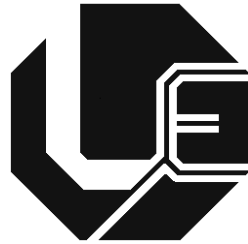


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO
DESEMPENHO DE ESTRATÉGIA PARA O
RELIGAMENTO CONTROLADO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO**

Raquel Cristina Filiagi Gregory

Uberlândia
2016

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

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE
ESTRATÉGIA PARA O RELIGAMENTO CONTROLADO DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação apresentada por Raquel
Cristina Filiagi Gregory à Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) – UFU
Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. – UFU
Milton Itsuo Samesima, Dr. – UFU
Alex Reis, Dr. – UnB

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

G823a
2016 Gregory, Raquel Cristina Filiagi, 1991-
Análise computacional do desempenho de estratégia para o
religamento controlado de linhas de transmissão / Raquel Cristina Filiagi
Gregory. - 2016.
84 f. : il.

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

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Teoria do controle - Teses. 3.
Energia elétrica - Transmissão - Teses. 4. Sobretenção - Teses. I.
Oliveira, José Carlos de, 1947- II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE ESTRATÉGIA PARA O RELIGAMENTO CONTROLADO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Raquel Cristina Filiagi Gregory

Dissertação apresentada por Raquel Cristina Filiagi Gregory à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira
Orientador

Prof. Darizon Alves Andrade
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às minhas irmãs Kássia e Barbara, por todo amor, incentivo e confiança dedicados a mim e à minha querida mãe que sempre está presente em pensamento, fortalecendo as minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, Agradeço aos meus pais, Maria Auxiliadora Paisano Filiagi e Jaime Fernando Gregory, pelo dom da vida, sobretudo à minha mãe, responsável pela minha criação e educação. Obrigada mãe pelo amor, confiança e cuidados prestados à mim durante a sua passagem pela vida. Sou grata às minhas irmãs Kássia Auxiliadora Filiagi Gregory e Barbara Victória Filiagi Assunção pelo amor, carinho, confiança e alegria. Agradeço, também, aos demais familiares que me incentivaram e acreditaram no meu potencial.

Agradeço, especialmente, ao professor orientador, José Carlos de Oliveira, pela presença, atenção e orientação prestada no que diz respeito aos trabalhos elaborados e as discussões do dia-a-dia, as quais auxiliaram na construção de ideias e na formação do pensamento.

Sou grata, substancialmente, aos amigos pelo companheirismo, afeto e convivência que me fortaleceram durante a toda a vida. Obrigada aos companheiros de laboratório que contribuíram para que as horas de trabalho não se tornassem tão cansativas. Agradeço a todos pelo apoio, ajuda e atenção, especialmente à Andréia Crico dos Santos que me auxiliou efetivamente na construção do cerne desta dissertação.

Registro meu agradecimento ao professor Marcelo Lynce Ribeiro Chaves pela sua disposição e contribuição técnica na presente dissertação. Agradeço, também, à Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade ofertada, à Cinara Fagundes pela simpatia e disposição inesgotável no que tange os procedimentos junto à secretaria do programa e a todos os professores da pós-graduação e externos que colaboraram de alguma forma com este trabalho ou me proporcionaram um incremento intelectual.

Por fim, agradeço ao CNPq pelo incentivo financeiro e a Chesf que, em parceria com a UFCG e a UFU, subsidiou o projeto de pesquisa intitulado “Redução de Sobreensões de Manobra em Linhas de Transmissão Utilizando Chaveamento Controlado”, cujo fruto resultou na presente dissertação de mestrado.

*“A intuição, não testada e não comprovada,
é uma garantia insuficiente da verdade”.*

(Bertrand Russell)

RESUMO

A busca por soluções mitigatórias, no que tange aos efeitos das sobretensões transitórias atreladas às manobras de energizações e religamentos das linhas de transmissão, contemplam um tema desafiador e com fortes impactos sobre a coordenação de isolamento dos sistemas elétricos. Muito embora o reconhecimento de propostas clássicas e comerciais para a atenuação destes fenômenos, outras possibilidades, certamente, ainda são meritórias de destaque e investigações. Neste contexto, a presente dissertação encontra-se alicerçada na exposição dos fundamentos físicos e matemáticos de uma estratégia baseada em chaveamentos controlados, cujos instantes para o religamento da linha são pré-programados. A avaliação computacional da eficácia da metodologia é realizada utilizando o simulador ATP, no qual são efetuados estudos em um sistema elétrico típico submetido à curtos-circuitos sucedidos por desligamentos e subsequentes religamentos, sob a ação da tecnologia aqui focada e na ausência da mesma.

Palavras Chave: chaveamento controlado, linhas de transmissão, religamento controlado, sobretensões de manobras, transitórios.

ABSTRACT

The search for mitigation solutions, with respect to the effects of overvoltages linked to the energization and reclosing maneuvers of transmission lines include a challenging subject with strong impact on the insulation coordination of electrical systems. Although the recognition of classical and commercial proposals to mitigate these phenomena, other possibilities are certainly still worthwhile highlighting and investigations. In this context, the present work is grounded in the exposure of the physical and mathematical foundations of a strategy based on controlled switchings, whose moments to the line reclosing are pre-programmed. The computational evaluation of the effectiveness of the methodology is made using the ATP simulator, which are studies in a typical electrical system subjected to the action of short-circuits followed by shutdowns and subsequent reclosing, under the action of technology here focused and lack thereof.

Keywords: controlled switching, transmission lines, controlled reclosing, switching overvoltage, transient.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2 ESTADO DA ARTE	19
1.2.1 Resistores de Pré-Inserção	19
1.2.2 Para-raios	21
1.2.3 Técnicas de Chaveamento Controlado	21
1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO	24
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DA METODOLOGIA DO CHAVEAMENTO CONTROLADO	27
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
2.2 CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES REMANESCENTES NA LINHA DE TRANSMISSÃO	28
2.2.1 Curto-circuito Fase-terra (FT)	31
2.2.2 Curto-circuito Fase-fase-terra (FFT)	35
2.2.3 Curto-circuito Fase-fase (FF)	37
2.2.4 Curto-circuito Trifásico (3F)	38
2.3 LIMITAÇÕES TÉCNICAS DA METODOLOGIA IMPLEMENTADA	39
2.4 ESTRATÉGIA PARA O CHAVEAMENTO CONTROLADO	41

CAPÍTULO III

IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA NO SIMULADOR ATP	46
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
3.2 ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP)	47
3.2.1 ATPDraw para Windows	47
3.2.2 Linguagem MODELS	48
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE NA MODELS	49

CAPÍTULO IV

ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA	59
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO	60
4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA	64
4.3.1 Religamento Sob a Ação de Curtos-circuitos Fase-terra.....	66
4.3.2 Religamento Sob a Ação de Curtos-circuitos Fase-fase-terra	72

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Forma de onda da tensão na ocorrência de manobras em uma das fases de uma linha de transmissão com compensação reativa em derivação.....	30
Figura 2.2 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito fase-terra.....	32
Figura 2.3 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito fase-fase-terra (a) e seu respectivo circuito equivalente (b).....	35
Figuras 2.4 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito fase-fase (a) e seu respectivo circuito equivalente (b).....	37
Figura 2.5 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito trifásico aterrado.....	38
Figura 2.6 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito trifásico não aterrado.....	39
Figura 2.7 – Diagrama esquemático da lógica de controle.....	42
Figura 2.8 – Extrapolação do sinal de tensão referente ao modo 1.....	44
Figura 3.1 – Biblioteca de componentes do ATPDraw.....	48
Figura 3.2 – Diagrama de blocos da lógica de controle implementada em <i>M1</i> (vermelho) e <i>M2</i> (azul).....	50
Figura 3.3 – Definição do tipo de falta a ser inserida na MODELS <i>M1</i> , no ambiente ATPDraw.....	51
Figura 3.4 – Formas de onda das tensões modais (v_0) e $[-(v_1+v_2)]$ e determinação do tempo de duração da falta pelo coeficiente R^2	53
Figura 3.5 – Detecção da passagem por zero de um sinal de tensão modal.....	54
Figuras 3.6 – Estimativa da amplitude e período dos sinais de tensão no domínio modal.....	55
Figura 3.7 – Formas de onda das tensões extrapoladas a montante e jusante do disjuntor.....	57

Figura 3.8 – Diagrama esquemático do sistema elétrico submetido ao chaveamento controlado.....	58
Figura 4.1 – Ampliação da interligação Norte – Nordeste que se encontra em operação.....	60
Figura 4.2 – Mapa eletrogeográfico da região de interesse contendo o plano de expansão.....	61
Figura 4.3 – Diagrama unifilar da configuração implementada.....	62
Figura 4.4 – Implementação da interligação Milagres - S. J. Piauí no ATPDraw...	65
Figura 4.5 – Forma de onda da tensão na fase C da linha de transmissão e determinação do intervalo de duração do curto-circuito pelo coeficiente R^2 – falta fase-terra.....	70
Figura 4.6 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-terra com religamento controlado.....	70
Figura 4.7 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-terra sem religamento controlado.....	71
Figura 4.8 – Forma de onda da tensão nas fases B e C da linha de transmissão e determinação do intervalo de duração do curto-circuito pelo coeficiente R^2 – falta fase-fase-terra.....	75
Figura 4.9 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-fase-terra com religamento controlado.....	75
Figura 4.10 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-fase-terra sem religamento controlado.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comportamento das frequências de oscilação durante e após o término da falta.....	40
Tabela 3.1 – Definição dos códigos para cada tipo de falta.....	51
Tabela 4.1 – Parâmetros elétricos das linhas de transmissão.....	62
Tabela 4.2 – Parâmetros elétricos dos reatores de linha na base de 500 kV.....	63
Tabela 4.3 – Parâmetros elétricos dos reatores de barra.....	63
Tabela 4.4 – Reatância percentual do capacitor série.....	63
Tabela 4.5 – Impedância equivalente de Thévenin (configuração – 2009).....	64
Tabela 4.6 – Número de simulações de faltas fase-terra para cada percentual de desequilíbrio imposto.....	66
Tabela 4.7 – Desempenho do algoritmo de controle no processo de religamento após a extinção de defeitos fase-terra.....	68
Tabela 4.8 – Desempenho do algoritmo de controle em função do local da incidência de curtos-circuitos do tipo fase-terra.....	69
Tabela 4.9 – Número de simulações de faltas fase-fase-terra para cada percentual de desequilíbrio imposto.....	72
Tabela 4.10 – Desempenho do algoritmo de controle no processo de religamento após a extinção de defeitos fase-fase-terra.....	73
Tabela 4.11 – Desempenho do algoritmo de controle no processo de religamento após a extinção de defeitos fase-fase-terra.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

C_0, C_1, C_2	Parâmetros modais referentes às capacitâncias da linha de transmissão para os modos 0,1 e 2, respectivamente.
DJ_1, DJ_2	Disjuntores da linha de transmissão.
f_0, f_1	Frequências de oscilação da tensão residual na linha de transmissão para os modos 0 e 1.
f_{0FT}, f_{1FT}	Frequências de oscilação da tensão residual da linha de transmissão referentes aos modos 0 e 1 sob defeito fase-terra.
f_{FFT}	Frequência de oscilação da tensão residual da linha de transmissão sob defeito fase-fase-terra.
f_{mod}	Frequência no domínio modal definida pela média aritmética dos valores de frequência a cada três passagens por zero.
i_a, i_b, i_c	Correntes no domínio das fases da linha de transmissão.
i_{cc}	Corrente de curto-circuito.
L_0, L_1, L_2	Parâmetros modais referentes às indutâncias do reator de compensação para os modos 0,1 e 2.
M_1, M_2	Ícones da MODELS, nas quais as estratégias de controle foram implementadas.
Q_r	Potência reativa do reator de compensação.
Q_l	Potência reativa capacitiva da linha de transmissão.
R^2	Coefficiente de determinação que quantifica o ajuste de curvas entre zero e um.
R_1, R_2	Reatores de compensação em derivação da linha de transmissão.
SSE	Soma quadrática das diferenças entre os sinais $(v_1 + v_2)$ e $(-v_0)$, tomadas ponto a ponto, em um intervalo de N amostras.
SST	Soma quadrática das diferenças entre as amostras de $(-v_0)$ e o valor médio desse sinal, no intervalo de N amostras.
t', t''	Intervalo de tempo no qual duas amostras consecutivas da tensão modal encontram-se mais próximas ao instante de passagem por zero.

t_0	Instante em que o módulo da tensão no domínio modal passa por zero.
$t_{00}, t_{inicial}$	Instante inicial imediatamente após a detecção do término da falta.
t_{c1}, t_{c2}	Intervalos de cruzamento inapropriado e ideal para o religamento da linha, respectivamente.
$t_{extrapolado}$	Primeiro instante de extrapolação dos sinais de tensão.
t_{zero3}, t_{03}	Terceiro instante de passagem por zero dos sinais no domínio modal, a partir do qual inicia-se o processo de extrapolação dos sinais.
$T_{extrapolação}$	Tempo de estrapolação dos sinais de tensão.
$T_{operação}$	Tempo de operação do disjuntor.
$T_{(n)}$	Período definido entre dois instantes de passagem por zero.
$TipoF$	Variável que define o tipo da falta.
v', v''	Amostras consecutivas da tensão no domínio modal, consideradas imediatamente próximas ao instante de passagem por zero.
v_0, v_1, v_2	Tensões no domínio modal da linha de transmissão referentes aos modos 0, 1 e 2.
v_a, v_b, v_c	Tensões no domínio das fases da linha de transmissão.
v_{mod}	Tensão extrapolada no domínio modal relativa aos modos 0 e 1.
V_0, V_1, V_2	Transformadas de Laplace para as tensões modais v_0, v_1 e v_2 .
$V_{(n)}$	Máximo valor absoluto da tensão entre duas passagens por zero.

LISTA DE ABREVIATURAS

3F	Curto-circuito trifásico.
AT	Curto-circuito fase-terra envolvendo a fase A.
ABT	Curto-circuito fase-fase-terra envolvendo as fases A e B.
ATP	<i>Alternative Transients Program.</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration.</i>
BT	Curto-circuito fase-terra envolvendo a fase B.
Chesf	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
CT	Curto-circuito fase-terra envolvendo a fase C.
EAT	Extra-Alta Tensão.
EMTDC	<i>Electromagnetic Transients Including.</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program.</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
FF	Curto-circuito fase-fase.
FFT	Curto-circuito fase-fase-terra.
FPL	<i>Florida Power & Light.</i>
FT	Curto-circuito fase-terra.
LT	Linha de Transmissão.
PSCAD	<i>Power System Computer Aided Design.</i>
RPI	Resistor de Pré-Inserção.
RTDS™	<i>Real Time Digital Simulator.</i>
SE	Subestação.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
TP	Transformador de Potencial.
UAT	Ultra-Alta Tensão.
ZnO	Óxido de Zinco.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As manobras de disjuntores, visando aos processos de chaveamento de linhas de transmissão, podem provocar diversos efeitos indesejáveis à operação do sistema elétrico. Caso os impactos destes fenômenos excedam valores pré-definidos em projetos e especificações das proteções contra sobretensões, podem ocorrer falhas de isolamento nas linhas de transmissão, transformadores e demais componentes constituintes destes complexos, em virtude da manifestação dos elevados níveis de sobretensões transitórias no sistema [1].

A título de exemplificação, sistemas com tensões nominais entre 500 kV e 800 kV, podem resultar em sobretensões de manobra situados na região de 1,8 p.u. e 1,4 p.u., respectivamente, visando manter o isolamento em níveis similares aos impostos por surtos atmosféricos [2]. Não obstante tais orientações, na ausência de medidas mitigadoras, os surtos de manobras podem provocar sobretensões transitórias da ordem de 4 p.u. [3], fato este determinante para a busca de alternativas para a atenuação destes fenômenos.

No contexto da tecnologia aplicável à problemática em pauta, ressalta-se, inicialmente o emprego dos tradicionais disjuntores com resistores de pré-inserção (RPI). Muito embora esta solução seja tecnicamente eficaz, vale ressaltar que normalmente sua aplicação representa elevados custos, diante da necessidade da implantação de dispositivos complementares aos tradicionais disjuntores, os quais se tornam construtivamente mais complexos e com maiores requisitos de manutenção [4], [5].

Alternativamente, estudos relacionados à inserção de para-raios de óxido de zinco (ZnO) em pontos estratégicos da linha apresentam resultados positivos no tocante a atenuação de transitórios de manobras [6].

Somada às soluções mencionadas, com o avanço da ciência e disponibilização de recursos na forma de hardware e software, as tecnologias fundamentadas em chaveamentos controlados se apresentam como estratégia factível para o desenvolvimento de mecanismos compatíveis às necessidades dos complexos de transmissão, oferecendo atrativos e desafios para os pesquisadores [7], [8]. A filosofia ora tratada se apresenta imbuída do propósito de intitular os dispositivos capazes de identificar os instantes propícios para o fechamento ou abertura dos contatos dos disjuntores, por meio da observação dos sinais de tensão, ou corrente [9], [10]. Esta estratégia, por conseguinte, elimina a necessidade do RPI, mostrando-se, técnica e economicamente, atrativa para o aumento da confiabilidade do sistema [1], [11].

Ademais, a implementação do controle, juntamente com a instalação de para-raios de óxido metálico, permite a redução do nível de isolamento da linha, possibilitando o uso de torres mais compactas e contribuindo para o decréscimo dos custos gerais do sistema [12], [13].

Inserido neste cenário, e fundamentado em princípios estabelecidos em [13], o presente trabalho destina-se à apresentação de uma síntese dos conceitos físicos de uma

estratégia destinada a cumprir as metas ora postas. Uma vez definida a proposta e elaborada sua modelagem, estas são implementadas computacionalmente no *Alternative Transients Program* (ATP). A partir deste recurso de cunho teórico, são realizados estudos de desempenho da eficácia do processo utilizando-se, para tanto, um sistema de transmissão típico, em extra-alta tensão (EAT), pertencente a rede básica do Sistema Interligado Nacional. As investigações são conduzidas através de testes compreendendo a ocorrência de curtos-circuitos sucedidos por desligamentos e posteriores ações de religamentos da linha de transmissão.

Visando uma melhor contextualização dos estágios de desenvolvimento da tecnologia voltada para a redução das sobretensões aqui referidas, na sequência é exposta uma descrição mais detalhada dos procedimentos clássicos adotados em âmbito global.

1.2 ESTADO DA ARTE

Esta seção encontra-se centrada numa análise mais detalhada dos procedimentos comumente utilizados para a atenuação dos fenômenos transitórios advindos das manobras de disjuntores em longas linhas de transmissão.

1.2.1 Resistores de Pré-Inserção

Um dos métodos mais empregados para limitar as sobretensões transitórias provenientes das manobras de chaveamento das linhas de transmissão consiste na aplicação dos resistores de pré-inserção [14], [15]. Estes componentes são instalados paralelamente a câmara dos disjuntores e seu funcionamento se baseia no fechamento

sequencial de dois contatos. Durante a energização, o contato auxiliar introduz o RPI em série com a linha, implicando na redução da tensão que seria imposta à mesma. Após um intervalo de alguns milissegundos, o contato principal é fechado, curto-circuitando o resistor e permitindo que a tensão plena da fonte seja aplicada à linha.

De fato, em se tratando da eficiência do método ora referido, o mesmo reduz a amplitude das sobretensões transitórias aos níveis admissíveis, quando da escolha e instante de inserção apropriados do resistor [16]. Segundo a referência [17], o uso de RPI em disjuntores de 500 kV tem a capacidade de limitar as sobretensões de manobras à 1,5 p.u. em 98% dos casos.

No entanto, os disjuntores com resistores de pré-inserção podem apresentar um índice significativo de falhas operacionais, acarretando no aumento da necessidade de manutenção preventiva e reposição de componentes [4], [18]. Sua aplicação apresenta elevados custos, diante da necessidade da implementação de dispositivos complementares aos tradicionais disjuntores, os quais se tornam construtivamente mais complexos [4].

Em [5] foram enunciadas as dificuldades encontradas pela Florida Power & Light (FPL) ao deparar-se com o surgimento de problemas atrelados ao uso de resistores de pré-inserção de um conjunto de disjuntores de 500 kV. Inicialmente, a FPL optou pela reconstrução dos mecanismos dos resistores, no entanto, em detrimento da baixa confiabilidade destes equipamentos, outras alternativas foram devidamente analisadas, destacando-se a implantação de para-raios de óxido metálico.

A eliminação do RPI implica no aumento da confiabilidade do disjuntor e, portanto, na redução dos seus custos de aquisição e manutenção, o que fundamenta a necessidade de soluções alternativas para aliviar os efeitos causados pelos surtos de manobras que afetam a qualidade da energia dos sistemas elétricos.

1.2.2 Para-raios

Uma solução alternativa aos tradicionais RPIs é baseada no uso de para-raios de óxido de zinco (ZnO) localizados em pontos estratégicos ao longo da linha de transmissão. Estes equipamentos, por sua vez, são responsáveis por limitar sobretensões transitórias devido ao seu baixo nível de proteção e maior capacidade de dissipação de energia [19].

Estudos realizados em [6], em linhas de transmissão em extra-alta tensão, constataram resultados positivos quando da utilização de para-raios no meio da linha, ou dois localizados a 1/4 e 3/4 do comprimento total do condutor, mantendo-se os para-raios das subestações terminais. Tal arranjo dispensou a necessidade da utilização de RPIs e reduziu, satisfatoriamente, as sobretensões de manobras.

Em [20], foi analisado o desempenho de três diferentes tipos de para-raios para mitigar possíveis sobretensões provenientes das manobras de disjuntores em uma linha de transmissão do sistema elétrico chinês em 1000 kV, em ultra-alta tensão (UAT). A avaliação computacional foi verificada por meio do software PSCAD/EMTDC, constatando que os três dispositivos foram capazes de suprimir os transitórios de chaveamento e eliminar o uso de resistores de pré-inserção.

1.2.3 Técnicas de Chaveamento Controlado

Os problemas relacionados às sobretensões devido a manobras de disjuntores em linhas de transmissão podem ser efetivamente amenizados pela utilização das mais diversas técnicas atualmente existentes de chaveamento controlado. De forma geral, o

termo chaveamento controlado é utilizado para descrever equipamentos eletrônicos com capacidade de definir instantes apropriados para abertura ou fechamento dos contatos do disjuntor, observando-se os sinais de tensão ou corrente [9], [10].

Na referência [4], são mencionadas as dificuldades enfrentadas pela *Bonneville Power Administration* (BPA) atreladas ao uso de resistores de pré-inserção, tendo como alternativa a utilização do chaveamento controlado juntamente com a instalação de para-raios de óxido metálico nos terminais da linha. Para tanto, foram realizados testes em campo e simulações digitais no *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), considerando duas situações distintas de chaveamento. A primeira fazendo uso do fechamento escalonado, que consiste no chaveamento de cada polo do disjuntor com intervalo aproximado de um ciclo, respeitando o tempo necessário para a extinção da tensão transitória provocada pelo acoplamento eletromagnético entre as fases. A segunda empregando-se a técnica do fechamento controlado, ou seja, o chaveamento é independente para cada polo quando as tensões terminais de cada fase tem a mesma intensidade. Os estudos apresentaram resultados positivos, desprezando-se a necessidade do RPI para energização de linhas em EAT.

A referência [18] contempla a redução das sobretensões de manobras, fazendo uso do chaveamento controlado associado à conexão de para-raios nos terminais da LT. Foram realizadas simulações computacionais no *Alternative Transients Program* envolvendo energizações e religamentos de uma linha de transmissão de 550 kV, variando-se o comprimento da linha para diferentes graus de compensação. O tempo de operação do disjuntor e a estimativa do instante apropriado para o chaveamento foram representados por distribuições estatísticas. Os resultados das simulações confirmaram que o uso de para-raios em conjunto com o chaveamento controlado dispensou a

necessidade da utilização dos resistores de pré-inserção, limitando as sobretensões à 1,7 p.u.

As referências [12] e [21] exibem o primeiro controlador para o chaveamento de linhas de transmissão dotadas de compensação reativa em derivação. O dispositivo é capaz de estimar os instantes apropriados para o chaveamento por meio da observação dos sinais de tensão a montante e a jusante do disjuntor separadamente. A avaliação do método foi realizada por meio de testes em analisadores de rede e simulações digitais no EMTP. Conjuntamente, experimentos em campo foram executados em uma linha de transmissão de 500 kV, comprovando a eficácia da técnica em atenuar os efeitos das tensões transitórias no sistema. Contudo o método ora referido apresenta fragilidades para o chaveamento de linhas com baixas compensações, devido à complexidade característica dos sinais em tais circunstâncias.

Em [22] é apresentado um método para o religamento de linhas com compensação reativa em derivação, a partir da observação da forma de onda da tensão entre os contatos do disjuntor, considerando o monitoramento de apenas uma fase, visando detectar uma região apropriada para o chaveamento das três fases. Para tanto, os autores consideraram um tempo morto de 200 ms, executando o religamento tripolar simultâneo no primeiro batimento mínimo subsequente. A avaliação do método foi efetuada em tempo real por meio do *Real Time Digital Simulator* (RTDS™) e é capaz de limitar as sobretensões de maneira eficaz.

Vale observar que, embora haja uma infinidade de métodos para o controle do chaveamento em linhas de transmissão, existe uma certa carência no que tange a determinação precisa dos instantes apropriados para o religamento de linhas, sobretudo, na ocorrência de defeitos ao longo da mesma.

Diante do exposto, Dantas apresenta em [13], uma proposta de religamento controlado observando as características das tensões remanescentes após a abertura tripolar dos disjuntores de uma linha de transmissão com compensação reativa em derivação, devido à um curto-circuito desequilibrado. O método é baseado em um algoritmo de detecção de passagens por zero e na aplicação de transformações modais, o que resulta na possibilidade de estimar o comportamento dos sinais em instantes futuros e enviar o comando para o chaveamento individual de cada fase nos instantes apropriados. A avaliação da metodologia foi realizada no RTDS™, apresentando resultados satisfatórios no tocante a limitação das tensões transitórias após a ocorrência de curtos-circuitos monofásicos e bifásicos aterrados. Ademais, a atual estratégia se apresenta como base para a elaboração da presente dissertação. Os fundamentos da metodologia serão melhor explanados nas seções subsequentes.

1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

Não obstante os avanços acima descritos, é importante ressaltar que investigações complementares, voltadas para a implementação do processo acima proposto numa plataforma para estudos computacionais no domínio do tempo, devem ser consideradas. A partir desta ferramenta de análise, estudos de desempenho podem ser definidos sob distintas condições operativas atreladas à natureza dos curtos-circuitos e ao comportamento do sistema elétrico, bem como as características dos fenômenos para os quais poder-se-á aplicar a tecnologia do chaveamento controlado. Isso tem por meta constatar eficiências e limitações da metodologia proposta.

Por conseguinte, a partir da apresentação dos aspectos gerais que se encontram imbuídos no tema central desta dissertação, foram reconhecidas como contribuições oferecidas por este trabalho:

- Modelagem computacional e implementação do controle proposto em [13] por meio da linguagem MODELS no simulador ATP;
- Avaliação computacional da metodologia proposta em [13], analisando de forma crítica os aspectos atrelados ao desempenho da técnica ora referida, ponderando suas restrições e aplicabilidade, com destaque aos efeitos de fatores de influência associados com as impedâncias de falta, desequilíbrios para as tensões e locais de incidência das faltas.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do presente capítulo introdutório, esta dissertação encontra-se sistematizada em consonância com o seguinte:

CAPÍTULO II – Fundamentos da Metodologia do Chaveamento Controlado.

Nesta seção são enunciados os fundamentos da metodologia desenvolvida em [13], explorando aspectos relacionados ao comportamento da tensão residual na ocorrência dos diferentes tipos de curtos-circuitos na linha de transmissão. Além disso, serão apresentadas as limitações da técnica ora referida e o desenvolvimento, em detalhes, da estratégia de controle.

CAPÍTULO III – Implementação da Estratégia no Simulador ATP.

Esta etapa contempla o desenvolvimento da lógica de controle no *Alternative Transients Program*, destacando os principais recursos utilizados para a implementação da metodologia no programa e as vantagens de uso do software empregado.

CAPÍTULO IV – Estudos Computacionais de Desempenho da Metodologia.

Este capítulo exhibe a caracterização e parametrização gerais do sistema implementado, para o desenvolvimento da verificação computacional de desempenho da metodologia. São apresentados os estudos realizados em uma linha de transmissão de 500 kV, referente a interligação Norte-Nordeste da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), sob a influência de defeitos monofásico e bifásico aterrados.

CAPÍTULO V – Conclusões.

Este tópico expõe as considerações finais sobre a pesquisa, com o objetivo de salientar suas principais contribuições e indicar eventuais fragilidades, além de ressaltar as perspectivas para futuros trabalhos envolvendo o tema em foco.

Referências Bibliográficas.

Neste particular, são destacadas as referências que contribuíram, essencialmente, para a elaboração desta dissertação.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DA METODOLOGIA DO CHAVEAMENTO CONTROLADO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As sobretensões de manobras em linhas de transmissão são fenômenos transitórios provocados pela abertura ou fechamento dos contatos dos disjuntores. Tais manobras são inevitáveis no sistema, todavia, a atenuação das sobretensões pode ser feita, dentre outras formas, por meio da utilização de resistores de pré-inserção e chaveamento controlado [23], [24], como já reportado anteriormente.

Quando ocorrem defeitos ao longo de uma linha de transmissão, após a identificação do distúrbio, os disjuntores localizados nos seus terminais são rapidamente abertos com o propósito de eliminar o defeito, que pode ser de natureza permanente ou temporária. Em assim sendo, estratégias de controle para a energização e religamento de linhas são mais comumente encontradas na bibliografia. Diante do exposto, neste trabalho serão tratadas apenas as sobretensões oriundas dos tipos de chaveamentos supramencionados, devido à possibilidade de aplicação da metodologia implementada.

2.2 CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES REMANESCENTES NA LINHA DE TRANSMISSÃO

A energização trifásica de uma linha de transmissão, basicamente, consiste em sua inserção trifásica no sistema por meio do fechamento dos contatos dos disjuntores. Vale lembrar que, por se tratar de uma manobra tripolar, os contatos dos disjuntores normalmente não sofrem fechamento simultâneo. Isto se deve, sobretudo, ao fato de o arco elétrico e a dispersão mecânica serem inerentes ao processo de manobra da chave. Por conseguinte, transitórios se propagarão pela linha sendo refletidos no terminal remoto, o qual normalmente encontra-se aberto, podendo ocasionar elevadas sobretensões [3]. Tipicamente, os transitórios de energização permanecem por alguns milissegundos nos quais ocorrem os maiores picos de tensão, capazes de atingir valores próximos à 2 p.u. [25].

Interrupções inesperadas podem ocorrer nas linhas de transmissão, sendo precedidas de manobras de religamento automático, visando reconduzir rapidamente o fornecimento de energia e garantir melhor confiabilidade ao sistema. A manobra é comumente efetuada considerando um tempo morto compreendido entre 500 ms e 1,5 s, cujo valor depende de fatores impostos pelas limitações dinâmicas de estabilidade e classe de tensão [26], [27].

A abertura de disjuntores numa linha previamente energizada ocorre quando a corrente é nula, fato este que conduz a uma interrupção em um instante no qual a tensão encontra-se com amplitude diferente de zero. Isto resulta no surgimento de uma “tensão residual”, ou “carga residual”, a qual apresenta comportamento dissemelhante para cada fase. Sendo assim, o religamento de uma linha de transmissão ocorre sob a presença de

tensões residuais, fato este que permite a sua distinção de uma manobra de energização [28].

O decaimento da mencionada tensão residual, em sistemas desprovidos de compensadores e demais equipamentos especiais, é relativamente lento, sendo regido pelas condições climáticas e perdurando cerca de alguns minutos até seu completo escoamento pela cadeia de isoladores [29], podendo ser significativamente reduzido utilizando-se resistores de abertura acoplados aos disjuntores e TPs conectados à linha [30].

Em manobras de religamentos os contatos dos disjuntores podem ser fechados em instantes aleatórios nos quais a tensão da fonte pode apresentar polaridade inversa à da linha, acarretando em elevadas sobretensões. Tais fenômenos são capazes de atingir valores próximos a 4 p.u. [3] em função do acoplamento eletromagnético entre as fases e da propagação e reflexão das ondas de tensão na linha de transmissão.

Em linhas compensadas por reatores em derivação, o circuito que se estabelece a jusante do disjuntor apresenta uma composição física similar à um oscilador. A tensão residual se comporta como uma fonte de excitação para o circuito envolvendo capacitores, indutores e resistências próprios da linha, bem como para os reatores de compensação. Nestas condições, o decaimento da tensão residual é relativamente rápido comparado à situação em que a linha é desprovida de compensação e varia em função do fator de qualidade do reator [31]. Isto posto, há de se reconhecer um comportamento oscilatório contendo diferentes componentes de frequência, as quais são dependentes do arranjo de transposição da linha, do seu grau de compensação e do tipo de defeito que originou sua abertura [30].

Para melhor compreender os fundamentos do fenômeno ora referido, a Figura 2.1 apresenta o comportamento da tensão, na ausência de defeitos, em uma das fases de uma

linha de transmissão perfeitamente transposta e provida de compensação reativa em derivação. No instante de 0,2 s o fornecimento de energia é interrompido e após um tempo morto de alguns milissegundos ocorre o seu religamento automático, período no qual ocorrem as maiores sobretensões.

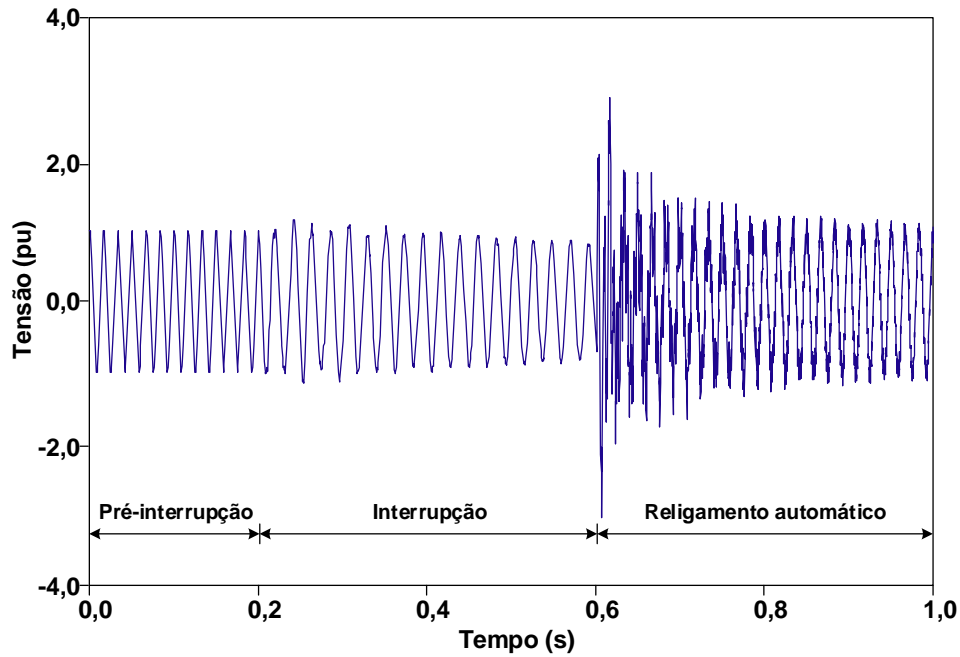


Figura 2.1 – Forma de onda da tensão na ocorrência de manobras em uma das fases de uma linha de transmissão com compensação reativa em derivação.

A partir da Figura 2.1, infere-se que o conjunto formado pela linha e reator contém duas frequências naturais de oscilação, enunciadas em (2.1) e (2.2), as quais podem ser determinadas desprezando-se a reatância da linha por se tratar de uma grandeza consideravelmente inferior à do reator [28].

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.1)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (2.2)$$

Onde:

f_1 e f_0 – frequências de oscilação da tensão residual para as sequências positiva e zero, respectivamente.

L_1 e L_0 – indutâncias de sequência positiva e zero do reator de compensação.

C_1 e C_0 – capacitâncias de sequência positiva e zero da linha de transmissão.

A frequência f_1 também pode ser obtida a partir da relação entre a potência reativa indutiva do reator e a capacitiva da linha, como definido pela equação (2.3).

$$f_1 = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{Q_r}{Q_l}} \quad (2.3)$$

Onde:

Q_r e Q_l – Potências reativas do reator e capacitiva da linha, respectivamente.

O comportamento da frequência de oscilação da tensão residual de uma linha de transmissão submetida à uma interrupção de energia, conforme esclarecido anteriormente, é dependente do grau de compensação da linha e do tipo de falta que ocasionou sua abertura. Diante do exposto, serão apresentadas, na sequência, as particularidades dos diferentes tipos de curtos-circuitos existentes no sistema elétrico, em que suas respectivas frequências de oscilação serão obtidas por transformações modais empregando a matriz de Karrenbauer [3].

2.2.1 Curto-circuito Fase-terra (FT)

O circuito equivalente representativo de um curto-circuito numa rede elétrica, genericamente, pode ser tratado com o auxílio de transformações modais utilizando a matriz de Karrenbauer, assumindo que as linhas de transmissão sejam perfeitamente

transpostas. A aplicação dessa teoria tem se mostrado eficaz também para sistemas de transposição reais.

A relação entre as tensões no domínio da fase e no domínio modal, utilizando a matriz de Karrenbauer, pode ser representada pelas expressões (2.4) e (2.5) [3].

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Onde:

v_a, v_b e v_c – Tensões no domínio das fases da linha de transmissão.

v_0, v_1 e v_2 – Tensões no domínio modal.

Para um defeito envolvendo a fase A e a terra, sob condições ideais, ou seja, desprezando-se a impedância de defeito e a reatância da linha, no ponto da falta tem-se que $v_a = 0$, $i_b = i_c = 0$ e $i_a = i_{cc}$. Dessarte, a partir de (2.4), obtém-se a expressão (2.6).

$$v_1 + v_2 + v_0 = 0 \quad (2.6)$$

Com base no equacionamento ora referido, conclui-se que os circuitos modais 0, 1 e 2, do conjunto linha-reator, devem ser conectados em série no ponto do defeito, tal como indicado na Figura 2.2.

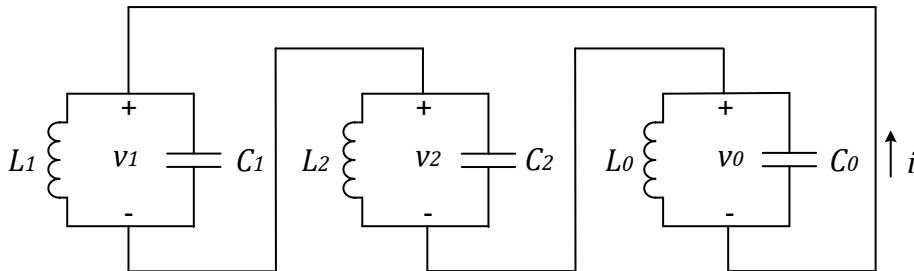


Figura 2.2 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito fase-terra.

As tensões modais 1, 2 e 0 podem ser enunciadas conforme as equações (2.7), (2.8) e (2.9), respectivamente [13].

$$v_1(t) = L_1 \frac{di}{dt} - L_1 C_1 \frac{d^2 v_1}{dt^2} \quad (2.7)$$

$$v_2(t) = L_2 \frac{di}{dt} - L_2 C_2 \frac{d^2 v_2}{dt^2} \quad (2.8)$$

$$v_0(t) = L_0 \frac{di}{dt} - L_0 C_0 \frac{d^2 v_0}{dt^2} \quad (2.9)$$

Aplicando a Transformada de Laplace nas equações supramencionadas, tem-se as expressões (2.10), (2.11) e (2.12).

$$V_1[1 + s^2 L_1 C_1] - s L_1 C_1 v_1(0) = s L_1 I \quad (2.10)$$

$$V_2[1 + s^2 L_2 C_2] - s L_2 C_2 v_2(0) = s L_2 I \quad (2.11)$$

$$V_0[1 + s^2 L_0 C_0] - s L_0 C_0 v_0(0) = s L_0 I \quad (2.12)$$

Considerando que os parâmetros do conjunto linha-reator referentes ao modo 1 e modo 2 são idênticos e respeitando a igualdade estabelecida em (2.6), as sentenças (2.10) e (2.11) podem ser somadas, o que resulta na equação (2.13).

$$I = \frac{C_1 v_0(0)}{2} - \frac{V_0[1 + s^2 L_1 C_1]}{2s L_1} \quad (2.13)$$

Substituindo (2.13) em (2.11) e (2.12), surgem as equações (2.14) e (2.15), respectivamente.

$$V_2 = -\frac{V_0}{2} + \left[\frac{v_0(0)}{2} + v_2(0) \right] \frac{s}{s^2 + \frac{1}{L_1 C_1}} \quad (2.14)$$

$$V_0 = v_0(0) \frac{s}{s^2 + \frac{2L_1 + L_0}{L_1 L_0 (C_1 + 2C_0)}} \quad (2.15)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace nas sentenças (2.14) e (2.15) e mantendo a igualdade estabelecida em (2.6), tem-se, nessa ordem, as expressões (2.16) e (2.17)

$$v_1(t) = -\frac{v_0(t)}{2} - \left[\frac{v_2(0) - v_1(0)}{2} \right] \cos \left(\sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} t \right) \quad (2.16)$$

$$v_0(t) = v_0(0) \cos \left(\sqrt{\frac{2L_1 + L_0}{L_1 L_0 (C_1 + 2C_0)}} t \right) \quad (2.17)$$

A partir das equações (2.16) e (2.17), são obtidas as frequências de oscilação da tensão residual na presença de defeitos fase-terra, referentes ao modo 1 (2.18) e modo 0 (2.19), respectivamente [13].

$$f_{1_{FT}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.18)$$

$$f_{0_{FT}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\sqrt{\frac{2L_1 + L_0}{L_1 L_0 (C_1 + 2C_0)}} \right) \quad (2.19)$$

Onde:

$f_{1_{FT}}$ e $f_{0_{FT}}$ – frequências de oscilação da tensão residual, referentes aos modos 1 e 0 da linha de transmissão sob defeito fase-terra.

Após a extinção da falta, a relação observada em (2.6) deixa de ser válida, já que os circuitos modais são desacoplados e a frequência de oscilação da tensão residual

referente ao modo 0 passa a ser determinada novamente pela equação (2.2). Ainda que $f_{1_{FT}}$ apresente o mesmo comportamento durante a falta e após o seu término, o que pode ser observado pela similaridade entre as expressões (2.1) e (2.18), a frequência de oscilação referente ao modo 0 tem comportamento distinto para cada situação de operação, possibilitando a identificação do término do curto-circuito na linha de transmissão.

2.2.2 Curto-circuito Fase-fase-terra (FFT)

Na presença de defeitos que envolvam duas fases e a terra, a exemplo do curto-circuito BCT, e baseando-se nas mesmas premissas idealizadas para a situação anterior, tem-se que $v_b = v_c = 0$, $i_a = 0$ e $(i_b + i_c) = i_{cc}$. Portanto, a partir de (2.5) infere-se a expressão (2.20).

$$v_1 = v_2 = v_0 = v \quad (2.20)$$

Observando a equação (2.20), nota-se que os circuitos modais devem ser conectados em paralelo no ponto da falta, conduzindo ao arranjo da Figura 2.3.

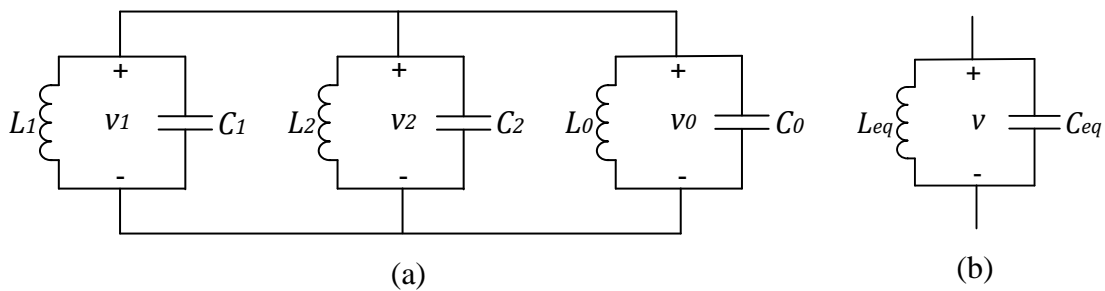


Figura 2.3 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito fase-fase-terra (a) e seu respectivo circuito equivalente (b).

Considerando a similaridade entre os parâmetros da linha-reator dos modos 1 e 2, obtém-se as expressões que representam o equivalente indutivo (2.21) e capacitivo (2.22) do conjunto.

$$L_{eq} = \frac{L_0 L_1}{2L_0 + L_1} \quad (2.21)$$

$$C_{eq} = C_0 + 2C_1 \quad (2.22)$$

A expressão que define a frequência de oscilação da fase sã é apresentada em (2.23).

$$f_{s\tilde{a}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq} C_{eq}}} \quad (2.23)$$

Alternativamente, substituindo (2.21) e (2.22) em (2.23), conclui-se que, na ocorrência de um curto-circuito fase-fase-terra, há na fase sã apenas uma frequência de oscilação definida pela expressão (2.24).

$$f_{FFT} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2L_0 + L_1}{L_0 L_1 (C_0 + 2C_1)}} \quad (2.24)$$

Uma vez extinta a falta, a igualdade obtida em (2.20) deixa de ser válida e as frequências de oscilação apresentam valores determinados novamente por (2.1) e (2.2).

Com o objetivo de uniformizar o método proposto, a avaliação dos defeitos FFT é realizada de forma similar a ocorrência de faltas FT, visto que os primeiros podem envolver apenas uma das fases antes de sua completa extinção, fato este que permite o seu tratamento de forma isolada. Sendo assim, na manifestação de ambos os tipos de faltas, o critério para a detecção da sua extinção encontra-se claramente exposto na Seção 2.2.1.

2.2.3 Curto-circuito Fase-fase (FF)

Para uma falta franca envolvendo as fases B e C, sem a presença da terra, considera-se que no ponto do defeito $v_b = v_c$, $i_b = -i_c$ e $i_a = 0$. Isto posto, utilizando a relação matricial definida em (2.5), tem-se a expressão (2.25).

$$v_1 = v_2 = v \quad (2.25)$$

O circuito modal de sequência positiva do conjunto composto pela linha e reator deve ser conectado em série ao arranjo de sequência negativa, cuja configuração encontra-se representada na Figura 2.4.

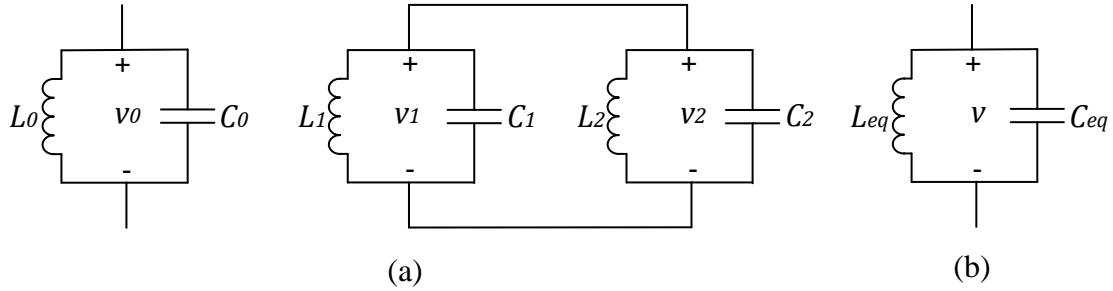


Figura 2.4 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito fase-fase (a) e seu respectivo circuito equivalente (b).

Considerando a equivalência dos parâmetros modais 1 e 2 do conjunto e efetuando a associação paralela das indutâncias e capacitâncias, resulta nas equações (2.26) e (2.27), respectivamente.

$$L_{eq} = \frac{L_1}{2} \quad (2.26)$$

$$C_{eq} = 2C_1 \quad (2.27)$$

A partir de (2.26) e (2.27) considera-se que, na ocorrência de um curto-circuito fase-fase sem envolvimento da terra, a frequência de oscilação da tensão residual de

sequência positiva é definida pela equação (2.1). Apesar de o modo 0 não estar presente na modelagem da falta é possível que esta componente seja excitada durante a abertura da linha, cuja equação passa a ser definida por (2.2).

Desenvolvimentos realizados a partir da análise do circuito equivalente modal deste tipo de falta revelam que as frequências de oscilação são as mesmas durante e após o término do curto-circuito, impossibilitando a detecção da sua extinção.

2.2.4 Curto-circuito Trifásico (3F)

Para uma situação em que a linha de transmissão é submetida a um curto-circuito trifásico aterrado, desprezando a impedância do defeito e a reatância da linha, as condições de operação no ponto da falta são tais que $v_a = v_b = v_c = 0$. Sendo assim, a partir de (2.5) é apresentada a equação (2.28).

$$v_0 = v_1 = v_2 = 0 \quad (2.28)$$

Analisando a equação (2.28) infere-se que os circuitos modais 0, 1 e 2 são curtos-circuitados no ponto da falta, tal como exposto na Figura 2.5.

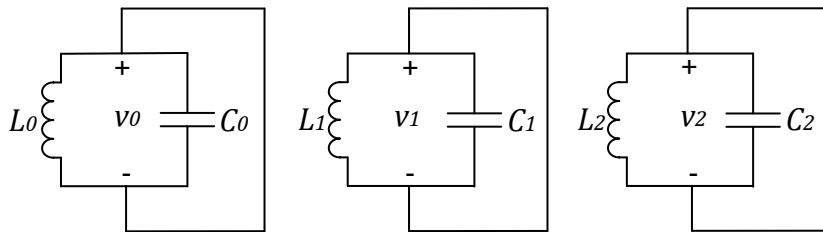


Figura 2.5 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito trifásico aterrado.

Na presente situação pode-se afirmar que não há tensão residual na linha de transmissão, uma vez que não existe energia armazenada nas capacitâncias das mesmas.

Ao considerar a ocorrência de um curto-circuito trifásico não aterrado, espera-se que $v_a = v_b = v_c$ e $i_a + i_b + i_c = 0$. Logo, as tensões no domínio modal (2.30) podem ser definidas a partir de (2.5).

$$v_1 = v_2 = 0 \quad (2.29)$$

Os arranjos modais 1 e 2 são curtos-circuitados no ponto da falta, enquanto a componente referente ao modo 0 não é envolvida no defeito, resultando no circuito equivalente da Figura 2.6.

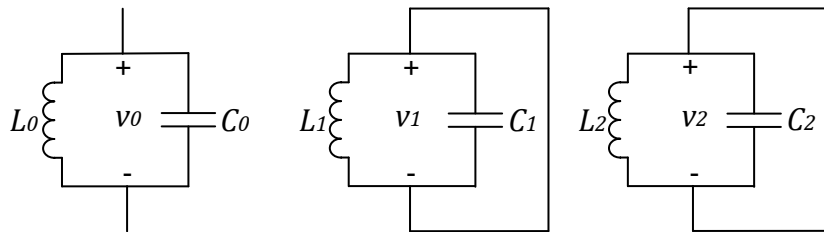


Figura 2.6 – Arranjo no domínio modal para a representação de um curto-circuito trifásico não aterrado.

Neste particular, uma vez que o modo 0 possa ser excitado no momento da abertura da linha, a frequência de oscilação é definida por (2.2). Contudo, esta componente também é rapidamente amortecida, possibilitando desconsiderar a presença das tensões residuais na linha de transmissão. Por conseguinte, na ocorrência de defeitos trifásicos aterrados, ou não aterrados o religamento dispõe das mesmas características de uma manobra de energização, impossibilitando a detecção da extinção de defeitos a partir da análise do comportamento das frequências oscilatórias.

2.3 LIMITAÇÕES TÉCNICAS DA METODOLOGIA IMPLEMENTADA

As técnicas de chaveamento controlado, de fato, têm se mostrado uma alternativa econômica e confiável para aliviar as sobretensões provindas das manobras de disjuntores nas linhas de transmissão. No entanto, mesmo as atuais metodologias apresentam certas fragilidades no que tange à determinação adequada dos instantes para a reinserção da linha no sistema, sobretudo, na ocorrência de defeitos ao longo de sua extensão. Diante dessa realidade, o método enunciado em [13] propõe uma técnica para o religamento de linhas de transmissão compensadas por reatores em derivação, imediatamente após a extinção de defeitos ao longo de sua extensão.

Ambicionando compreender claramente as aplicações e limitações da metodologia em pauta, a Tabela 2.1 apresenta as equações que descrevem o comportamento das frequências oscilatórias durante a falta e após sua extinção.

Tabela 2.1 – Comportamento das frequências de oscilação durante e após o término da falta.

Curto-circuito	Comportamento das frequências de oscilação	
	Durante a falta	Após a extinção da falta
Fase-terra	$f_{0_{FT}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\sqrt{\frac{2L_1 + L_0}{L_1 L_0 (C_1 + 2C_0)}} \right)$ $f_{1_{FT}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}}$ $f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$
Fase-fase-terra	$f_{FFT} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2L_0 + L_1}{L_0 L_1 (C_0 + 2C_1)}}$	
Fase-fase	$f_{0_{FF}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}}$ $f_{1_{FF}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$	
Trifásico	Não há tensão residual	

Por conseguinte, baseando-se nas equações supramencionadas, entende-se que a estratégia de controle é aplicada para o religamento de linhas de transmissão após a submissão de curtos-circuitos dos tipos fase-terra e fase-fase-terra, devido a possibilidade de identificação da extinção do defeito a partir da diferença do comportamento das frequências oscilatórias durante e após o término da falta.

No tocante a ocorrência de faltas do tipo fase-fase, há de se reconhecer a similaridade do comportamento da frequência de oscilação durante a falta e após a sua extinção. Diante desse cenário, a não alteração do comportamento dos osciladores torna inviável a definição de um critério capaz de possibilitar a detecção da extinção de faltas fase-fase a partir da perspectiva de observação das frequências oscilatórias.

Para as situações envolvendo curtos-circuitos trifásicos, aterrados ou não, convém utilizar estratégias de religamento a partir dos critérios estabelecidos para a energização controlada de uma linha de transmissão, devido à insignificativa presença das tensões residuais na mesma, o que dificulta a definição de meios capazes de identificar o término de curtos dessa natureza.

Do exposto segue que a lógica sugerida para o chaveamento controlado fica restrita aos religamentos associados à ocorrência de defeitos FT e FFT.

2.4 ESTRATÉGIA PARA O CHAVEAMENTO CONTROLADO

Quando uma linha de transmissão é submetida a um curto-circuito genérico, espera-se que o sistema de proteção interrompa o defeito por meio da abertura dos contatos dos disjuntores. No instante em que a linha é desligada, o sistema de controle deve detectar o motivo da abertura e, quando for o caso, classificar o tipo da falta. Para este fim, métodos encontrados na literatura podem ser utilizados, não sendo, portanto,

objeto de aplicação da estratégia de chaveamento utilizada no presente trabalho. Por conseguinte, o desenvolvimento da metodologia será apresentado considerando que a causa de abertura da linha é uma informação previamente conhecida.

Vale lembrar que a lógica de controle implementada é restrita ao religamento de linhas posterior a submissão de curtos-circuitos monofásicos e bifásicos com a presença da terra, os quais serão tratados de forma análoga considerando a similaridade do comportamento oscilatório da tensão residual antes da completa extinção dos defeitos supracitados.

Outro ponto a ser mencionado, refere-se ao religamento após a ocorrência de defeitos que envolvam mais de uma fase da linha de transmissão. Ainda que situações dessa natureza sejam contempladas na metodologia desenvolvida, ressalta-se que manobras desse gênero podem ser bloqueadas no SIN [32].

A lógica de controle para o estabelecimento do denominado chaveamento controlado, de acordo com [13], encontra-se sintetizada na Figura 2.7. Esta apresenta uma subdivisão simplificada em dois estágios, um primeiro encarregado da análise do sinal durante o defeito (vermelho), e um segundo, associado ao comportamento da tensão entre os contatos do disjuntor após o término da falta e definição dos instantes apropriados para o religamento (azul).

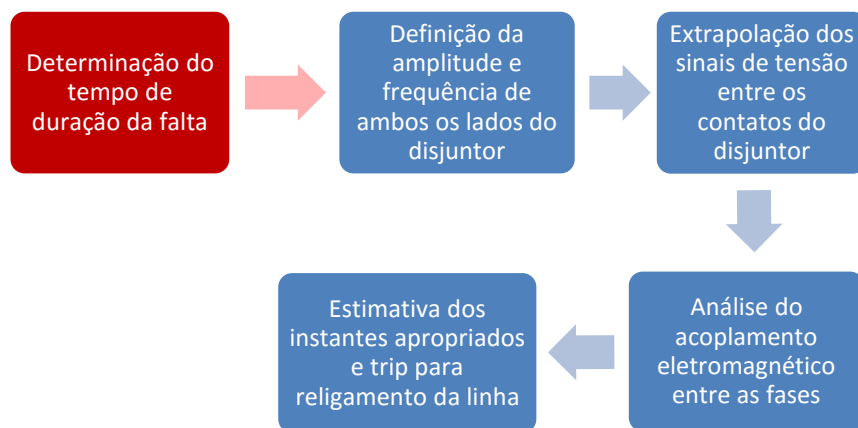


Figura 2.7 – Diagrama esquemático da lógica de controle.

Para que a linha de transmissão possa ser reinserida no sistema, é necessário, primeiramente, identificar se a falta foi extinta dentro do tempo morto. Caso o defeito persista, deve-se interromper o processo de religamento visando garantir que isto não ocorra enquanto a falta perdurar. Visando o atendimento a este quesito, uma das estratégias se apoia na observação dos sinais das tensões modais [33].

De fato, a análise do exposto em (2.6) conduz à expressão mostrada em (2.30)

$$(v_1 + v_2) = -v_0 \quad (2.30)$$

A partir desta correlação é possível constatar que:

- Se $(v_1 + v_2) = -v_0$, considera-se que a falta ainda persiste;
- Se $(v_1 + v_2) \neq -v_0$, presume-se que a falta foi extinta.

Entretanto, em se tratando de uma situação real, a igualdade expressa em (2.30) deixa de ser rigorosamente observada, já que a soma das tensões modais é proporcional a impedância do defeito [34]. Nestas circunstâncias, a alternativa utilizada se baseia na comparação da proximidade entre os valores de $(v_1 + v_2)$ e $-v_0$, o que é feito por meio do emprego de um parâmetro estatístico denominado “coeficiente de determinação R^2 ” [35]. Esta grandeza é adimensional e permite quantificar a proximidade do ajuste do sinal entre zero e um [36], sendo definida conforme (2.31):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.31)$$

Onde:

SSE – Soma quadrática das diferenças entre os sinais $(v_1 + v_2)$ e $(-v_0)$, tomadas ponto a ponto, em um intervalo de N amostras;

SST – Soma quadrática das diferenças entre as amostras de $(-v_0)$ e o valor médio desse sinal $(\overline{v_0})$, no intervalo de N amostras.

Após a abertura do disjuntor, idealmente, espera-se que o fator R^2 se apresente com valores próximos a um e, com o término da falta, que tal grandeza seja nula.

Identificada a extinção do defeito, o passo seguinte consiste na obtenção das amplitudes e frequências dos sinais presentes em ambos os lados do disjuntor. Isto tem por meta estimar os instantes apropriados para a efetivação do chaveamento no tempo requerido. Para tanto, é estimado o comportamento dos sinais mediante a extrapolação das componentes de frequência da tensão em cada fase, tanto do lado da fonte quanto do lado da linha. Objetivando maior precisão ao processo, este é iniciado após três passagens por zero (t_{zero3}), contadas a partir da extinção do defeito. A Figura 2.8 ilustra o exposto para o denominado modo 1, considerando que o defeito é eliminado no momento identificado por ($t_{inicial}$) [13].

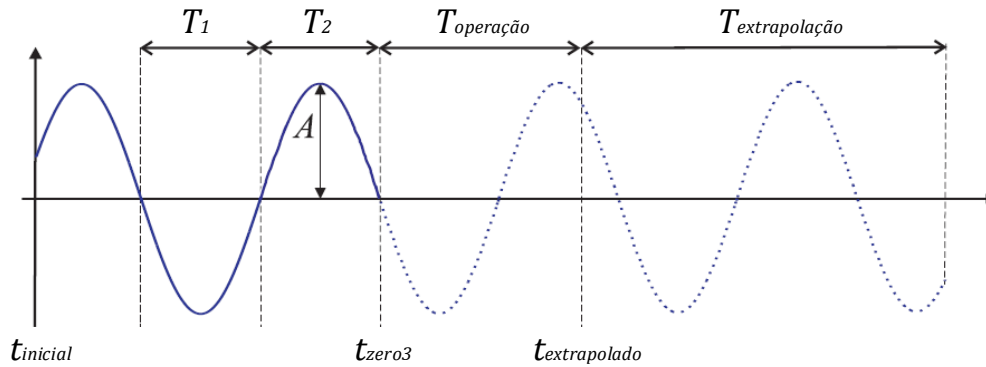


Figura 2.8 – Extrapolação do sinal de tensão referente ao modo 1.

A partir das considerações anteriores segue que as equações para o cálculo da tensão e frequência, referentes ao modo 1, são expressas por (2.32) e (2.33), respectivamente.

$$v_1(t) = A \times \text{sen}[2\pi f_1(t + T_{operação})] \quad (2.32)$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2T_1} + \frac{1}{2T_2} \right) \quad (2.33)$$

Onde:

A – Máximo valor absoluto entre as duas últimas passagens por zero;

f_1 – Média aritmética dos valores de frequência a cada duas passagens por zero.

Em consonância com recomendações advindas de [13], os sinais são extrapolados ($T_{extrapolação}$) durante um intervalo de 100 ms, atualizando-se os valores de amplitude e frequência da tensão entre os contatos do disjuntor a cada nova passagem por zero. A extrapolação só é interrompida quando forem encontrados os instantes apropriados para o fechamento de cada uma das fases.

A determinação dos instantes ideais para o chaveamento é feita concomitante à extrapolação da tensão entre os contatos do disjuntor. O procedimento é baseado na observação dos sinais estimados do lado da fonte e da linha, para determinação dos momentos nos quais os módulos das tensões em ambos os lados são equivalentes [37]. Em seguida é realizado o produto das derivadas da tensão da linha e da fonte. Se o resultado for um valor positivo, o momento assim determinado se apresenta como aquele apropriado para o chaveamento. Caso contrário, tal instante é inadequado por não se situar no período de menor pulsação do sinal [38], [39].

Vale ressaltar que o acoplamento eletromagnético entre as fases da linha de transmissão pode causar uma redução da eficiência do controle, acarretando em desvios consideráveis nos sinais de tensão utilizados para determinar os instantes apropriados para o chaveamento [9]. Tal fenômeno advém do surgimento de uma tensão induzida nas fases que ainda não foram manobradas após o religamento do primeiro contato, ocorrendo o mesmo inconveniente com a terceira fase após o fechamento do segundo polo. Com o propósito de reduzir estes efeitos, os tempos ótimos para o chaveamento da linha são considerados quando o intervalo entre o instante de fechamento do primeiro e último polo é o menor o possível [39]. Isto feito, os sinais são enviados para o religamento da linha com a expectativa que as sobretensões transitórias sejam reduzidas [10].

CAPÍTULO III

IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA NO SIMULADOR ATP

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo anterior foi descrita a metodologia proposta em [13], objetivando apresentar os fundamentos necessários para a adaptação da técnica do chaveamento controlado em uma ferramenta de domínio público. Vale ressaltar que a avaliação do método em destaque foi anteriormente consumada utilizando o *Real Time Digital Simulator*, o qual concedeu resultados positivos no que tange a mitigação das sobretensões de manobras em linhas de transmissão. No entanto, ainda que o RTDSTTM seja uma ferramenta exímia, não se trata de um produto facilmente acessível.

Diante desse contexto, pretende-se explorar, nesta etapa, os procedimentos utilizados para implementar o algoritmo de controle no simulador *Alternative Transients Program*, o qual foi escolhido por se tratar de um *software* gratuito e de renomada aplicação para análise de transitórios nos sistemas elétricos.

3.2 ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP)

O *Alternative Transients Program* é um programa computacional para análise de sistemas elétricos no domínio do tempo. Pode-se dizer que o ATP consiste em uma versão do *Eletromagnetic Transients Program* (EMTP) adaptada para microcomputadores, sendo livremente disseminado em âmbito global.

O programa permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas dotados de configurações arbitrárias, por meio da utilização da matriz de admitância de barras. As formulações matemática para os elementos com parâmetros distribuídos e concentrados são baseadas no método de Bergeron e na regra de integração trapezoidal, respectivamente [40].

Para que possam ser esclarecidas as etapas de trabalho no simulador ATP, são apresentados, na sequência, os recursos utilizados para a implementação da estratégia no programa.

3.2.1 ATPDraw para Windows

O ATPDraw consiste em um processador gráfico do programa ATP que permite criar e editar um sistema elétrico contendo modelos de dispositivos pré-definidos [41]. Neste ambiente, os arquivos são gerados no ATP em um formato no qual é possível manusear facilmente os ícones existentes na biblioteca do programa. A interface disponibiliza uma série de equipamentos para a realização de estudos de desempenho no tocante aos sistemas elétricos de potência, dentre os quais destacam-se as fontes de tensão, transformadores, chaves, máquinas elétricas, cargas passivas, cabos e linhas de

transmissão. A Figura 3.1 ilustra a lista de componentes presentes na biblioteca do programa.

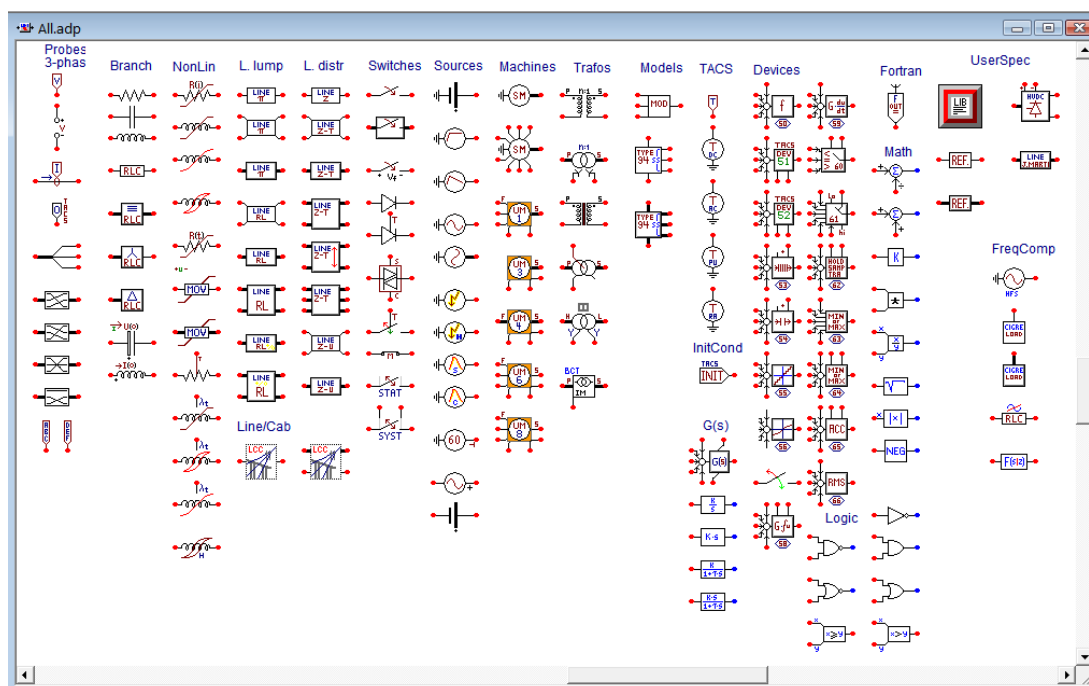


Figura 3.1 – Biblioteca de componentes do ATPDraw.

Em situação que pretende-se elaborar um algoritmo de controle ou utilizar um componente que não se encontra disponível na biblioteca, tem-se a possibilidade de criá-lo empregando a linguagem MODELS.

3.2.2 Linguagem MODELS

A MODELS é uma ferramenta baseada em linguagem de programação que permite a criação de modelos de componentes elétricos no ATP. Ademais, seu emprego abrange a concepção de sistemas de controle de componentes mediante a construção de estruturas de programação de alto nível. A aplicação da linguagem supracitada encontra-se imbuída do propósito de [40]:

- Permitir a reutilização do componente criado em diferentes sistemas e em condições adversas;
- Possibilitar a subdivisão de um modelo em partes, reduzindo sua complexidade e facilitando a realização de testes e uso de protótipos;
- Suportar o uso de comentários internos, os quais facilitam a identificação das etapas e auxiliam na produção de modelos auto documentados.

Os valores, numéricos ou não, são disponibilizados em sua forma escalar ou vetorial, os quais podem ser descritos por expressões algébricas, booleanas, equações diferenciais e funções de transferência de Laplace [40].

De modo geral, pode-se afirmar que o programa ATP apresenta uma gama de recursos capazes de proporcionar simulações robustas para o estudo de desempenho de modelos ou do próprio sistema elétrico. Diante do exposto, estabeleceram-se os critérios para a escolha do programa no qual a metodologia seria implementada.

No tópico subsequente, serão retratadas as etapas de implementação da lógica do chaveamento controlado no simulador ATP, tendo como base o emprego da linguagem MODELS para a construção do algoritmo de controle.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE NA MODELS

Diante da necessidade de implementar o algoritmo de controle no simulador ATP, optou-se pela utilização da linguagem MODELS, em consonância com os argumentos exibidos nos tópicos anteriores.

A estratégia utilizada baseou-se na elaboração de duas MODELS, denominadas por M_1 e M_2 . Optou-se pela fragmentação do controle em virtude das facilidades auferidas ao empregar duas estratégias distintas, uma primeira caracterizada pelo comportamento do sinal nos instantes de ocorrência da falta (M_1), e a segunda correspondente a análise do sinal após a extinção do curto-circuito (M_2), em conformidade com o diagrama de blocos apresentado na Figura 3.2.

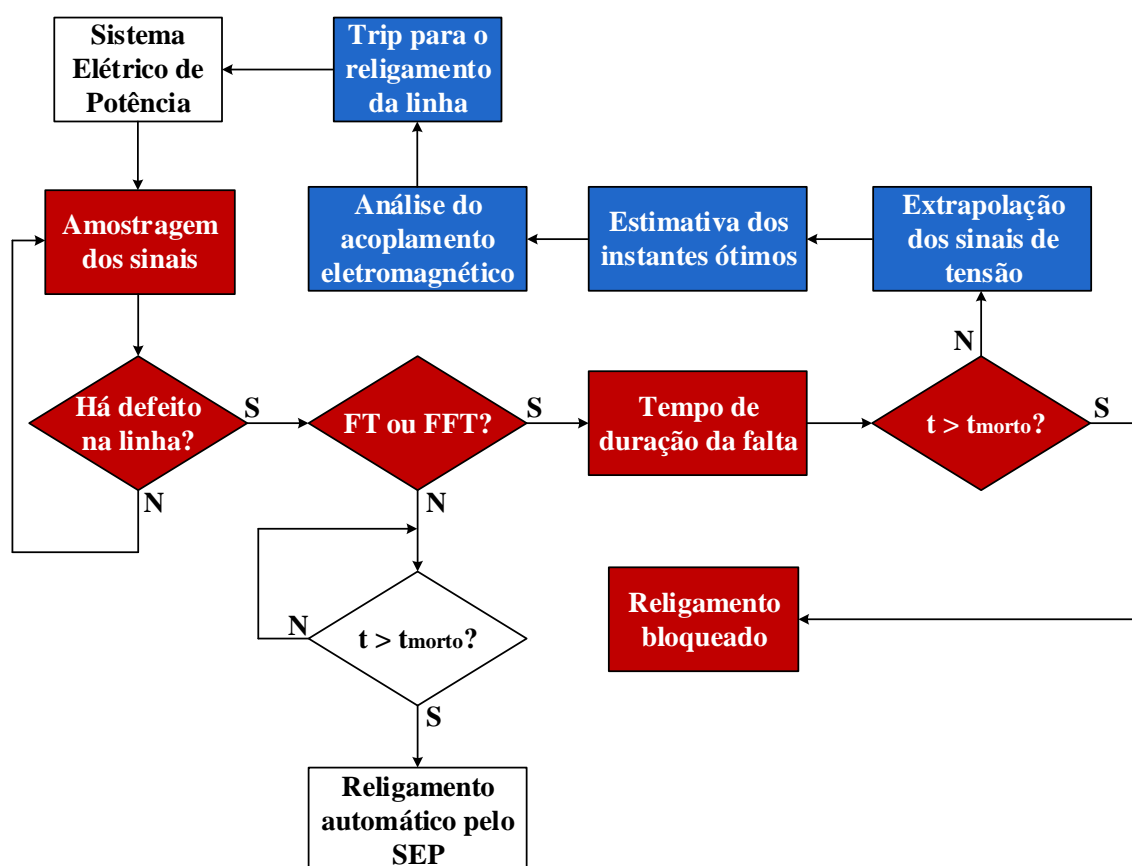


Figura 3.2 – Diagrama de blocos da lógica de controle implementada em M_1 (vermelho) e M_2 (azul).

Para a MODELS M_1 considerou-se um passo de integração de 1/960, resultando em uma taxa de 16 amostras por cada ciclo da frequência fundamental. Apenas os sinais das tensões trifásicas provenientes da linha foram solicitados como entradas de M_1 . É importante esclarecer que os aspectos atrelados ao reconhecimento do tipo de falta e das

fases envolvidas perfazem os dados solicitados pela MODELS, cuja informação deve ser fornecida pelo usuário do programa no ambiente ATPDraw. Sendo assim, o critério lógico adotado para cada tipo de falta é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Definição dos códigos para cada tipo de falta.

Tipo da Falta	Fase(s) Envolvida(s)	Código
Fase-terra	A	1
	B	2
	C	3
Fase-fase-terra	A e B	12
	A e C	13
	B e C	23

A título de exemplo, considerando-se a ocorrência de um curto-circuito fase-fase-terra envolvendo as fases A e C, deve-se empregar o código “13” na variável que define o tipo da falta, denominada por “TipoF”, tal como demonstra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Definição do tipo de falta a ser inserida na MODELS M_1 , no ambiente ATPDraw.

Identificada a existência de um curto-circuito na linha de transmissão, seja ele fase-terra ou fase-fase-terra, os disjuntores terminais sofrem abertura imediata. Neste instante, a estimativa do tempo de duração da falta é iniciada empregando-se o coeficiente de determinação R^2 . Para tanto, as amostras dos sinais de tensão instantânea são convertidas para o domínio modal (v_0, v_1 e v_2), em conformidade com a temática discutida no Capítulo II, cujos valores são comparados mediante a aplicação da equação (2.32) que, por conveniência, será repetida em (3.1) [36].

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.1)$$

De (3.1), tem-se as equações para o SSE (3.2) e SST (3.3), respectivamente, as quais foram desenvolvidas na MODELS M_1 .

$$SSE = \sum_{k=1}^N \{[v_0(k)] - [-(v_1(k) + v_2(k))]\}^2 \quad (3.2)$$

$$SST = \sum_{k=1}^N \{[v_0(k)] - (\overline{v_0})\}^2 \quad (3.3)$$

Onde:

SSE – Soma quadrática das diferenças entre os sinais (v_0) e $[-(v_1 + v_2)]$, tomadas ponto a ponto, em um intervalo de N amostras;

SST – Soma quadrática das diferenças entre as amostras de (v_0) e o valor médio desse sinal ($\overline{v_0}$), no intervalo de N amostras.

Caso o SST seja menor que o SSE , o coeficiente R^2 pode assumir valores negativos. De fato, isso significa que há uma disparidade entre as amplitudes dos sinais de (v_0) e $[-(v_1 + v_2)]$, tal que, para fins de observação, assumiu-se um R^2 igual a zero na ocorrência de valores negativos. Portanto, o coeficiente margeia amplitudes próximas

à unidade durante o tempo de persistência da falta, e assume valor nulo quando o defeito é extinto.

A Figura 3.4 evidencia o comportamento esperado do coeficiente de determinação R^2 na ocasião de um curto-circuito fase-terra. A falta é iniciada em 100 ms e extinta em 450 ms. Em 200 ms, a linha sofre um desligamento, instante este no qual o coeficiente atinge valores próximos à unidade. Ademais, é notável a proximidade entre os valores de (v_0) e $[-(v_1 + v_2)]$ durante o tempo de permanência do curto-circuito e a dessemelhança entre estes sinais após o término da falta.

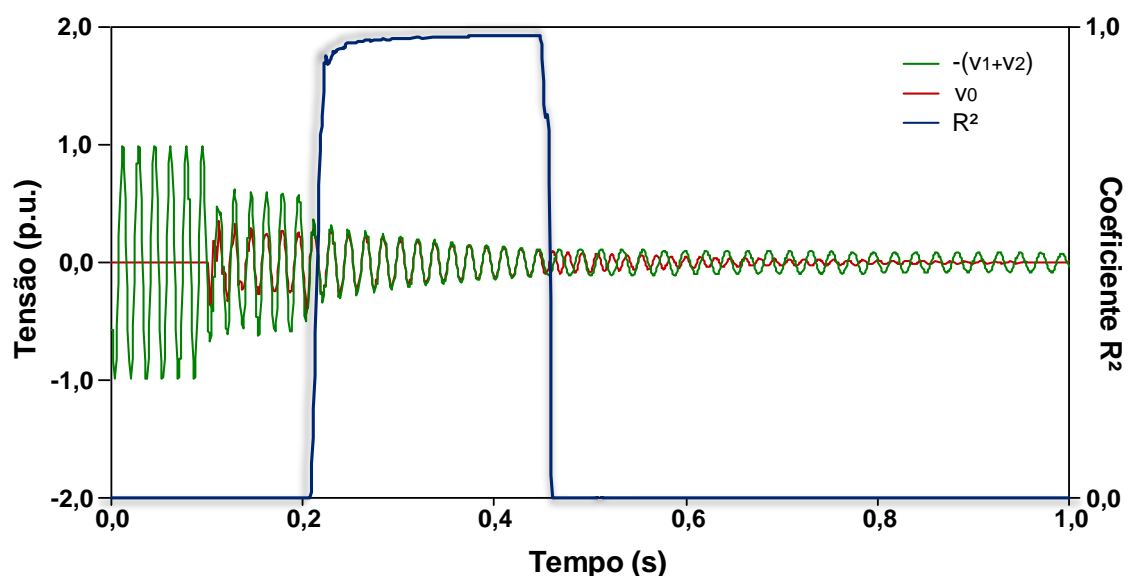


Figura 3.4 – Formas de onda das tensões modais (v_0) e $[-(v_1 + v_2)]$ e determinação do tempo de duração da falta pelo coeficiente R^2 .

Identificado o período de duração do curto-circuito, observa-se, então, se o defeito findou-se antes do tempo morto, cujo valor foi ajustado para 1,5 s. Caso isso não seja observado, o religamento é interrompido pelo sistema de controle, do contrário inicia-se a estimativa do comportamento dos sinais em instantes futuros, cujo algoritmo foi implementado na MODELS M_2 .

Em M_2 foi considerado um passo de integração equivalente ao adotado para M_1 , de 1/960. Ainda, na MODELS M_2 , o código da falta é solicitado como dado de entrada para a simulação, cujo valor deve concordar com o estabelecido para M_1 , tal como exemplificado na Figura 3.3, supramencionada.

As entradas que perfazem M_2 são dependentes da tensão em uma das fases da barra que compõe o terminal líder, das tensões trifásicas disponibilizadas pela linha de transmissão e do sinal de saída da MODELS M_1 . Isso significa que M_2 só será iniciada após a completa extinção do curto-circuito, ou seja, no instante em que M_1 enviar um sinal indicando que o curto-circuito findou-se.

Imediatamente após o término da falta, as amostras das tensões do lado da fonte e da linha são convertidas para o domínio modal, visando facilitar a manipulação dos dados, cujo comportamento é descrito por sinais senoidais.

De posse das tensões modais, é incorporado o algoritmo de detecção de passagens por zero. Sendo assim, realiza-se o produto de duas amostras consecutivas da tensão modal definidas por v' e v'' (Figura 3.5), cujo resultado deve ser negativo na ocorrência de uma passagem por zero.

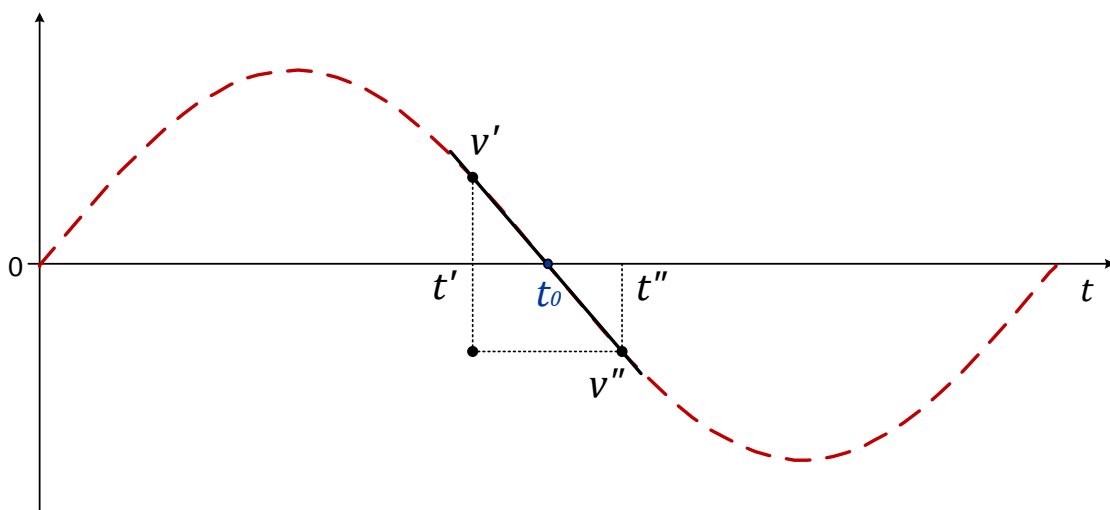


Figura 3.5 – Detecção da passagem por zero de um sinal de tensão modal.

Dada a Figura 3.5, define-se o momento em que o módulo da tensão no domínio modal atinge um valor equivalente a zero (t_0), tal como enunciado pela equação (3.4).

$$t_0 = t' - \left[\frac{v'(t' - t'')}{(v' - v'')} \right] \quad (3.4)$$

Onde:

v' e v'' – Amostras consecutivas da tensão no domínio modal, consideradas imediatamente próximas ao instante de passagem por zero.

t' e t'' – Intervalo de tempo no qual duas amostras consecutivas da tensão modal encontram-se mais próximas de t_0 .

A próxima etapa consiste em estimar a amplitude das tensões modais da linha de transmissão e da barra do terminal líder por meio da obtenção no máximo valor absoluto entre as duas últimas passagens por zero ($V_{(n)}$), de acordo com a Figura 3.6, cujos valores são atualizados quando ocorrerem novas passagens por zero.

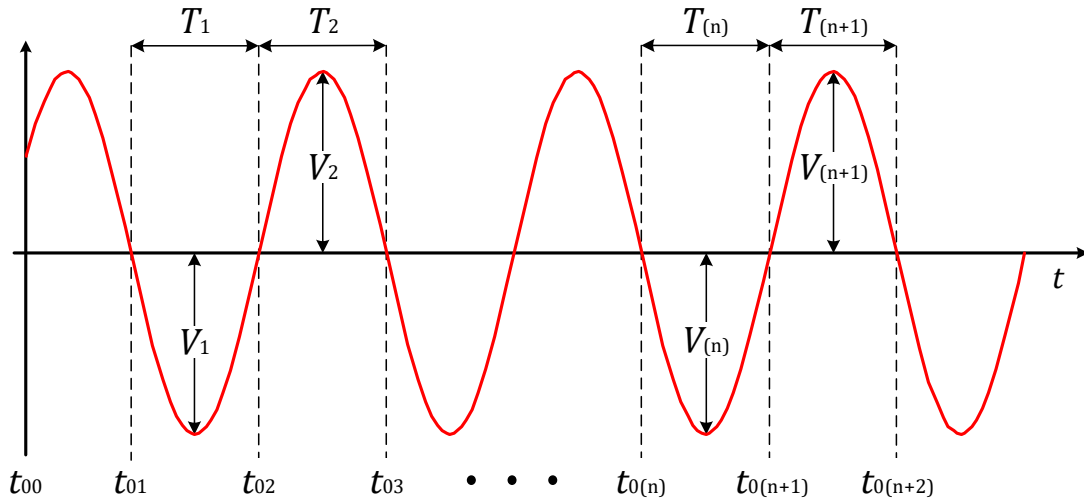


Figura 3.6 – Estimativa da amplitude e período dos sinais de tensão no domínio modal.

Do exposto, define-se a expressão da frequência no domínio modal, em consonância com (3.5), considerando a média aritmética dos valores a cada três passagens por zero, os quais são renovados quando há novos cruzamentos pelo eixo do tempo.

$$f_{mod} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2T_{(n)}} + \frac{1}{2T_{(n+1)}} \right) \quad (3.5)$$

Onde:

$T_{(n)}$ – Período definido entre dois instantes de passagem por zero.

Da Figura 3.6, infere-se que o ponto definido por t_{00} corresponde ao momento no qual o curto-circuito foi extinto. Após três passagens por zero (t_{03}), inicia-se o processo de extrapolação dos sinais, os quais são estimados em instantes futuros considerando os valores de frequência e amplitude supracitados. A expressão que representa a tensão extrapolada, relativa aos modos 1 e 0, é apresentada em (3.6), em conformidade com a referência [13].

$$v_{mod}(t) = V_{(n)} \times \text{sen}[2\pi f_{mod}(t + T_{\text{operação}})] \quad (3.6)$$

Onde:

$V_{(n)}$ – Máximo valor absoluto da tensão entre duas passagens por zero;

f_{mod} – Frequência modal ($mod = 0, 1$);

$T_{\text{operação}}$ – Tempo de operação típico do disjuntor.

Para fins de simulação, considerou-se um tempo de operação do disjuntor típico de 50 ms [24], o qual foi utilizado para melhor representar o comportamento da chave no sistema simulado.

Definidas as tensões modais, os sinais são agrupados visando compor apenas duas amostras para cada fase, uma a montante e outra a jusante do disjuntor. Isto posto, as tensões são extrapoladas durante um intervalo máximo de 100 ms, cujo processo é interrompido quando forem encontrados três instantes apropriados para o fechamento de cada polo.

Com o propósito de reconhecer os intervalos favoráveis para o religamento da linha de transmissão, identifica-se, primeiramente, a região em que a tensão entre os contatos do disjuntor é nula, isto é, o momento em que os sinais extrapolados da linha e da barra se interceptam. De posse dos instantes supracitados, efetua-se o produto das derivadas dos sinais, afim de determinar os intervalos em que ambos possuem a mesma inclinação. Elucida-se em [13] que os instantes apropriados para o chaveamento ocorrem quando o produto das derivadas resulta em um valor positivo, período este em que o sinal descreve sua menor pulsação.

A Figura 3.7 apresenta a forma de onda das tensões extrapoladas do lado da linha de transmissão e do lado da fonte, com intuito de representar o instante ótimo para o fechamento de um dos polos do disjuntor. O intervalo de cruzamento definido por t_{c2} é considerado ideal para o religamento da linha, enquanto t_{c1} não corresponde a um instante apropriado para o chaveamento, isto porque a inclinação de ambas as retas possuem sentido contrário.

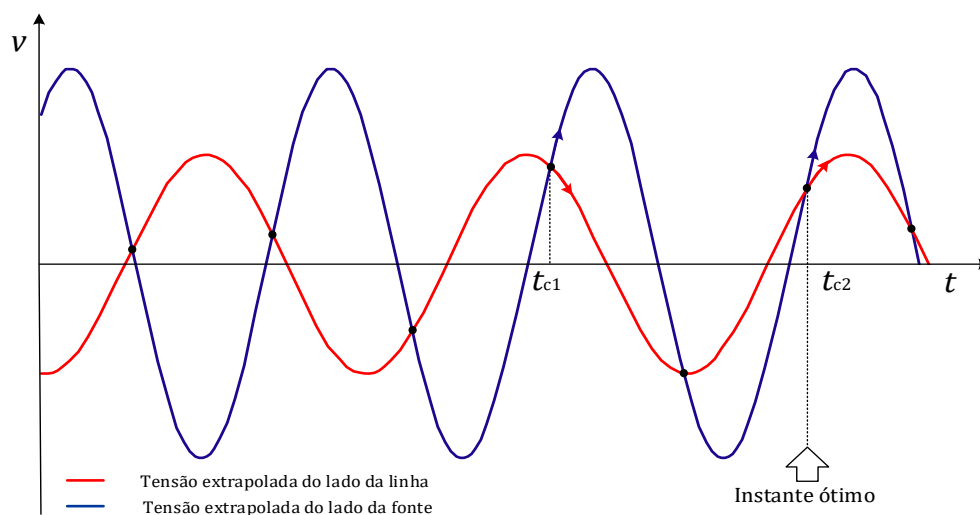


Figura 3.7 – Formas de onda das tensões extrapoladas a montante e jusante do disjuntor.

Definidos três momentos ótimos para o chaveamento dos contatos do disjuntor, classifica-se apenas um instante ideal para cada polo mediante a análise do acoplamento

eletromagnético entre as fases. Neste contexto, observa-se o menor intervalo de fechamento entre o primeiro e o último polo, ambicionando reduzir eventuais desvios no comportamento do sinal após a manobra da primeira fase.

Sendo assim, três sinais são enviados para os disjuntores conectados aos terminais da linha de transmissão, cujo tempo de manobra é distinto para cada fase e dependente das etapas supracitadas. Com o propósito de conectar a MODELS M_2 aos demais componentes no ambiente ATPDraw utilizaram-se três chaves TACS, as quais foram responsáveis pela recepção do sinal de controle no instante apropriado para o religamento de cada fase.

Por fim, o diagrama da Figura 3.8 ilustra a configuração final adotada para a operação adequada do algoritmo de controle no sistema implantado. Inicialmente, considerando a extinção do curto-circuito, entende-se que os disjuntores da linha (DJ1 e DJ2) encontram-se na condição aberta, os quais são controlados pela MODELS M_2 . No diagrama, R1 e R2 representam os reatores de compensação da linha em questão.

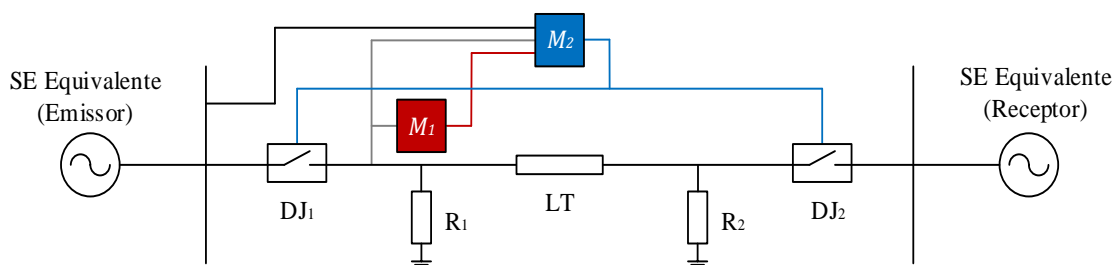


Figura 3.8 – Diagrama esquemático do sistema elétrico submetido ao chaveamento controlado.

Implementado o algoritmo do chaveamento controlado no simulador ATP, o capítulo subsequente consiste em analisar a eficácia da metodologia por meio de simulações computacionais em um sistema elétrico real, responsável pela transmissão de energia elétrica nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

CAPÍTULO IV

ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Capítulo II, foi apresentada a metodologia proposta em [13], tencionando explorar os fundamentos de uma técnica para o chaveamento controlado de linhas de transmissão providas de compensação reativa em derivação e submetidas a curtos-circuitos de naturezas diversas. O desempenho do método ora referido foi verificado no RTDS™, o qual se apresenta como uma ferramenta exímia no tocante a análise de sistemas elétricos sujeitos a inúmeras adversidades operativas.

Com o propósito de apresentar uma alternativa de menor custo para os estudos de desempenho da metodologia desenvolvida em [13], foi implementado no simulador ATP o algoritmo responsável pelo chaveamento controlado de uma linha de transmissão que interliga as regiões Norte e Nordeste do Brasil, fazendo uso da linguagem MODELS, em consonância com a temática discutida no capítulo anterior.

Vale ressaltar que a aplicação do religamento rápido e controlado deve ser precedida de um estudo do comportamento dinâmico da rede, em virtude da manutenção da estabilidade eletromecânica das máquinas síncronas presentes no sistema [42].

Do exposto, objetivando verificar o desempenho da metodologia supramencionada, este capítulo apresenta a parametrização do sistema simulado para a realização dos estudos de caso e análise crítica dos resultados na ocorrência de curtos-circuitos na linha de transmissão, ambicionando atenuar possíveis sobretensões transitórias que afetam a qualidade da energia do sistema elétrico.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

No ano de 2006, sob a coordenação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), foi elaborado um estudo no qual constatou-se a necessidade de ampliar a interligação Norte e Nordeste do Brasil, afim de aumentar a capacidade de transferência de energia entre estas regiões. A ampliação basear-se-ia na implantação do segundo circuito da linha de transmissão de 500 kV que interligaria Colinas e São João do Piauí, passando por Ribeirão Gonçalves, e da linha de 500 kV que agregaria São João do Piauí e Milagres. A Figura 4.1, extraída da referência [13], mostra a ampliação proposta, a qual já se encontra em operação.

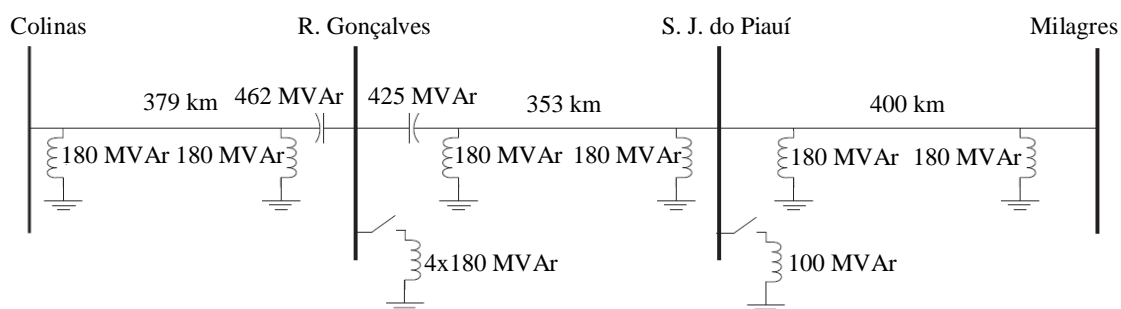


Figura 4.1 – Ampliação da interligação Norte – Nordeste que se encontra em operação.

O arranjo do sistema elétrico implementado no simulador ATP coincide com a configuração apresentada no mapa eletrogeográfico da região de interesse, no qual se encontra a proposta de expansão supracitada, em conformidade com a Figura 4.2 [43].

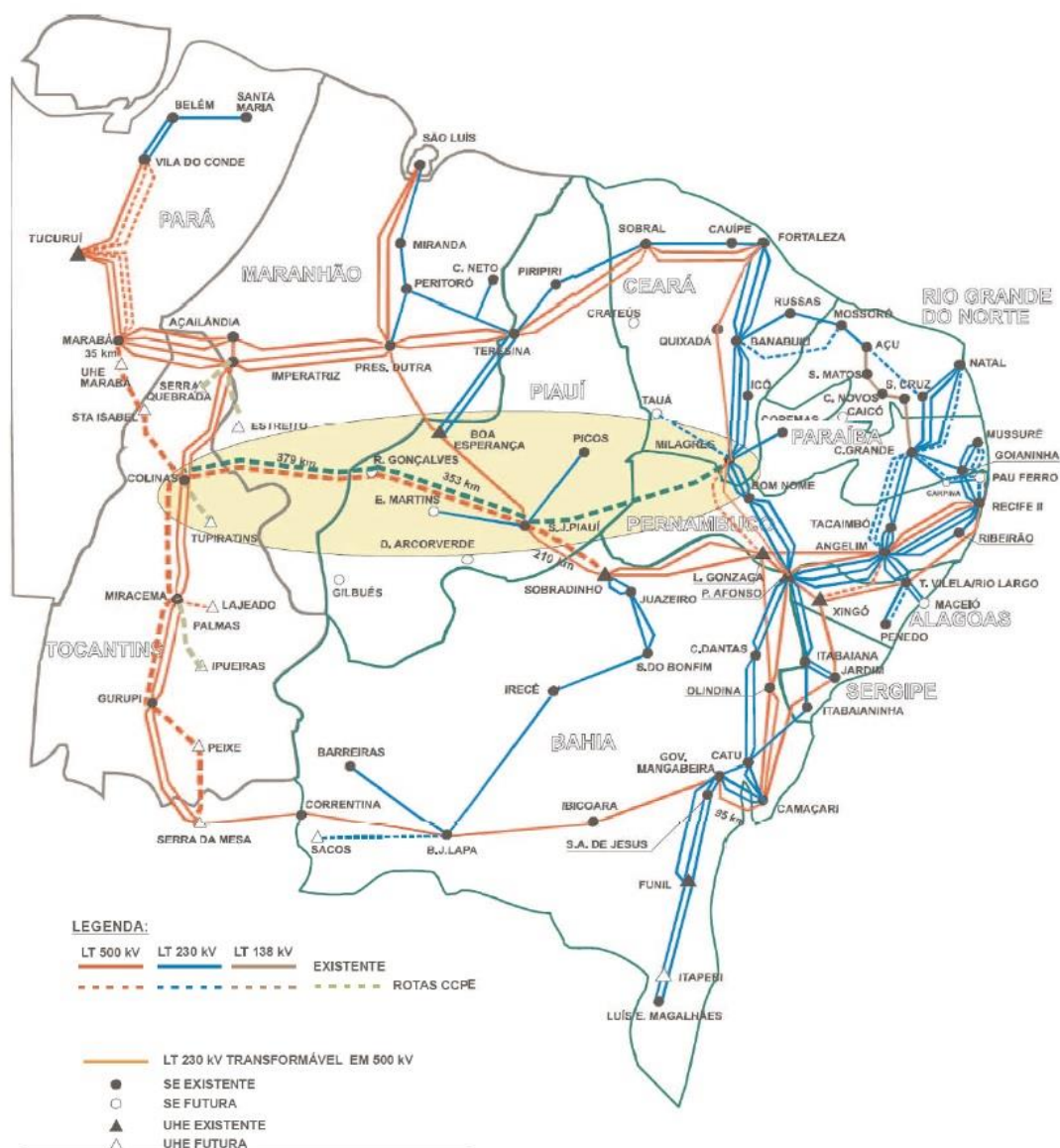


Figura 4.2 – Mapa eletrogeográfico da região de interesse contendo o plano de expansão.

Com o propósito de elucidar o desempenho do método implementado, optou-se pela análise do sistema em sua condição mais crítica, tendo por foco a parametrização da linha de transmissão em 500 kV que interliga Milagres à São João do Piauí, na qual

desenvolveu-se a lógica de controle. A modelagem do sistema externo foi feita por meio do equivalente de Thévenin, onde as fontes de tensão foram ajustadas para fornecer uma tensão próxima à 550 kV na barra de Milagres, que é a máxima tensão operativa definida para um sistema elétrico em 500 kV [42]. A Figura 4.3 expõe o diagrama unifilar da configuração implementada no simulador ATP, cujos parâmetros encontram-se subsequentemente listados em conformidade com os dados disponibilizados pela referência [13].

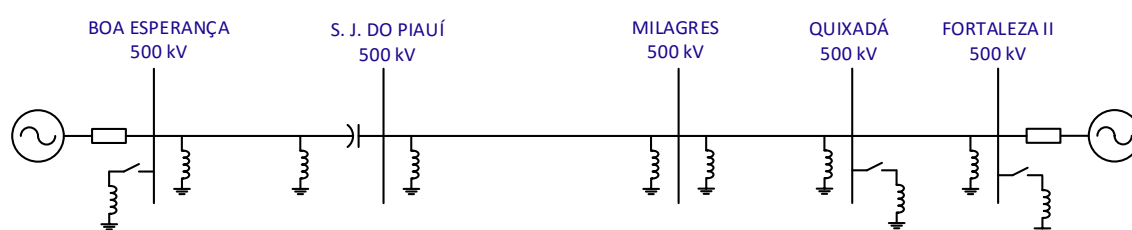


Figura 4.3 – Diagrama unifilar da configuração implementada.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros de sequência positiva e zero das linhas de transmissão de 500 kV.

Tabela 4.1 – Parâmetros elétricos das linhas de transmissão.

Linha de Transmissão	Sequência Positiva			Sequência Zero			Comp. (km)
	R_1 (Ω/km)	X_1 (Ω/km)	Y_1 ($\mu\text{U}/\text{km}$)	R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)	Y_0 ($\mu\text{U}/\text{km}$)	
Fortaleza II – Quixadá	0,0260	0,2820	5,8770	0,2230	0,9000	3,4100	137,8
Quixadá – Milagres	0,0260	0,2820	5,8810	0,2420	0,8720	3,4480	268,7
Milagres – S. J. Piauí	0,0186	0,2670	6,1240	0,4930	1,3390	2,8900	400,0
S. J. Piauí – B. Esperança	0,0246	0,3219	5,1200	0,3763	1,4110	3,0640	233,8

A Tabela 4.2 exibe as propriedades elétricas e a potência nominal dos reatores de compensação das linhas de transmissão, considerando a tensão base em 500 kV.

Tabela 4.2 – Parâmetros elétricos dos reatores de linha na base de 500 kV.

Linha de Transmissão	Subestação	Potência (MVar)	X_0/X_1
Fortaleza II – Quixadá	Fortaleza II	150	-
Quixadá – Milagres	Quixadá	150	-
Quixadá – Milagres	Milagres	150	-
Milagres – S. J. Piauí	Milagres	180	-
Milagres – S. J. Piauí	S. J. Piauí	180	-
S. J. Piauí – B. Esperança	S. J. Piauí	100	1,70
S. J. Piauí – B. Esperança	B. Esperança	100	1,73

A potência nominal e as características elétricas dos reatores presentes nas barras das subestações são fornecidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros elétricos dos reatores de barra.

Subestação	V_{base} (kV)	Potência (MVar)	X_0/X_1
Fortaleza II	500	100	1,0
Quixadá	500	150	1,0
B. Esperança	500	105	1,0

A reatância percentual do capacitor conectado em série com a linha de transmissão que interliga as localidades de São João do Piauí e Boa Esperança encontra-se destacada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Reatância percentual do capacitor série.

Linha de Transmissão	Subestação	Reatância (%)
S. J. Piauí - Boa Esperança	S. J. Piauí	2,11

A Tabela 4.5 exibe o valor da impedância equivalente de Thévenin, de sequência positiva e zero, vista das gerações às barras das subestações.

Tabela 4.5 – Impedância equivalente de Thévenin (configuração – 2009).

Subestação	Sequência Positiva		Sequência Zero	
	$R_1 (\Omega)$	$X_1 (\Omega)$	$R_0 (\Omega)$	$X_0 (\Omega)$
Fortaleza II	3,90	106,61	1,98	24,49
Boa Esperança	0,41	273,33	7,79	100,94

Diante dessa conjuntura, o tópico subsequente contemplará a análise de desempenho da metodologia implementada, objetivando reduzir os efeitos das sobretensões de manobras de um dos trechos pertinente ao sistema elétrico em foco.

4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA

De posse dos parâmetros supramencionados, realizou-se a modelagem do sistema elétrico no ambiente ATPDraw, em conformidade com a configuração estabelecida na Figura 4.3 atrelada ao tópico precedente.

A Figura 4.4 apresenta um trecho do sistema elétrico, destacando a linha de transmissão de 400 km que interliga Milagres e São João do Piauí, na qual desenvolveu-se o controle para o chaveamento considerando Milagres como terminal líder, por vezes denominada por barra ou terminal emissor. A linha foi modelada análoga a um arranjo de transposição contínua, com parâmetros distribuídos e invariáveis com a frequência.

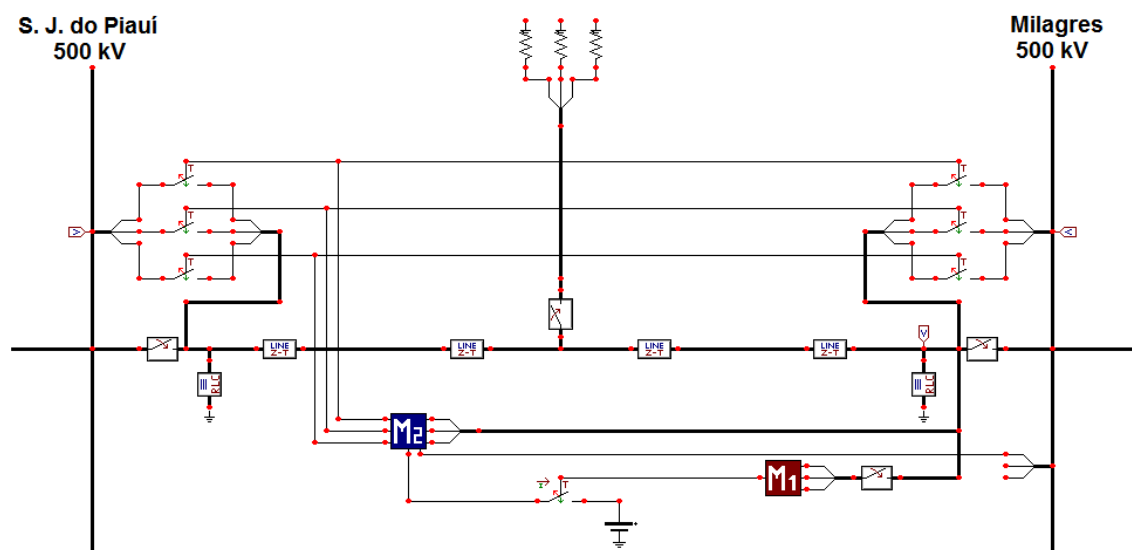


Figura 4.4 – Implementação da interligação Milagres - S. J. Piauí no ATPDraw.

No total, 1080 simulações de faltas fase-terra e fase-fase-terra foram realizadas, admitindo diferentes anomalias operativas, as quais contemplaram as seguintes condições:

- Diferentes intervalos de duração da falta;
- Curtos-circuitos em três pontos diferentes da linha de transmissão localizados à 3/4, à 1/2 e à 1/4 do terminal líder;
- Diferentes valores impostos para a impedância de falta, considerando resistências de 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω , 200 Ω e 500 Ω , respectivamente;
- Condições ideais e não ideais de operação do sistema, assumindo desequilíbrios de tensão da ordem de 0%, 1%, 2% e 3%.

Dessarte, a análise da eficácia da metodologia do chaveamento controlado fragmentou-se em duas etapas, a primeira responsável pelo estudo da resposta do algoritmo de controle posterior à ocorrência de curtos-circuitos fase-terra, e a segunda, incumbida de observar o desempenho do religamento rápido e controlado após a incidência de faltas fase-fase-terra.

4.3.1 Religamento Sob a Ação de Curtos-circuitos Fase-terra

Nesta etapa, foram simulados 540 curtos-circuitos fase-terra dos tipos AT, BT e CT, objetivando analisar possíveis falhas na determinação do tempo de duração da falta e identificar picos de tensão não desejados após atuação do controle. Sobretensões superiores a 1,8 p.u. foram admitidas como falhas na performance do algoritmo de controle, em função dos limites impostos pelos surtos de manobras em sistemas de 500 kV [2].

Basicamente, distintas condições operativas foram pré-estabelecidas para a realização das simulações. Sob o ponto de vista do sistema, foram admitidos diferentes percentuais de desequilíbrio de tensão gerados por uma fonte localizada próxima à barra de Milagres. Assim procedendo, o processo avaliativo contempla a análise do algoritmo de controle em realizar o chaveamento controlado de forma eficiente, mesmo em condições não ideais de operação do sistema elétrico. Esta avaliação se apresenta com aspecto diferenciado em relação aos trabalhos anteriores, os quais, através dos levantamentos bibliográficos e constatações prezam por estudos sob condições ideais.

A Tabela 4.6 exibe o número de simulações geradas considerando os percentuais de desequilíbrios impostos pela rede.

Tabela 4.6 – Número de simulações de faltas fase-terra para cada percentual de desequilíbrio imposto.

Percentual de Desequilíbrio	Nº de Simulações
0%	135
1%	135
2%	135
3%	135
Total	540

Para cada percentual de desequilíbrio do sistema, foram geradas simulações envolvendo diferentes impedâncias de falta, abrangendo valores de 1 Ω à 500 Ω , arbitrariamente.

A presente metodologia do religamento rápido e controlado parte do pressuposto que os dispositivos de proteção convencionais são capazes de detectar e classificar a incidência de curtos-circuitos na linha de transmissão, ocasionando a sua abertura imediata. Tipicamente, tais equipamentos possuem uma certa fragilidade em detectar faltas de alta impedância, impossibilitando o desligamento da linha [44], [45]. Neste particular, o religamento controlado não seria aplicado, justificando, inicialmente, a escolha do limite de impedância supra referido.

A Tabela 4.7 expõe o desempenho do algoritmo de controle para cada valor da impedância de falta, considerando os diferentes percentuais de desequilíbrio do sistema sob análise.

Tabela 4.7 – Desempenho do algoritmo de controle no processo de religamento após a extinção de defeitos fase-terra.

Percentual de Desequilíbrio	Z_f (Ω)	Sobretensão Média (p.u.)	Eficácia no Processo do Religamento (%)
0%	1	1,38	100,00
	10	1,37	100,00
	100	1,35	100,00
	200	1,35	100,00
	500	1,36	51,85
1%	1	1,39	100,00
	10	1,38	100,00
	100	1,36	100,00
	200	1,35	100,00
	500	1,37	44,44
2%	1	1,38	100,00
	10	1,38	100,00
	100	1,35	100,00
	200	1,35	100,00
	500	1,38	48,15
3%	1	1,38	100,00
	10	1,37	100,00
	100	1,36	100,00
	200	1,35	100,00
	500	1,39	48,15

Os resultados ratificam a eficácia da metodologia para o chaveamento de linhas sob a ação de curtos-circuitos fase-terra, sobretudo, para valores da impedância de falta de 1 Ω à 200 Ω . Os picos de tensão foram mantidos abaixo de 1,40 p.u., favorecendo a reinserção da linha de transmissão de forma eficiente. Em alguns casos, a impedância de 500 Ω acarretou fragilidades na detecção do intervalo de duração dos curtos-circuitos, provocando o religamento da linha de transmissão antes da completa extinção do defeito. É importante ressaltar que, em se tratando de uma situação real, tais fragilidades não

provocarão a depreciação da metodologia, já que impedâncias de falta superiores a 500 Ω não são comumente observadas na prática.

No que tange ao local da incidência do curto-circuito, a Tabela 4.8 ilustra o desempenho do algoritmo de controle implementado, cujo maior percentual de erro ocorreu nas ocasiões em que as faltas se estabeleceram no meio da linha de transmissão, enquanto os menores registros de falhas foram observados na submissão de defeitos localizados à 3/4 do terminal líder.

Tabela 4.8 – Desempenho do algoritmo de controle em função do local da incidência de curtos-circuitos do tipo fase-terra.

Distância da Falta ao Terminal Líder	Percentual de Falhas no Religamento (%)
1/4	25,00
1/2	51,79
3/4	23,21
Total	100,00

Para elucidar o desempenho da lógica de controle, considerou-se a manifestação de uma falta ao meio da linha de transmissão, envolvendo a fase C e a terra, como indicado na Figura 4.4. Para o referido estudo foi admitido que o sistema opera com tensão puramente senoidal e que a impedância de falta tem valor equivalente a 10 Ω .

A Figura 4.5 apresenta o comportamento da tensão na fase C da linha de transmissão e os limites do coeficiente de determinação R^2 na presença do curto-circuito estabelecido em 0,1 s. O cálculo do R^2 inicia-se no instante de 0,2 s, quando os disjuntores da linha são abertos. Nota-se que, após 0,45 s, o fator R^2 assume valores próximos a zero, evidenciando a extinção da falta.

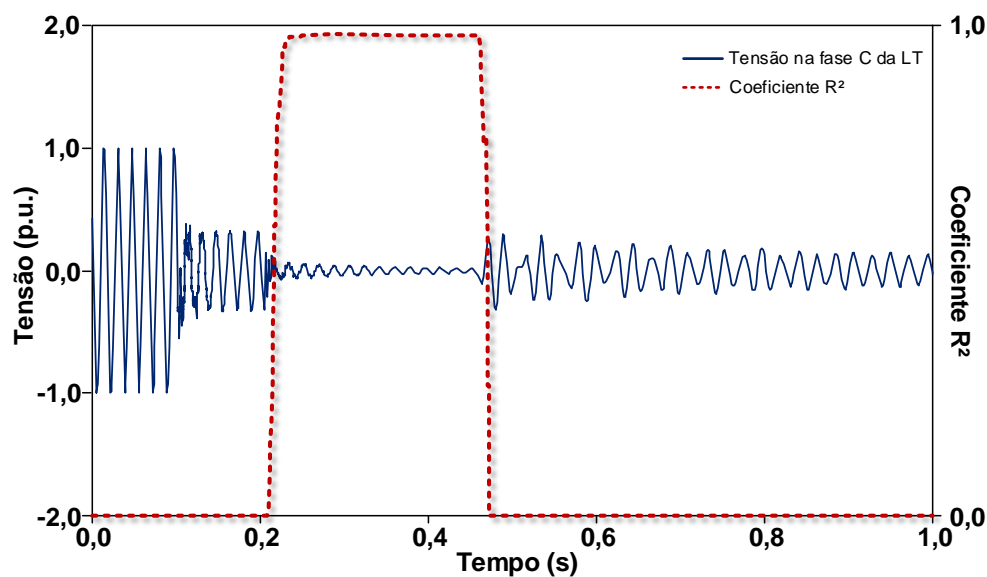


Figura 4.5 – Forma de onda da tensão na fase C da linha de transmissão e determinação do intervalo de duração do curto-circuito pelo coeficiente R^2 – falta fase-terra.

Os efeitos da atuação do controle podem ser observados na Figura 4.6, na qual são apresentadas as tensões trifásicas na barra de Milagres durante um período de 1 s, cujos instantes de manobra ocorreram em 609 ms (fase C), 612 ms (fase B) e 625 ms (fase A), respectivamente.

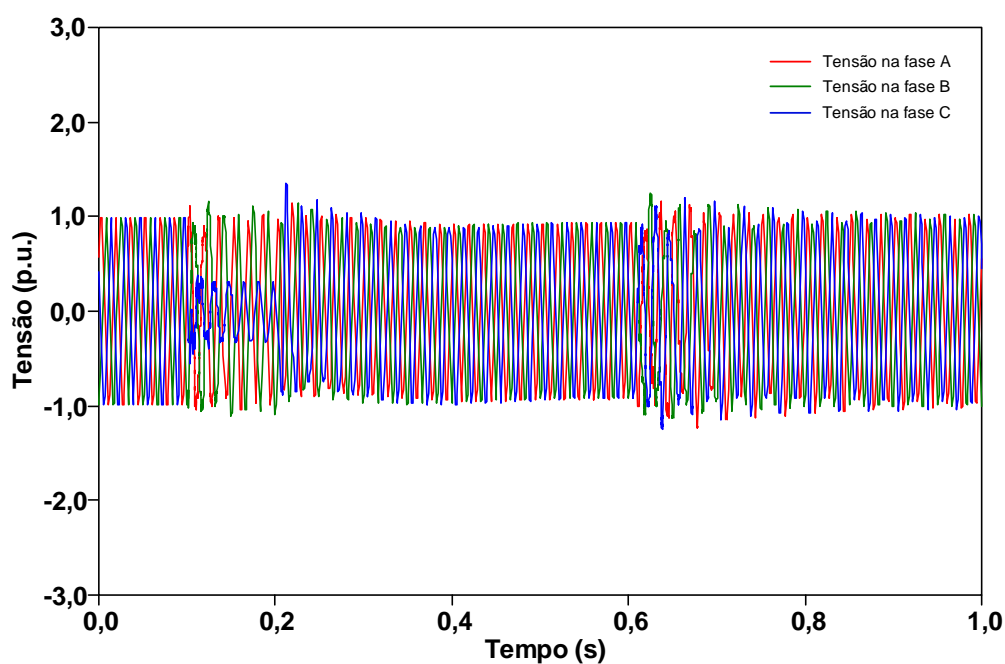


Figura 4.6 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-terra com religamento controlado.

A Figura 4.7 exibe, para fins ilustrativos, o comportamento trifásico da tensão na barra de Milagres devido a uma manobra genérica ocorrida em um tempo morto próximo à 500 ms, sem o emprego do controle otimizado.

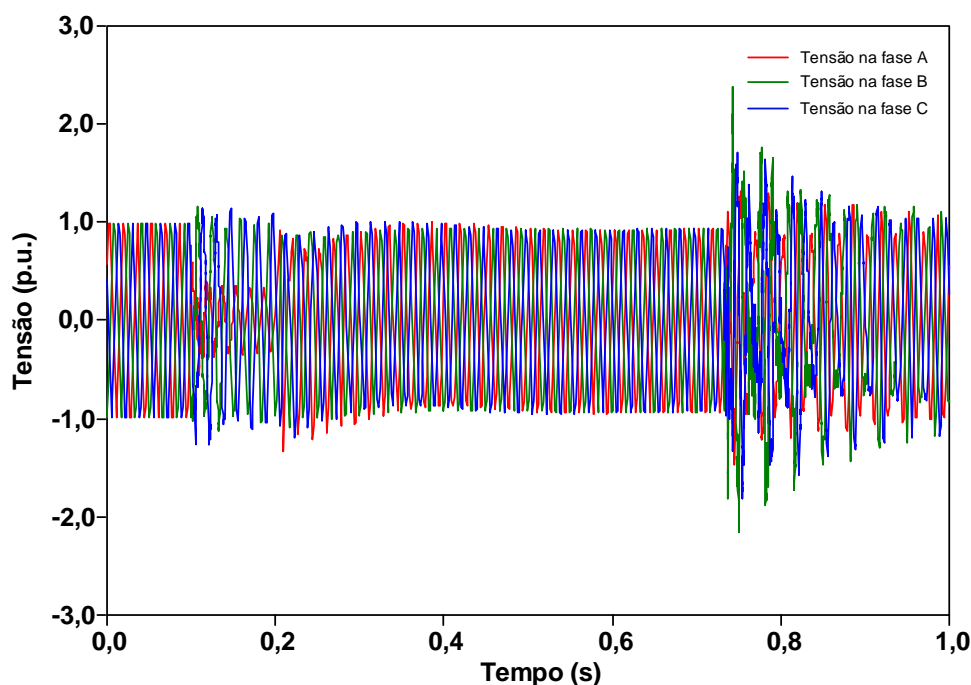


Figura 4.7 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-terra sem religamento controlado.

Comparando-se os resultados da Figura 4.6 com os da Figura 4.7, é notória a eficácia do mecanismo aqui explorado. De fato, quando da ausência de meios para o chaveamento controlado, as tensões atingiram valores de pico próximos a 2,40 p.u., enquanto que a utilização da estratégia apresentada conduziu a picos da ordem de 1,26 p.u.

Adicionalmente, ressalta-se que a aplicação da metodologia ora posta possibilita o religamento controlado em um tempo morto inferior a 500 ms, fato este que não pode ser contemplado em uma manobra de religamento automático. Sendo assim, o tempo de interrupção da energia, após a ocorrência de faltas na linha de transmissão, pode ser reduzido, acarretando no aumento de confiabilidade do sistema.

4.3.2 Religamento Sob a Ação de Curtos-circuitos Fase-fase-terra

Ambicionando a validação da metodologia do chaveamento controlado no que tange aos curtos-circuitos fase-fase-terra, foram desenvolvidas 540 simulações de faltas envolvendo as fases AB, BC e AC do complexo de transmissão ilustrado na Figura 4.4. Valores de pico da tensão na barra do terminal líder superiores à 1,8 p.u., após a atuação do controle, foram vistos como resultado de falhas no processo do religamento, em função das argumentações previamente estabelecidas.

Similarmente ao procedimento adotado para o estudo de desempenho da lógica de controle sob a ação de curtos-circuitos fase-terra, diversos percentuais de desequilíbrios foram impostos ao sistema elétrico, visando estimar os religamentos bem-sucedidos na presença de tais distúrbios.

A Tabela 4.9 exibe o número de simulações geradas considerando os percentuais de desequilíbrios impostos pela rede.

Tabela 4.9 – Número de simulações de faltas fase-fase-terra para cada percentual de desequilíbrio imposto.

Percentual de Desequilíbrio	Nº de Simulações
0%	135
1%	135
2%	135
3%	135
Total	540

Em tais condições operativas considerou-se diferentes impedâncias de falta, abrangendo valores de 1 Ω à 500 Ω , arbitrariamente.

A Tabela 4.10 exibe a performance do controle para cada valor da impedância de falta, considerando os diferentes percentuais de desequilíbrio do sistema em foco.

Tabela 4.10 – Desempenho do algoritmo de controle no processo de religamento após a extinção de defeitos fase-fase-terra.

Percentual de Desequilíbrio	Z_f (Ω)	Sobretensão Média (p.u.)	Eficácia no Processo do Religamento (%)
0%	1	1,50	100,00
	10	1,59	100,00
	100	1,59	92,59
	200	1,57	100,00
	500	-	0,00
1%	1	1,50	100,00
	10	1,56	85,19
	100	1,58	100,00
	200	1,57	100,00
	500	-	0,00
2%	1	1,50	100,00
	10	1,58	92,59
	100	1,60	92,59
	200	1,58	100,00
	500	-	0,00
3%	1	1,51	100,00
	10	1,59	92,59
	100	1,60	96,30
	200	1,58	100,00
	500	-	0,00

De posse dos resultados supramencionados constata-se que o algoritmo de controle apresenta desempenho satisfatório para o chaveamento de linhas submetidas à faltas fase-fase-terra, com exceção de defeitos que envolvam impedâncias de falta igual ou superior à 500 Ω . Nestas condições, o controle foi incapaz de determinar o intervalo

de duração da falta, em função do comportamento das tensões trifásicas do sistema, as quais não sofrem mudanças significativas durante e após o término do curto-circuito. Para os casos de sucesso, a média das sobretensões de pico foram mantidas à 1,60 p.u., cujo valor encontra-se abaixo dos limites estabelecidos para a classe de tensão de 500 kV.

No tocante ao desempenho da lógica de controle em função do local de incidência da falta, observa-se um percentual de falhas similar para os três pontos analisados, cujo maior valor corresponde aos curtos-circuitos localizados a 1/4 do terminal líder, tal como mostra a Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Desempenho do algoritmo de controle em função do local da incidência de curtos-circuitos do tipo fase-fase-terra.

Distância da Falta ao Terminal Líder	Percentual de Falhas no Religamento (%)
1/4	35,54
1/2	32,23
3/4	32,23
Total	100,00

Com o intuito de verificar os efeitos do chaveamento controlado, foi incorporada uma falta fase-fase-terra com impedância de 1 Ω e localizada a 3/4 do terminal de Milagres (Figura 4.4). O cálculo do coeficiente de determinação se estabelece em 0,2 s, quando os disjuntores da linha sofrem abertura tripolar. A Figura 4.8 apresenta o comportamento do R^2 para um curto-circuito BCT iniciado em 0,1 s e extinto em 0,45 s, momento no qual a fase B se reestabelece, permanecendo apenas a fase C e a terra até o instante de 0,6 s.

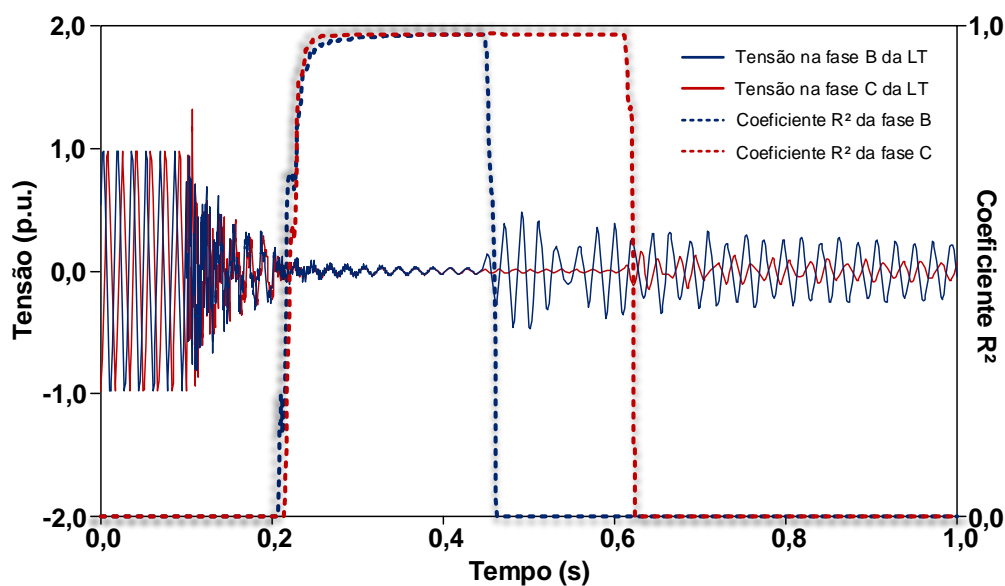


Figura 4.8 – Forma de onda da tensão nas fases B e C da linha de transmissão e determinação do intervalo de duração do curto-circuito pelo coeficiente R^2 – falta fase-fase-terra.

Em consonância com os procedimentos previamente estabelecidos, a Figura 4.9 apresenta o comportamento das tensões trifásicas na barra de Milagres ao longo do processo, considerando a manobra em 751 ms (fase C), 754 ms (fase B) e 757 ms (fase A), respectivamente.

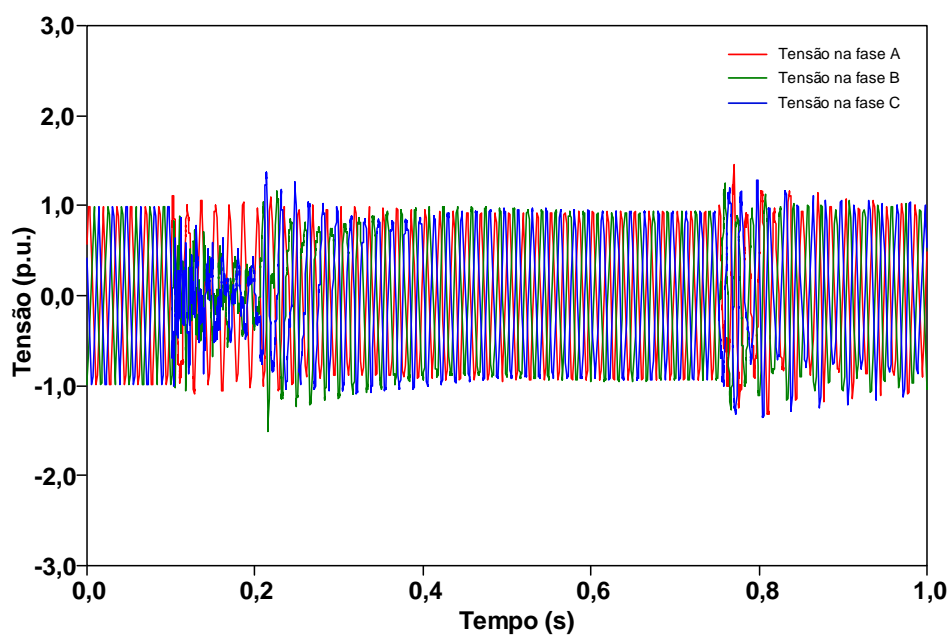


Figura 4.9 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-fase-terra com religamento controlado.

Por fim, a Figura 4.10 ilustra o comportamento das tensões na barra de Milagres após o religamento da linha de transmissão na ausência da lógica de controle, considerando um tempo morto típico de 500 ms após a abertura dos disjuntores.

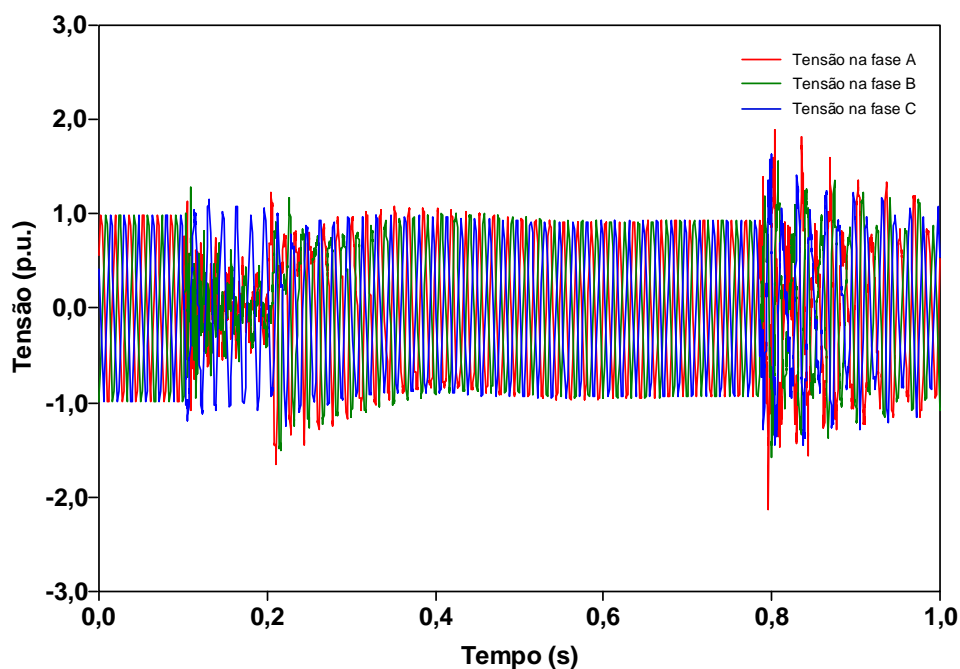


Figura 4.10 – Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-fase-terra sem religamento controlado.

Mais uma vez, nota-se uma redução substancial das sobretensões quando da utilização do chaveamento controlado. De fato, sem a implementação da estratégia proposta, as sobretensões atingem amplitudes próximas a 2,14 p.u., contra cerca de 1,46 p.u. na presença da lógica do chaveamento controlado.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado apresentou-se imbuída do propósito da investigação do estado da arte sobre o tema conhecido por chaveamento controlado, focando, especificamente, os fenômenos transitórios atrelados com as ações de religamento praticadas nas redes elétricas.

Somado a uma visão geral sobre os procedimentos em uso no mundo e apresentados seus fundamentos e limitações, o trabalho foi direcionado à apresentação dos princípios, formulação matemática, implementação computacional e realização de estudos investigativos da estratégia do chaveamento controlado. Visando delimitar os níveis dos fenômenos transitórios próprios das instalações e equipamentos, o mecanismo ora referido tem sido considerado com maior ênfase nos últimos tempos, principalmente diante de novos recursos tecnológicos e meios físicos para sua implementação em campo.

Neste contexto, uma vez apresentadas as distintas possibilidades mitigatórias no capítulo introdutório, destacando-se o uso de resistores de pré-inserção e para-raios de óxido metálico, estabeleceu-se como meta a aplicação e avaliação de uma técnica baseada em chaveamentos controlados.

Para consubstanciar o método, no que tange aos fundamentos físicos, matemáticos e computacionais, foram conduzidos trabalhos para o embasamento teórico da

problemática ora observada, com destaque às peculiaridades do fenômeno sob estudo na submissão de curtos-circuitos de naturezas diversas. O comportamento regido por estes distúrbios permitiu determinar as possibilidades de aplicações e limitações da metodologia em foco.

Uma vez estabelecidas as bases para o processo, estes fundamentos se apresentaram como cerne dos trabalhos computacionais que foram desenvolvidos no simulador ATP. Dentro desse contexto, destacaram-se os aspectos atrelados às ferramentas utilizadas para a implementação do algoritmo de controle no simulador, cujos elementos essenciais foram desenvolvidos por meio da linguagem MODELS.

A partir dos recursos obtidos procedeu-se, na sequência, a definição de um sistema teste, nos termos apresentados no trabalho. Neste particular, optou-se pela utilização de um complexo de transmissão pertencente ao SIN, referente à interligação Norte-Nordeste da Chesf. Diante deste grande cenário, no tocante à rede de transmissão ora mencionada, foi selecionado um trecho do sistema o qual já foi objeto de estudos em trabalhos precedentes. Isto se justificou, sobremaneira, pela existência de uma base de dados e resultados atrelados ao tema ora explorado, propiciando, assim, meios para uma pronta correlação entre os resultados aqui obtidos e os advindos de outras fontes de informação.

Quanto aos estudos realizados, limitaram-se às investigações de religamentos atrelados com a manifestação de curtos-circuitos fase-terra e fase-fase-terra, devido às limitações impostas pela metodologia utilizada, como ressaltado ao longo do trabalho. Dentro deste universo, foram realizadas 1080 simulações no programa ATP, envolvendo os curtos-circuitos supramencionados, ambicionando validar computacionalmente a metodologia.

Visando ampliar os horizontes dos estudos, os trabalhos de simulação, além das caracterizações supra postas quanto a natureza dos curto-circuitos, também

compreenderam diversificações atreladas com o posicionamento físico da falta ao longo da linha de transmissão, às variações das respectivas impedâncias de falta e, por fim, à manifestação de eventuais desequilíbrios na rede elétrica. Este conjunto de fatores de influência visaram, sobretudo, a constatação da robustez da metodologia diante de situações adversas, contrárias àquelas normalmente idealizadas nos estudos, como tradicionalmente feito em trabalhos anteriores ao presente.

No que tange às investigações conduzidas, os resultados obtidos evidenciaram que para os curtos-circuitos fase-terra com impedância de falta igual a $500\ \Omega$, mais de 50% dos casos apresentou erro no processo do religamento controlado, cujo percentual pode ser incrementado quando a rede se encontra desequilibrada, inviabilizando a aplicação da técnica em linhas submetidas aos defeitos de relativa alta impedância. A aplicação da estratégia de controle, na ocorrência de defeitos fase-fase-terra com impedância de falta equivalente a $500\ \Omega$, implicou em 100% de falhas no processo do religamento, em virtude das fragilidades na detecção de curtos-circuitos de elevada resistência de defeito. No entanto, de modo geral, o desempenho do controle para baixos valores da impedância de falta e comportamento equilibrado da rede apresentou um elevado percentual de eficiência, sobretudo, na manifestação de faltas monofásicas aterradas as quais não resultaram em falhas no processo do religamento, fato este determinante para a indicação das perspectivas de aplicação do método em foco.

Não obstante aos resultados positivos evidenciados até o momento, há de se reconhecer que a estratégia carece de maiores investigações e adaptações para consolidar sua aplicação em sistemas reais. Em assim sendo, como trabalhos futuros destaca-se a necessidade de:

- Implementar uma estratégia para o tratamento de defeitos trifásicos e bifásicos não aterrados, visando ampliar as possibilidades de aplicação da técnica sob estudo;
- Avaliar o desempenho da metodologia no tocante a implementação de sistemas elétricos reais, considerando outros fatores de influência sobre o processo utilizado, a exemplo da presença das distorções harmônicas e níveis mais acentuados de desequilíbrios de tensão;
- Utilização de outros meios laboratoriais para a ratificação das constatações aqui obtidas sob condições não ideais de operabilidade da rede, a exemplo dos simuladores em tempo real e outros recursos experimentais em escala reduzida;
- Avaliar a performance do algoritmo de controle para sistemas providos de demais estratégias para a compensação reativa, que não a mera instalação de reatores paralelos fixos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIGRE Working Group A3.07, Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers, Benefits & Economic Aspects, January 2004.
- [2] A. R. Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, New York - USA: Marcel Dekker, Inc., 1999.
- [3] A. E. A. Araújo e W. L. A. Neves, Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [4] A. C. Legate, J. H. Brunke, J. J. Ray e E. J. Yasuda, "Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 3, n. 1, pp. 223-231, January 1988.
- [5] J. R. Ribeiro e M. E. McCallum, "An Application of Metal Oxide Surge Arresters in the Elimination of Need for Closing Resistors in EHV Breakers," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 4, n. 1, pp. 282-291, January 1989.
- [6] L. Stenstrom e M. Mobedjina, "Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters," em *CIGRE SC 33 International Conference*, Zagreb, Croatia, 1998.
- [7] CIGRE Task Force 13.00.1., "Controlled Switching: A State of the Art Survey - Part I," *ELECTRA*, n. 162, pp. 65-97, October 1995.
- [8] H. Ito, "Controlled Switching Technologies, State-of-the-Art," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES*, 2002.
- [9] CIGRE Working Group 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 1st Part," *ELECTRA*, n.183, pp. 42-73, April 1999.
- [10] CIGRE Working Group 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 2nd Part," *ELECTRA*, n. 185, pp. 36-57, August 1999.
- [11] ABB, Controlled Switching, Buyer's & Application Guide, 3rd ed. Ludvika, Sweden, April 2009.
- [12] K. Froehlich, C. Hoelzl, M. Stanek, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, P. Hoegg, B. L. Avent, D. F. Peelo e J. H. Sawada, "Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 12, n. 2, pp. 734-740 April 1997.

- [13] K. M. C. Dantas, “Chaveamento Controlado Aplicado ao Religamento Rápido de Linhas de Transmissão,” Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- [14] R. G. Colclaser, C. L. Wagner e E. P. Conohue, “Multi-step Resistor Control of Switching Surges,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1022-1028, July 1969.
- [15] M. A. Barbosa, “Sobretensões de Manobra - Dimensionamento do Resistor de Pré-inserção,” Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1989.
- [16] J. K. Dillard, J. M. Clayton e L. A. Killard, “Controlling Switching Surges on 1100 kV Transmission Systems,” *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-89, pp. 1752-1762, November 1970.
- [17] H. E. Konkel, A. C. Legate, H. C. Ramberg e BPA, “Limiting switching surge overvoltages with conventional power circuit breakers,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 535-542, March 1977.
- [18] A. Carvalho, M. Lacorte e O. Knudsen, “Improved EHV Line Switching Surge Control by Application of MO-arresters and Controlled Switching,” *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, pp. vol. 1, pp. 292-297, November, 1995.
- [19] M. L. B. Martinez e L. C. Zaneta Jr, “The Energy Absortion Capacity of Metal Oxide Surge Arresters an Approach for Switching Surges,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Budapest, Hungary, June 1999.
- [20] J. He, C. Li, J. Hu, R. Zeng e J. Yuan, “Elimination of Closing Resistors for Breakers in 1000-kV UHV System by Surge Arresters,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, n. 4, pp. 2168-2175, October 2012.
- [21] K. Froehlich, C. Hoelzl, M. Stanek, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, P. Hoegg, B. L. Avent, D. F. Peelo e J. H. Sawada, “Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part II: Application of Closing Control Device for High-Speed Autoreclosing on BC Hydro 500 kV Transmission Line,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, n. 2, pp. 741-746, April 1997.
- [22] P. Mestas, M. Tavares e A. Gole, “Implementation and Performance Evaluation of a Reclosing Method for Shunt Reactor-Compensated Transmission Lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, n. 2, pp. 954-962, April 2011.
- [23] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, New York, NY - USA: Wiley-Interscience, 1991.
- [24] R. D. Garzon, *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications*, New York, NY - USA: Marcel Dekker, Inc., 1997.

- [25] P. M. Valero, “Controle Adaptativo para Religamento Tripolar Aplicado a Linhas de Transmissão com Compensação Reativa em Derivação,” Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- [26] IEEE Std C37.104-2002, IEEE Guide for Automatic Reclosing of Line Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines, New York, USA, April 2003.
- [27] A. B. Fernandes, A. C. S. Lima e R. M. Silva, “Religamento Automático de Linhas de Transmissão: Distinções nos Resultados em Função do Modelo Computacional Utilizado,” *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Curitiba, Outubro 2005.
- [28] L. C. Zanetta Jr., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [29] J. E. Beehler, “Weather, Corona, and the Decay of Trapped Energy on Transmission Lines,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, n. 5, pp. 512-520, May 1964.
- [30] A. D'ajuz, C. S. Fonseca, F. M. S. Carvalho, J. A. Filho, L. E. N. P. M. P. Dias, P. C. V. Esmeraldo, R. Vaisman e S. O. Frontin, *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta-Tensão*, Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- [31] A. Clerici, G. Ruckstuhl e A. Vian, “Influence of Shunt Reactors on Switching Surges,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-89, n. 8, pp. 1727-1736, November 1970.
- [32] A. F. C. Aquino, A. G. Massaud e D. N. Gonçalves, “Utilização do Religamento Automático Tripolar Lento em Linhas de Transmissão do SIN - Sistema Interligado Nacional: uma Experiência Bem Sucedida,” *Eletroevolução*, n. 60, Setembro 2010.
- [33] K. Dantas, W. Neves e D. Fernandes, “An approach for controlled reclosing of shunt-compensated transmission lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, n. 3, pp. 1203-1211, June 2014.
- [34] T. Gönen, *Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design* 2nd. ed., Boca Raton, FL - USA: CRC Press, 2009.
- [35] M. R. Spiegel, J. Schiller e R. A. Srinivasan, *Probability and Statistics*, New York - USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- [36] The MathWorks, Inc., *Curve Fitting Toolbox User's Guide*, [S.1.], 2007.
- [37] K. M. C. Dantas, “Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão,” Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

- [38] K. M. C. Dantas, W. L. A. Neves, D. Fernandes Jr, B. A. Souza e L. C. A. Fonseca, “Redução de Sobretensões de Manobras em Linhas de Transmissão via Chaveamento Controlado,” Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belo Horizonte, Abril 2008.
- [39] K. M. C. Dantas, D. Fernandes Jr., W. L. A. Neves, B. A. Souza e F. L. C. A., “Mitigation of Switching Overvoltages in Transmission Lines via Controlled Switching,” *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, July 2008.
- [40] M. L. R. Chaves, “Introdução ao Programa ATP,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [41] S. Su, X. Duan e X. Zeng, “ATP-Based Automated Fault Simulation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, n. 3, pp. 1687-1689, July 2008.
- [42] ONS, “Procedimentos de Rede - Submódulo 23.3. Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos,” Novembro 2011.
- [43] EPE, “Estudo de Expansão da Interligação N-NE - LT 500 kV Colinas - Ribeiro Gonçalves - São João do Piauí - Milagres,” No EPE/GET - NE- R1- 004.2006. [S.l.], Outubro 2006.
- [44] R. d. A. P. Neto, “Sistemas para Detecção de Falta de Alta Impedância e de Rompimento de Condutores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica,” Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- [45] R. M. Nakagomi, “Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição,” Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.