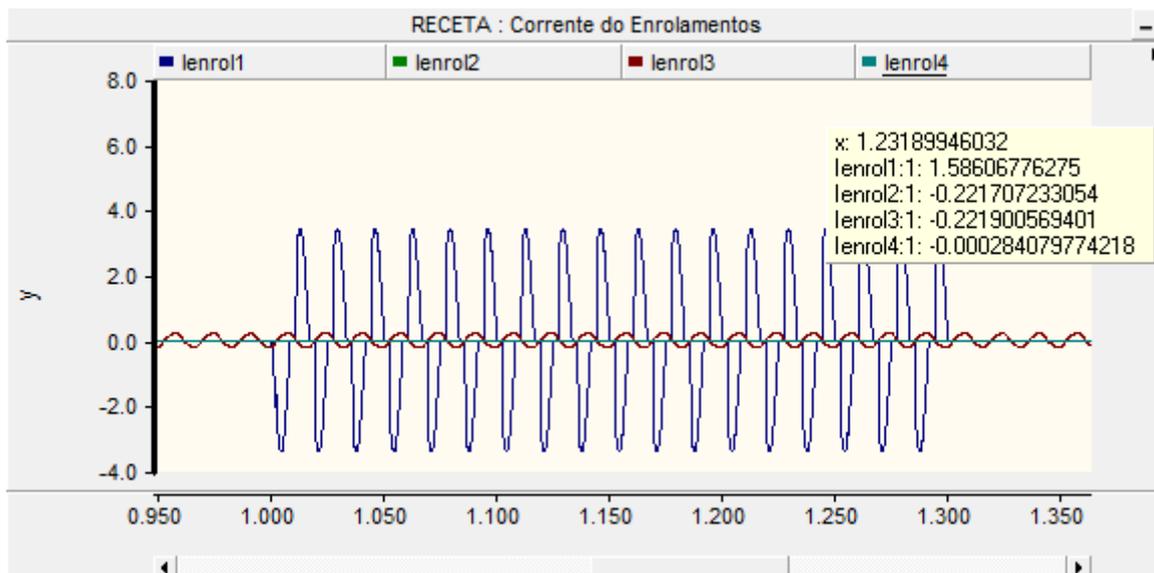


Figura 5.18: Corrente nos enrolamentos dos transformadores.

A figura 5.18 mostra que antes de ocorrer o curto, todas as correntes estão em seus valores nominais, quando existe a necessidade da utilização do enrolamento, ou estão próximas de zero quando não há a necessidade da presença do enrolamento na compensação.

Porém, quando ocorre o curto no par de tiristores T4, a corrente no enrolamento 1 sofre uma elevação de mais de 10 vezes o valor nominal, e assim permanece até que o curto se acabe, e T4 volte ao funcionamento normal.

Esse resultado foi importante para se ter noção da corrente que passa nos enrolamentos quando existem mais que quatro pares de tiristores conduzindo. Isso valida a teoria do RECET apresentada no Capítulo 3. E para a construção em escala real do regulador, deve-se ter atenção com esta corrente, caso alguma chave seja cortada.

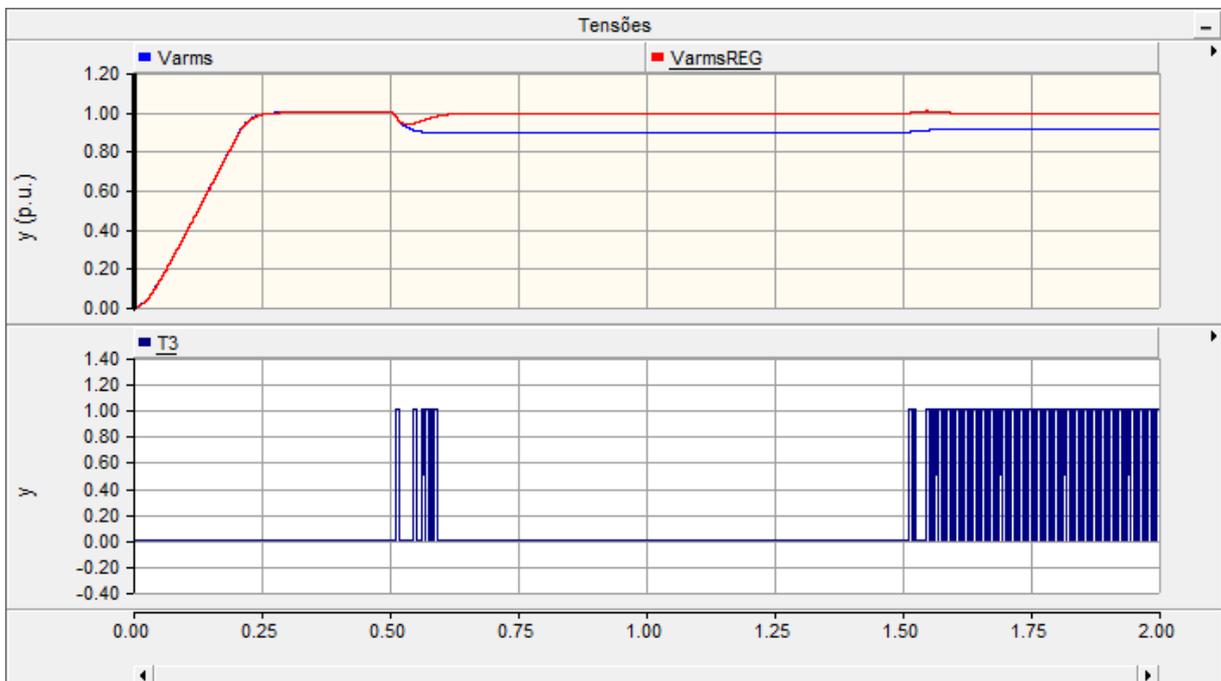
5.4 Quarta Simulação de Falha nas Chaves

A quarta e última simulação de falha nos tiristores foi feita com o objetivo de mostrar o comportamento do RECET diante a imposição de um curto-circuito no par de tiristores T3.

A simulação será a seguinte: o RECET entrará em funcionamento e com sua tensão da fonte em 7,967kV, ou seja, em 1p.u até 0,5 segundo. Nesse instante, a tensão sofrerá um afundamento e irá para aproximadamente 7,120kV, e ficará assim até 1,5 segundos. A partir desse instante, a tensão da fonte sofrerá uma pequena elevação e irá para 7,269kV.

Paralelo a isto, o par de tiristores T3 sofrerá um curto-circuito em 1,0 segundo, ou seja, será colocado em funcionamento neste instante e assim permanecerá até o final da simulação.

O resultado da dinâmica de compensação da tensão entregue a carga pode ser vista na figura 5.19.

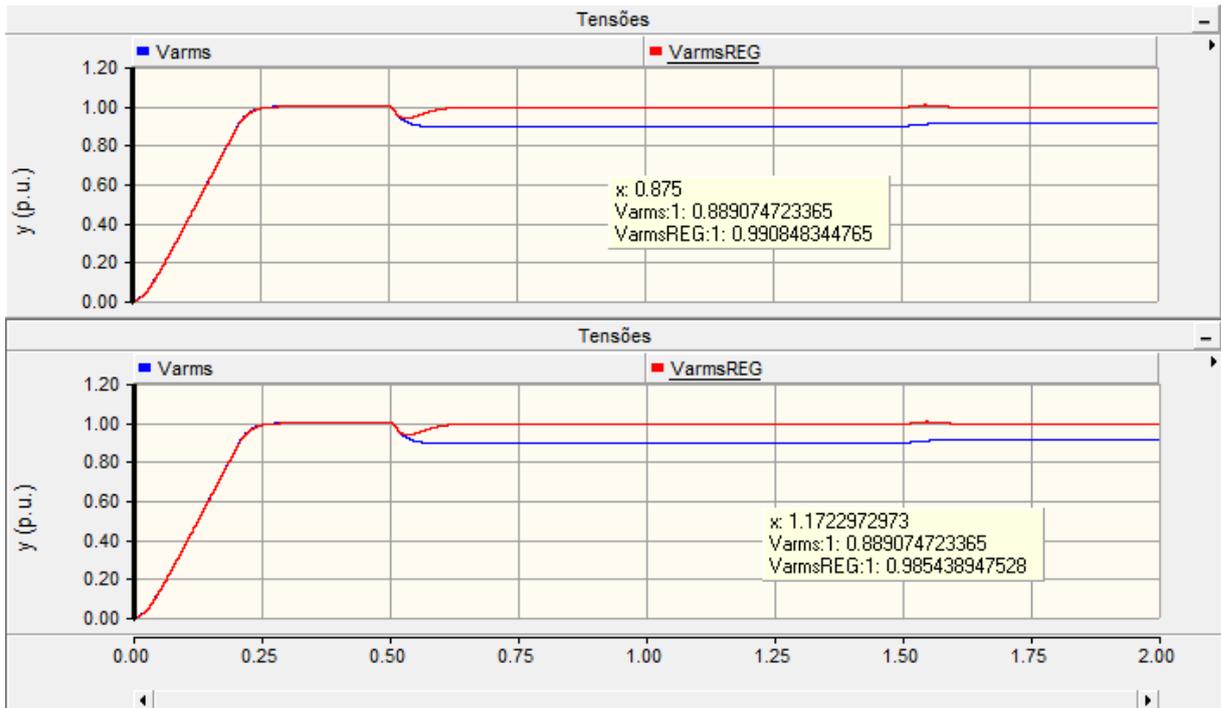


. Figura 5.19: Dinâmica de compensação da tensão com o par de tiristores T3 em curto.

A figura superior mostra a tensão de entrada da fonte em azul e a tensão regulada para a carga em vermelho. Já a figura inferior, mostra os pulsos enviados a chave T3, ou seja, mostra quando a lógica de compensação do RECET precisa ou não da chave T3 para compensar a tensão na carga.

Com os resultados obtidos acima, podemos observar que o RECET se comporta de maneira interessante. Antes de ocorrer a falha, o RECET compensa a tensão na carga para 1p.u. Porém, em 1,0 segundo, quando o par de tiristores T3

sofre o curto e a tensão da fonte está sofrendo um afundamento, ocorre um problema. O valor da tensão regulada para a carga parece o mesmo, antes de 1,0 segundo e após 1,0 segundo, mas não é. Essa afirmação pode ser confirmada na figura 5.20 abaixo.



. Figura 5.20: Comparação das tensões reguladas antes e após a falha de T3.

Como pode ser visto na figura 5.20, as tensões reguladas para a carga antes e depois de 1,0 segundo, que é o instante que ocorre a falha, são diferentes. Isso se dá porque a lógica de compensação do RECET chaveia os pares de tiristores T1,T2,T8 e T11 para compensar o afundamento para 7,120kV. Esses pares de tiristores acionados introduzem uma compensação negativa de 17 steps. Regulando então, a tensão para um valor muito próximo de 1p.u.

Porém, após 1,0 segundo, com o par de tiristores T3 em curto, a corrente passa a percorrer um caminho que introduz 16 steps negativos para regular a tensão da carga. Com isso, a tensão fica mais longe de 1p.u. Resumindo, o curto em T3 força um caminho para a corrente, e esse caminho percorre apenas 16 steps dos enrolamentos, não sendo o suficiente para compensar a tensão na carga para 1p.u.

A partir de 1,5 segundos, a tensão sofre uma pequena elevação e vai para aproximadamente 7,269kV. No transiente, até a tensão estabilizar neste valor, a

tensão na carga sofre uma variação. Isso acontece porque a chave T3 está em curto, e para alguns valores de tensão do transiente, a chave T3 não se faz necessária, fazendo com que a tensão seja compensada erradamente.

Mas quando a tensão da fonte se estabiliza em 7,269kV, a regulação ocorre perfeitamente, pois mesmo que T3 esteja em curto, a compensação para este valor de tensão exige além de T5, T9 e T11, a chave T3. Logo, ela estaria conduzindo de qualquer maneira. Por este motivo, não interfere na dinâmica de compensação, ratificando assim, o que foi dito a respeito na simulação do terceiro caso.

Mais uma vez, será mostrado na figura 5.21, a questão dos altos valores de corrente que circulam nos enrolamentos quando uma quinta chave é colocada em condução.

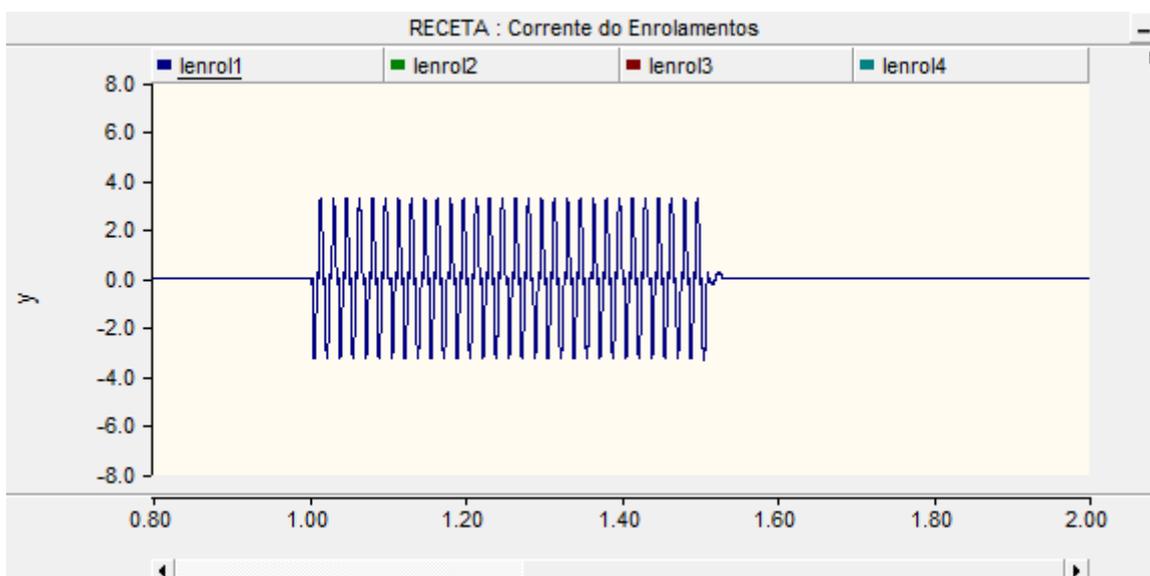


Figura 5.21: Corrente no primeiro enrolamento do transformador.

Quando o par de tiristores T3 sofre o curto, após 1,0 segundo, a corrente no primeiro enrolamento assume um valor muito alto. Isso acontece porque, para o valor de tensão na fonte que estava entre 0,5 e 1,5 segundos, a chave T3 não era necessária para compensar a tensão na carga. Logo, foi incluído um quinto par de chaves quando a mesma entrou em curto, fazendo com que a corrente no enrolamento que está conectada diretamente ao par de chaves em curto assumisse valores muito altos.

E quando a lógica exige a presença da chave curtada para compensar, não faz diferença a mesma estar em curto ou não, a corrente nos enrolamentos continuam baixas, pois a lógica precisaria da chave conduzindo de uma maneira ou de outra.

5.5 Simulação de Falha na Linha de Distribuição

A partir de agora, será analisado o comportamento do RECET diante falhas nas linhas de distribuição. Essas falhas serão antes e depois do regulador. Para esses dois casos, será analisado curto-circuito monofásico.

Vale ressaltar que não serão inseridas falhas dos tipos mostradas anteriormente, ou seja, o RECET não estará trabalhando com falhas nos tiristores que compõem o circuito de potência.

5.5.1 Curto-Circuito Fase – Terra Montante ao RECET

Será simulado um curto-circuito monofásico – terra antes do RECET. A intenção com isso é mostrar como se comporta o regulador perante esta situação, que é muito comum nos sistemas de distribuição. Como por exemplo, pode ocorrer o rompimento de um cabo de uma fase, e por consequência disto, o mesmo vir a tocar o solo.

A dinâmica na qual o RECET estará inserido é a seguinte: ele entrará em funcionamento e com sua tensão da fonte em 7,967kV, ou seja, em 1p.u até 1,5 segundos. Nesse instante, a tensão sofrerá um afundamento e irá para aproximadamente 7,269kV, e ficará nesse valor até o final da simulação.

Paralelo a isto, será forçado um curto-circuito monofásico-terra antes do regulador, esse curto será imposto em 0,7 segundo e durará 0,05 segundo.

O tempo de duração do curto-circuito foi escolhido, considerando que os sistemas de proteção atuam em aproximadamente três ciclos, que é mais ou menos, 50ms. Logo, esse tempo foi escolhido para simbolizar o tempo máximo que o RECET trabalharia em curto, já que se o curto passasse além deste tempo de três ciclos, a proteção atuaria e o sistema seria desligado.

Os resultados encontrados da dinâmica de funcionamento do regulador seguem na figura 5.22.

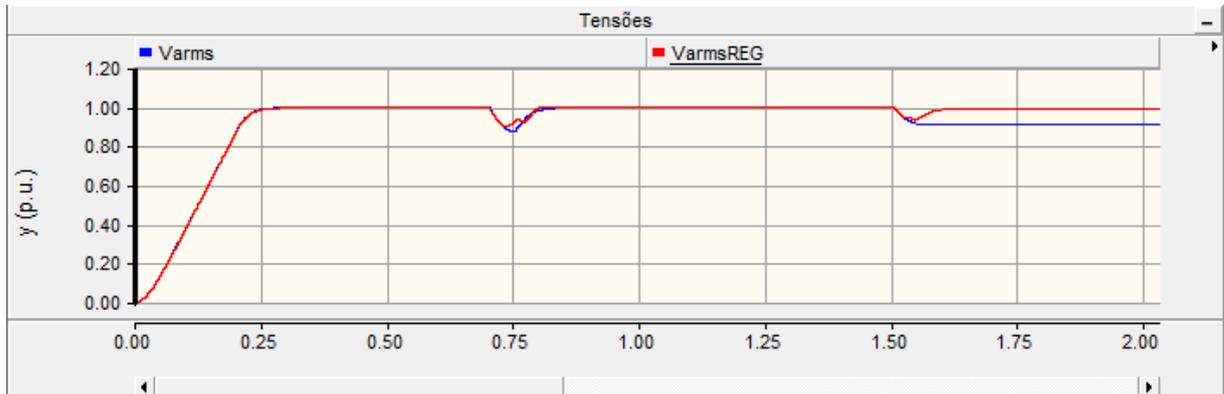


Figura 5.22: Dinâmica de compensação da tensão com curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.

Observa-se que o RECET está funcionando de maneira correta, até que em 0,7 segundo um curto monofásico-terra acontece na linha de distribuição antes do regulador. Durante o curto, a tensão de entrada do regulador diminui, pois a corrente que passa pelo mesmo também diminui, tendo em vista que boa parte da corrente foi drenada para a terra.

Mas em 0,75 segundo, o curto acaba e o RECET volta ao funcionamento normal, tanto é que em 1,5 segundo, ocorre um afundamento da tensão e o mesmo regula com eficiência.

De forma a facilitar a visualização, a figura 5.23 abaixo traz a forma de onda da tensão na fonte e da tensão entregue a carga antes, durante e após o curto.

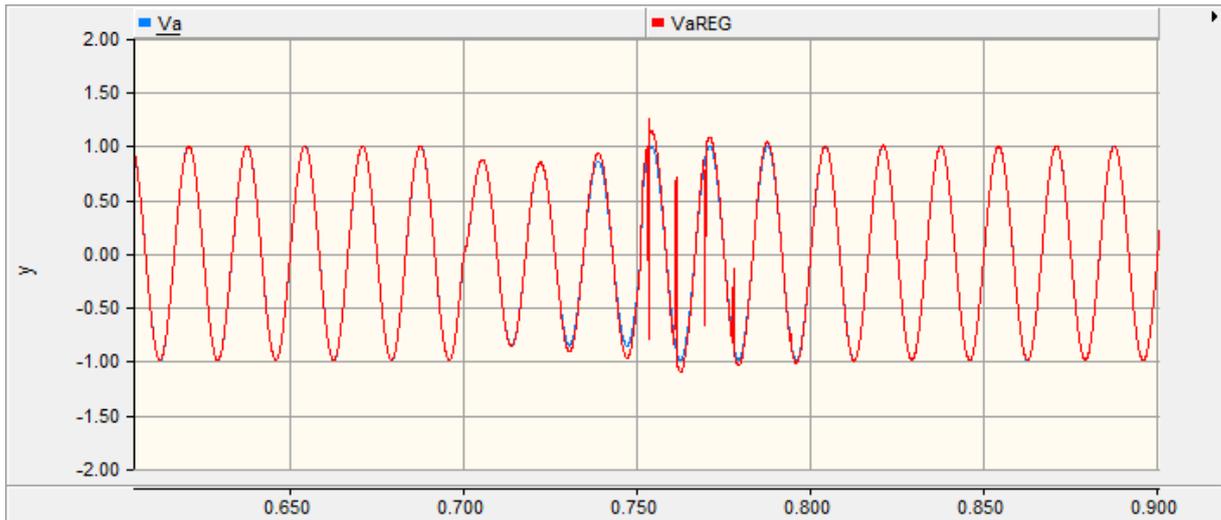


Figura 5.23: Forma de onda da tensão na fonte e na carga durante o curto.

A figura acima mostra com clareza o que foi dito anteriormente, a tensão de entrada e da carga sofre uma queda durante o curto e logo após apresenta imperfeições na forma de onda. Essas imperfeições se devem ao controle do RECET que se perde um pouco com a variação abrupta da corrente, que é um parâmetro de entrada do controle. Mas logo após o controle se encontra novamente e a dinâmica do regulador volta ao seu estado de funcionamento normal. Essa falha no controle será mostrada com mais clareza nas simulações seguintes.

Pode se concluir que o curto-circuito antes do regulador não interfere na dinâmica do mesmo. Pois o alto valor da corrente de curto não percorrerá o RECET, fazendo com que o regulador volte ao seu funcionamento normal logo após o fim do curto-circuito.

Na figura 5.24, pode-se observar o comportamento da corrente entregue a carga.

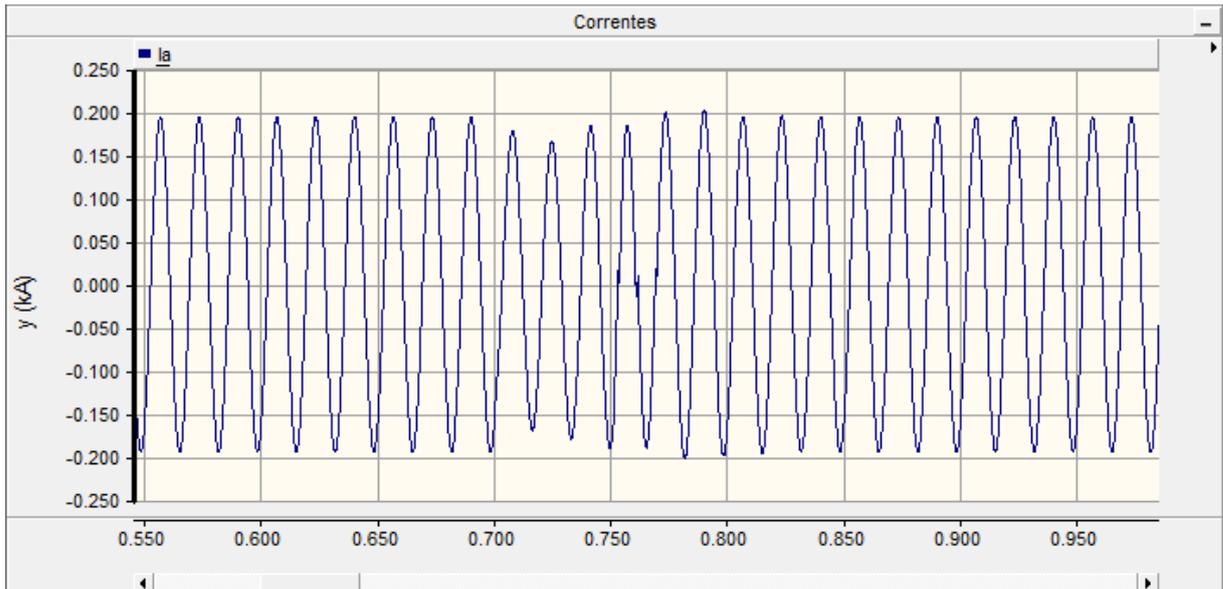


Figura 5.24: Comportamento da corrente entregue a carga com curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.

Na figura 5.24 observa-se que a corrente entregue a carga sofre uma queda durante a ocorrência do curto. Após o curto, a mesma retorna um pouco a mais que o valor nominal, mas logo retorna ao seu valor de regime e assim se mantém até o final. Observa-se também que continua a circular corrente pelo RECET e por conseqüência a carga também recebe esta corrente, isso se dá pois o curto simulado não se trata de um curto-circuito franco, ou seja, a corrente não é totalmente drenada para a terra, fazendo com que uma parte da corrente circule pelo regulador.

Pode-se analisar o comportamento do fluxo nos transformadores através da figura 5.25.

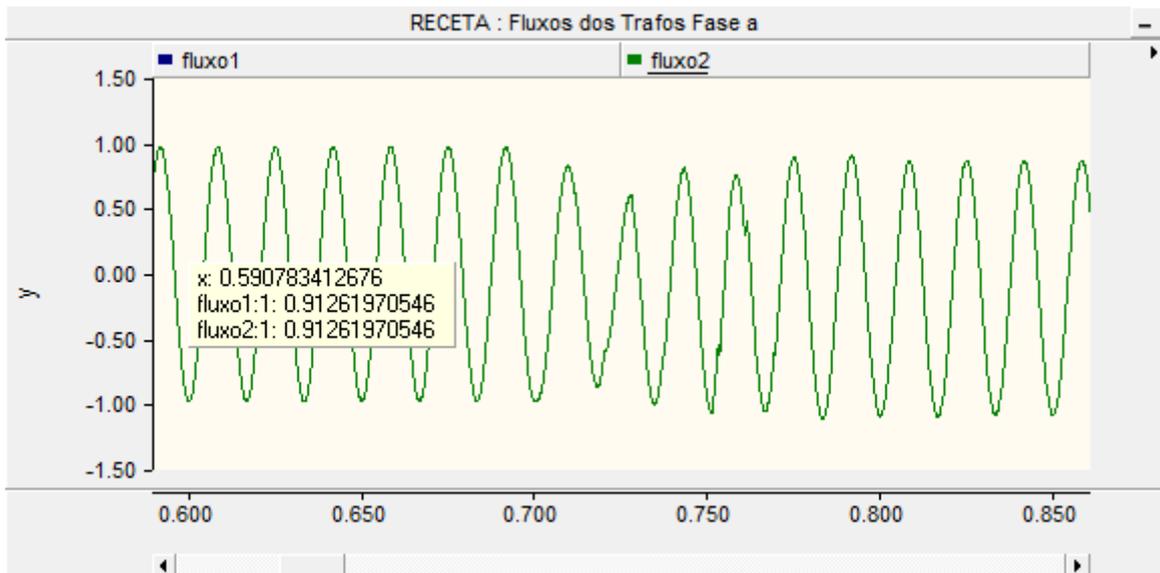


Figura 5.25: Comportamento do fluxo nos transformadores com curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.

A partir da análise da figura 5.25 observa-se que o fluxo estava constante e simétrico até o momento do curto. Com o curto, como a tensão de entrada do regulador diminuiu o fluxo também diminuiu. Após o curto, o fluxo se recupera e volta ao seu valor nominal.

Uma observação importante é que todos os enrolamentos dos transformadores sentem as falhas, até quando a mesma ocorre na linha de distribuição na qual o regulador se encontra, e não no regulador em si. Isso pode ser visto na figura 5.25, por mais que o fluxo sinta variações, os fluxos nos transformadores são idênticos.

A corrente de curto, que circula na linha de distribuição pode ser vista na figura 5.26 abaixo:

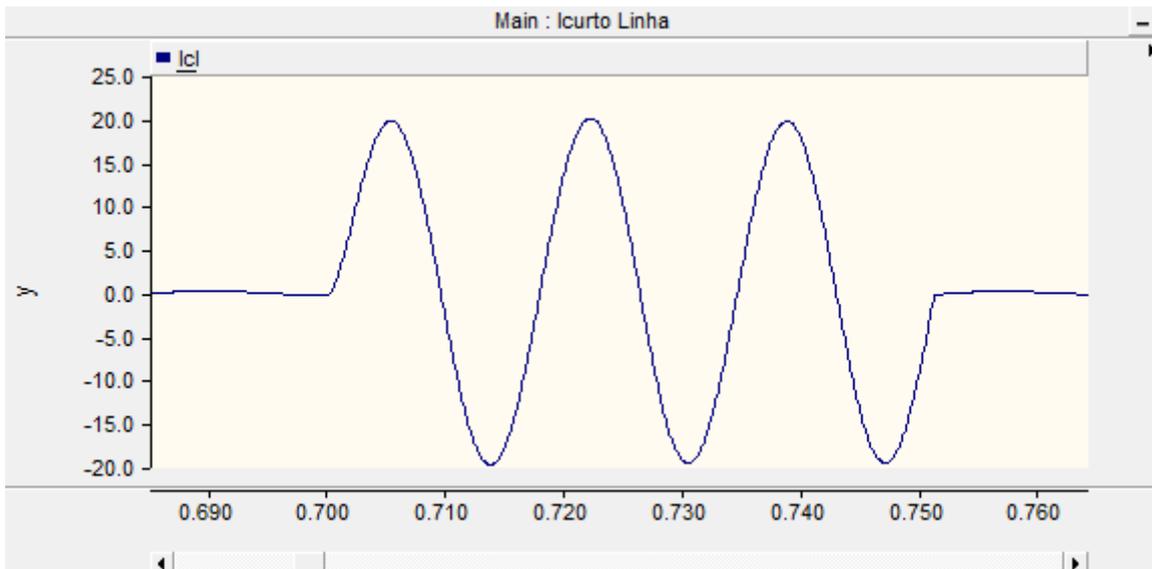


Figura 5.26: Corrente de curto monofásico na linha de distribuição antes do regulador.

Pela figura, pode-se observar que a corrente de curto-circuito chega a um valor maior que 20kA, e permanece neste valor até que o curto se acabe.

Essa corrente é muito alta se compararmos com a corrente nominal que é de 200A, mas mesmo assim, o RECET consegue se manter em funcionamento e retorna ao comportamento normal logo após o fim do curto-circuito. Obviamente, o fato de o curto ter sido antes do regulador, fez com que essa corrente não passasse pelo mesmo, não interferindo no seu funcionamento. Mas o modelo se mostrou com uma dinâmica de recuperação rápida, voltando ao normal logo após o fim do curto-circuito.

5.5.2 Curto-Circuito Fase – Terra Ajustante ao RECET

A partir de agora, serão realizadas simulações de modo a analisar o comportamento do RECET mediante curto-circuito na linha de distribuição após o regulador.

Neste tópico, será simulado um curto-circuito monofásico – terra após o RECET. A intenção com isso é mostrar como se comporta o regulador perante esta situação. Será analisado se os circuitos de potência e de controle serão capazes de suportar correntes de curto elevadas passando por regulador. Pois como agora o

curto é após o regulador, toda a corrente de curto-circuito circulará pelo mesmo, diferentemente do que acontecia nas simulações anteriores.

Para analisar melhor e compreender os resultados, serão feitas duas simulações para o curto-circuito monofásico após o RECET. Na primeira, será simulado um curto-circuito com alto valor de corrente, porém por um tempo curto de duração. A intenção é mostrar se o regulador suporta uma corrente de curto alta sem que a proteção tenha tempo de atuar. A segunda simulação será o inverso, será simulado um curto com uma corrente não tão alta quanto a primeira, mas o tempo de duração do curto será maior. A intenção agora é observar o comportamento do RECET trabalhando bastante tempo com uma corrente de curto alta circulando por ele, porém essa corrente não sendo tão alta a ponto de atuar a proteção.

5.5.2.1 Curto-Circuito Fase – Terra Ajustante ao RECET – Primeiro Caso

A dinâmica na qual o RECET estará inserido é novamente a mesma apresentada para os casos anteriores no qual o curto foi aplicado antes do regulador.

Logo, o RECET entrará em funcionamento com sua tensão da fonte em 7,967kV, ou seja, em 1p.u até 1,5 segundos. Nesse instante, a tensão sofrerá um afundamento e irá para aproximadamente 7,269kV, e ficará nesse valor até o final da simulação.

Paralelo a isto, será forçado um curto-circuito monofásico após o regulador, esse curto será imposto em 0,7 segundo e durará por 0,05 segundo.

Os resultados encontrados da dinâmica de funcionamento do regulador seguem na figura 5.27.

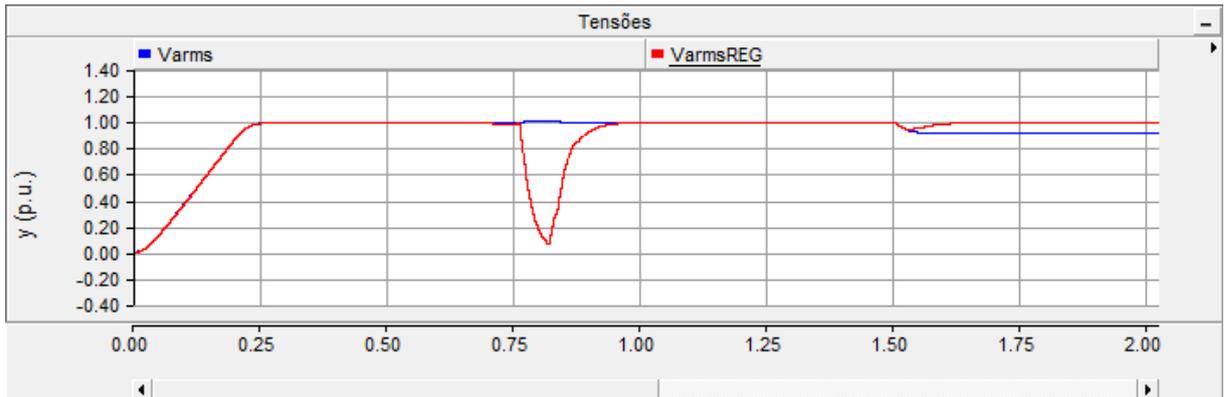


Figura 5.27: Dinâmica de compensação da tensão com curto monofásico na linha de distribuição após o regulador.

Observa-se que o RECET suportou a corrente de curto passando através dele. Após o término do curto, o regulador volta a atuar de forma correta, compensando a variação que ocorre em 1,5 segundo.

A tensão da entrada não sofre queda, pois agora o curto é após o regulador. A tensão regulada para a carga cai bastante após o curto, no instante entre 0,75 e 0,85 segundo, ou seja, o regulador não consegue compensar a variação da fonte.

As formas de onda da tensão da fonte e da carga durante e após o curto podem ser observadas na figura 5.28 abaixo.

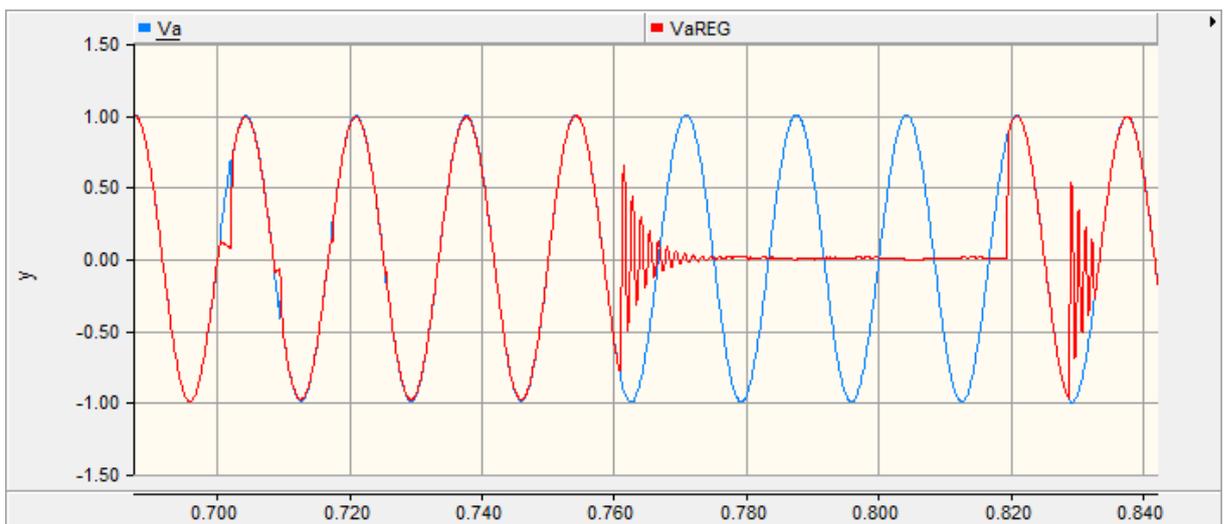


Figura 5.28: Forma de onda da tensão na fonte e na carga durante o curto.

A corrente entregue a carga durante o curto atinge valores muito altos, e logo após vai a zero, como pode ser visto abaixo na figura 5.29.

A variação da corrente imposta pelo curto faz com que o controle do RECET se perca, ou seja, ele não consegue definir quando cada par de tiristores irá chavear, pois o parâmetro que determina quando será enviado o sinal para o tiristor chavear depende da corrente, e como a mesma se altera bruscamente com o início do curto e o fim dele, o controle através da fase não consegue fazer o rastreamento, e com isso não consegue determinar o instante de disparo dos tiristores. Essa falha no controle pode ser observada na figura 5.30.

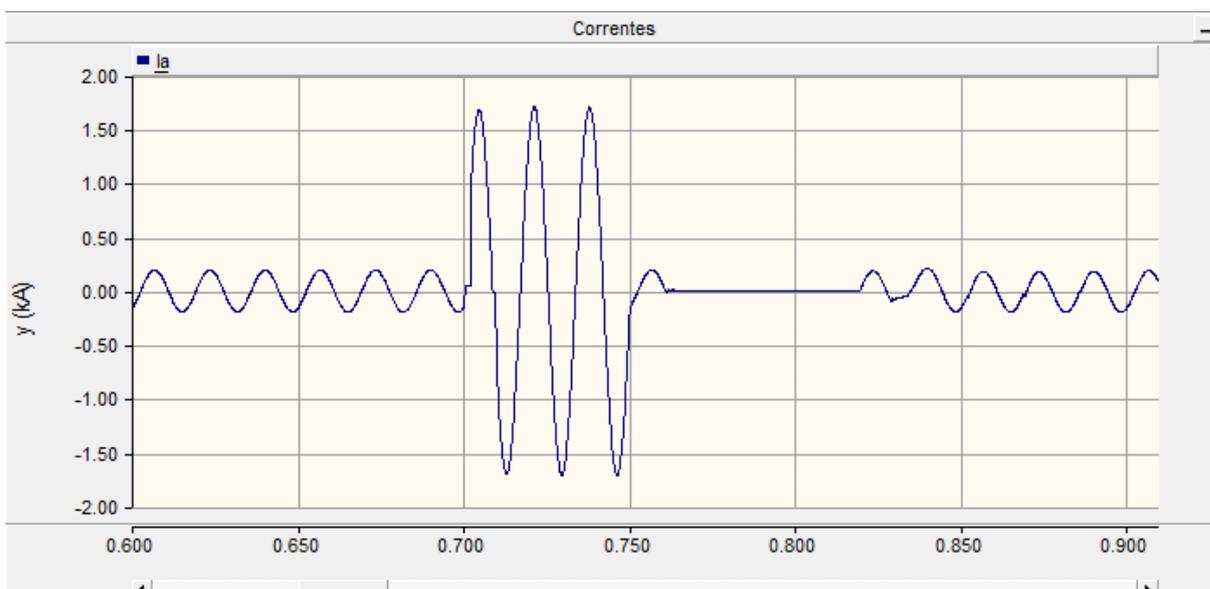


Figura 5.29: Comportamento da corrente entregue a carga com curto monofásico na linha de distribuição após o regulador.

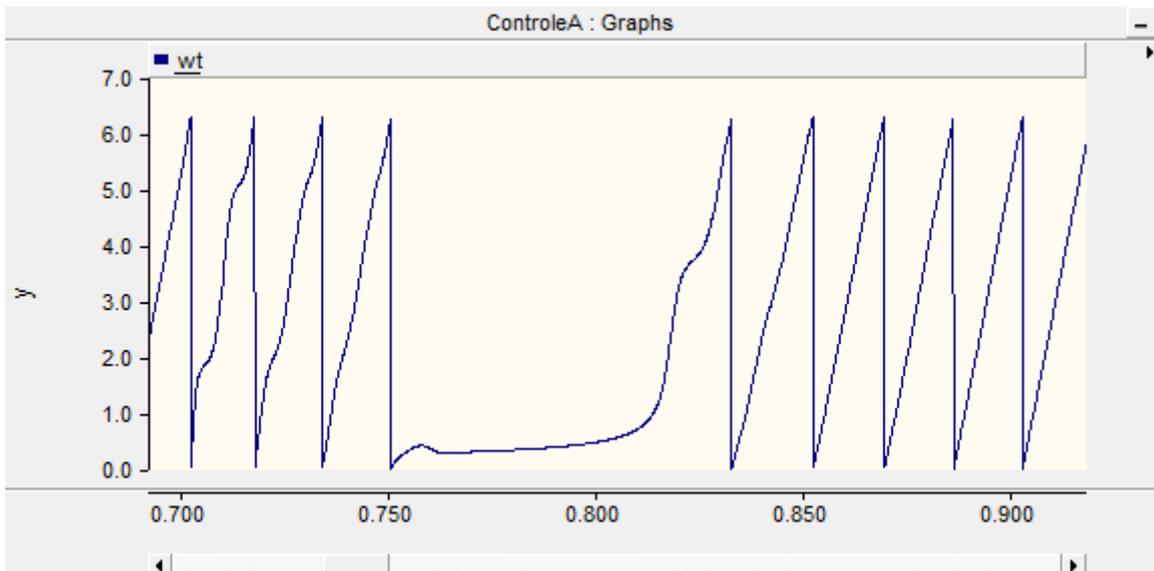


Figura 5.30: Falha no controle para o rastreamento de fase.

Observe que no momento de variação brusca da corrente, o controle se perde, mas logo volta ao seu estado correto, e a partir deste instante, aproximadamente 0,82 segundo, a tensão na carga consegue ser compensada e o regulador volta a funcionar corretamente, como foi observado na figura 5.27.

A corrente de curto que atravessa o regulador pode ser vista na figura 5.31.

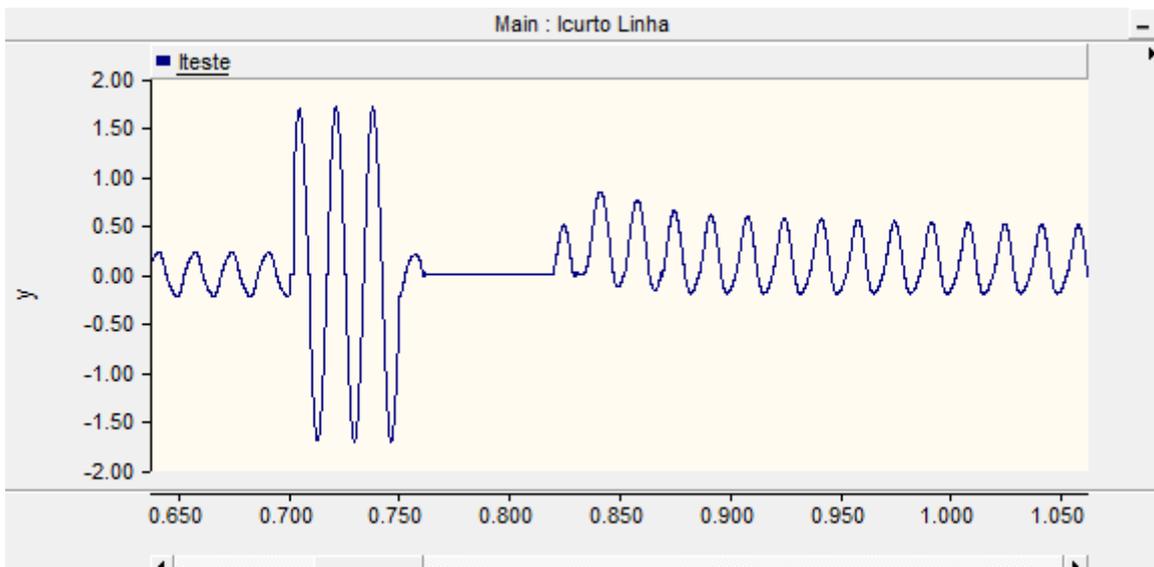


Figura 5.31: Corrente de curto monofásico na linha de distribuição após o regulador.

Logo após o término do curto-circuito a corrente fica em zero por um instante, como pode ser visto na figura 5.26. Isso acontece pelo motivo do controle se perder, como explicado anteriormente, como os pares de tiristores não recebem sinal para entrarem em funcionamento, é como se todos os tiristores estivessem abertos, logo a corrente fica sem caminho e passa a ser zero. Mas quando o controle se normaliza, a corrente que atravessa o regulador e vai para a carga volta ao seu valor nominal e o regulador compensa as variações normalmente.

A corrente de curto atinge um valor aproximadamente de 1,75kA, que corresponde a mais ou menos nove vezes o valor da corrente nominal. Mas mesmo com esse valor muito alto de corrente atravessando o regulador, o mesmo consegue voltar ao seu funcionamento normal algum tempo depois que o curto cessa.

5.5.2.2 Curto-Circuito Fase – Terra Ajustante ao RECET – Segundo Caso

A dinâmica na qual o RECET estará inserido é novamente a mesma apresentada para os casos anteriores no qual o curto foi aplicado antes do regulador.

Logo, o RECET entrará em funcionamento com sua tensão da fonte em 7,967kV, ou seja, em 1p.u até 1,5 segundos. Nesse instante, a tensão sofrerá um afundamento e irá para aproximadamente 7,269kV, e ficará nesse valor até o final da simulação.

Paralelo a isto, será forçado um curto-circuito monofásico após o regulador, esse curto será imposto em 0,7 segundo e durará por 0,4 segundo.

Os resultados encontrados da dinâmica de funcionamento do regulador seguem na figura 5.32.

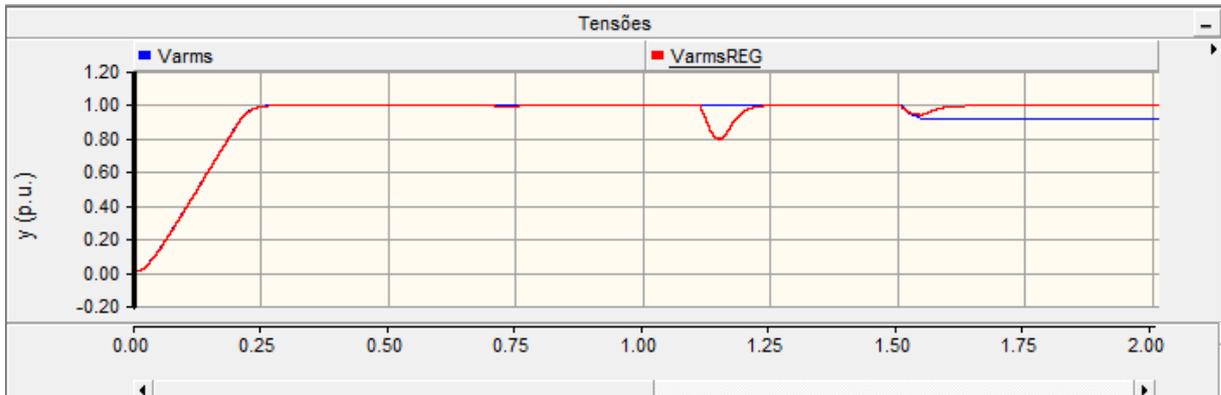


Figura 5.32: Dinâmica de compensação da tensão com curto monofásico de longa duração na linha de distribuição após o regulador.

Novamente o RECET suportou a corrente de curto passando através dele. Após o término do curto, o regulador voltou a atuar de forma correta, compensando a variação que ocorre em 1,5 segundo.

A tensão regulada para a carga cai bastante logo após o término do curto, no instante entre 1,10 e 1,15 segundos, ou seja, o regulador não consegue compensar a variação da fonte. A corrente entregue a carga neste instante de tempo atinge valores muito altos, mas não chega a zero quando o curto cessa, apenas apresenta uma pequena diminuição.

O motivo dela não ir a zero é que o controle desta vez não se perde. A variação da corrente imposta pelo curto não é grande o suficiente para que o rastreamento se perca. Logo, apenas no momento de fim do curto, quando o parâmetro de entrada do controle, que é a corrente, se altera, é que o regulador não consegue compensar. Pois sua referência variou bruscamente, mas não muito quanto ocorreu no caso anterior, ou seja, não foi o suficiente para que o rastreamento se perdesse.

Pode ser observado na figura 5.33 abaixo que a corrente entregue a carga se desestabiliza um pouco devido ao controle, mas logo depois que o controle se encontra novamente o comportamento do RECET volta ao normal.

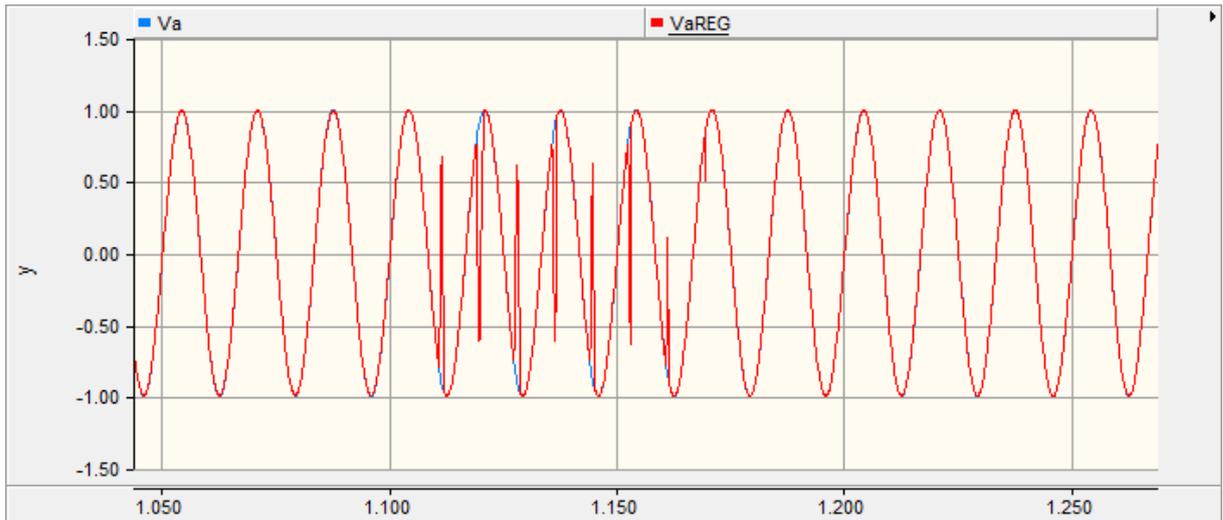


Figura 5.33: Forma de onda da tensão da fonte e da carga durante e após o curto.

Na figura 5.34 pode ser observada essa pequena variação da corrente na carga após o curto, e pode ser observada também a corrente durante o curto, que é entre 0,7 e 1,1 segundos.

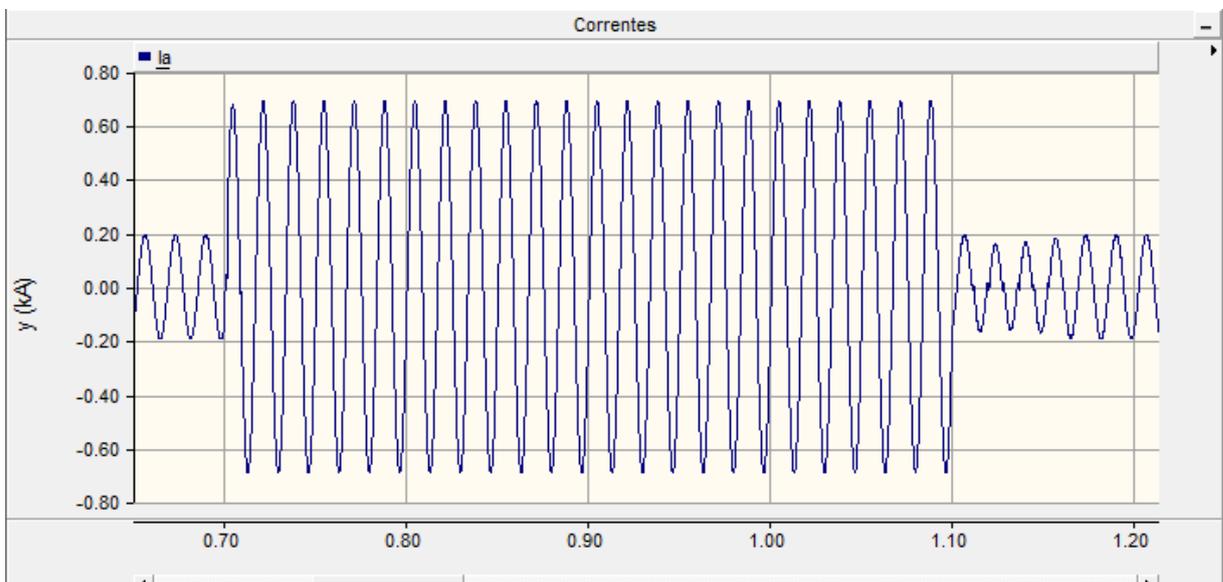


Figura 5.34: Comportamento da corrente entregue a carga com curto monofásico de longa duração na linha de distribuição após o regulador.

O comportamento do controle pode ser observado na figura 5.35, observe que o mesmo não se perde com a variação brusca de corrente, e, por conseguinte, o regulador volta ao seu estado de funcionamento normal logo após o fim do curto.

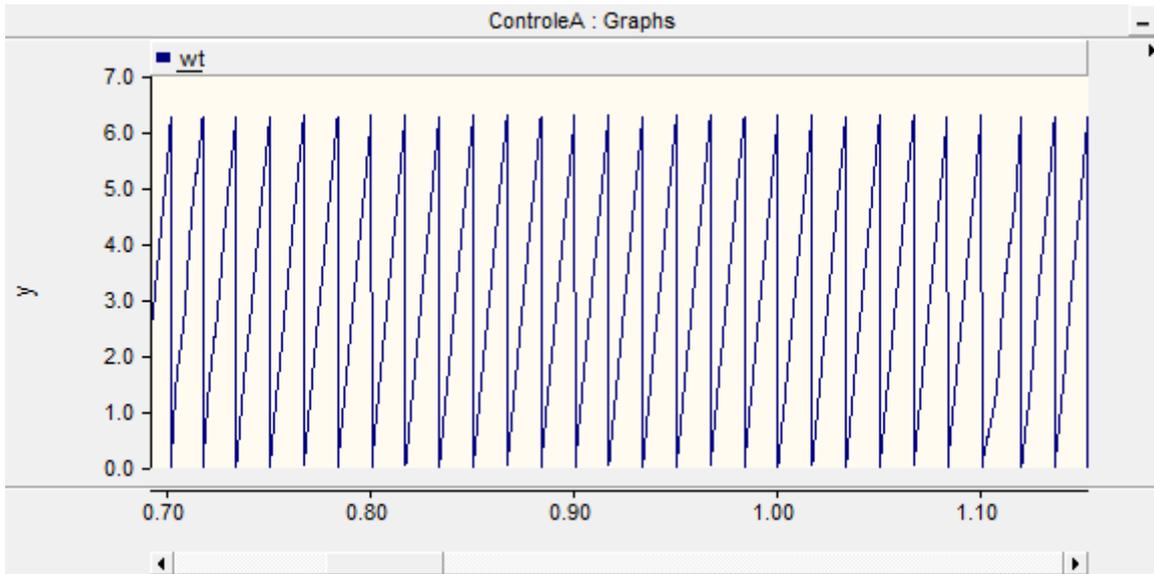


Figura 5.35: Controle de fase para curto monofásico de longa duração na linha de distribuição após o regulador.

Capítulo VI - Conclusão

Este trabalho abortou a comparação de dois modelos propostos para a simulação no ambiente PSCAD/EMTDC[®] do regulador de tensão com comutador eletrônico de taps RECET. A partir dos resultados das simulações e do estudo das características principais de cada modelo, chegou-se em um terceiro modelo que representa melhor as características deste regulador.

Logo após o melhor modelo ser encontrado, foi desenvolvida uma lógica de falhas nos tiristores para que fosse feita simulações deste modelo mediante falhas nessas chaves. O Capítulo 3 mostrou de forma detalhada todas as etapas de criação deste modelo de falhas, e pode-se concluir que o PSCAD/EMTDC[®] é uma excelente ferramenta para simulação. Possibilita, a partir da sua vasta gama de opções, a criação de diversos modelos com características distintas.

No Capítulo 4, como o terceiro modelo de simulação do RECET apresenta na sua configuração o transformador Umec (Unified Magnetic Equivalent Circuit) de três enrolamentos, foi feita uma análise do funcionamento e das características deste modelo de transformador. Foi possível concluir que se trata de um modelo mais completo em comparação aos modelos convencionais de transformadores para simulação. O Umec permite que seja parametrizada as características da geometria do núcleo do transformador e também que seja configurada com mais detalhes a curva de saturação do mesmo. Outra conclusão é que para que se tenha uma simulação eficiente, é preciso parametrizá-lo com muita atenção, pois estes parâmetros determinam diretamente o comportamento do fluxo magnético no núcleo do transformador. Logo, deve-se ter conhecimento das características do transformador junto ao fabricante.

A partir do Capítulo 5, começam as simulações para falha nos tiristores. Os tipos de falha simulados foram de dois tipos: os tiristores em Curto-Circuito ou em Circuito Aberto. A partir dos resultados pôde se conhecer melhor como o RECET se comporta mediante essas situações. Os resultados para esses tipos de simulações foram favoráveis, tendo em vista que o modelo do RECET respondeu de acordo com o que se espera na prática.

Logo após as simulações de falha nos tiristores, foram realizadas simulações de falhas na linha de distribuição na qual o RECET está acoplado. Essas falhas foram representadas por curto-circuito monofásico (fase-terra) antes e depois

do regulador. Pôde-se observar que o comportamento do RECET condissse com a realidade, e ainda apresentou uma lógica de controle que suporta variações abruptas dos parâmetros sem que o mesmo perca sua funcionalidade.

Foi mostrado então, que o modelo atende as especificações do RECET e se comporta de maneira correta mediante falhas. A outra contribuição do trabalho foi mostrar as características do transformador Umec e comprovar que o mesmo é mais eficiente quando se deseja simulação de transientes, ou seja, ele descreve melhor o comportamento do núcleo do transformador mediante essa situação. Abaixo, seguem sugestões que poderiam complementar e enriquecer este trabalho.

6.1 Trabalhos Futuros

Podem-se sugerir as seguintes sugestões para melhoria e aperfeiçoamento deste trabalho:

- Melhoria na lógica de falhas proposta neste trabalho, pois os tipos de falhas em tiristores são muitos, e o modelo proposto neste trabalho simula apenas dois tipos diferentes.
- Melhoria no modelo de tiristor utilizado, de forma a criar um modelo com características mais reais.
- Comparar o comportamento do sistema real com os resultados de comportamento obtidos nas simulações.

Capítulo VII - Referências Bibliográficas e Eletrônicas

- [1] ANEEL, “Resolução n° 505”, novembro de 2001, <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res20011505.pdf>.
- [2] Leszczynski, T.J, “Voltage Regulation Selection in Power Distribution Design,” Textile Industry Technical Conference, IEEE/1998, 1998.
- [3] ITB Equipamentos Elétricos, Manual de Instruções do Regulador de Tensão Monofásico RAV-2 com controlador CTR-2, REV. 12/2009.
- [4] B. Handley, M. Redfern and S. White, “On load tap-changer conditioned based maintenance”, IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib. Vol. 148, No. 4, Julho 2001.
- [5] ABNT, Rio de Janeiro – “NBR11809 – Reguladores de Tensão”, junho/1992.
- [6] L. Huawei, Y. Fan “Headway of transformer models in EMTDC/EMPT,” School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China
- [7] “HELP” PSCAD/EMTDC®, acessado em 14 de dezembro de 2009.
- [8] Neville Watson, Jos Arrillaga, “Power Systems Elettromagnetic Transients Simulation”, The Institution of Engineering and Technology, Londres, 2003.
- [9] Anderson, G. W. J., Arnold, C. P., Watson, N. R. and Arrilaga, J.: ‘A new hybrid ac-dc transient stability program’, Setembro 1995.
- [10] Anderson, G. W. J.: ‘Hybrid simulation of ac-dc power systems’, Nova Zelândia, 1995.
- [11] Arrilaga, J. and Watson, N. R.: ‘Computer modelling of electrical power systems’ (John Wiley, Chichester, 2nd edition, 2001).
- [12] Heffernan, M. D., Turner, K. S. and Arrilaga, J.: ‘Computation of AC-DC system disturbances, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981.
- [13] Reeve, J. and Adapa, R.: ‘A new approach to dynamic analysis of AC networks incorporating detailed modelling of DC systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988.

- [14] Watson, N. R.: 'Frequency-dependent A.C. system equivalents for harmonic studies and transient convertor simulation' Nova Zelândia, 1987.