Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL)

Associação Ampla entre UFSJ e CEFET-MG





Hélciner Vitor Ferreira

METODOLOGIA E ANÁLISE DE TENSÕES DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIAS

Belo Horizonte

2016

Hélciner Vitor Ferreira

METODOLOGIA E ANÁLISE DE TENSÕES DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIAS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre o CEFET-MG e a UFSJ, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos – SE. Linha de Pesquisa: Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência – POSEP.

Orientador: Eduardo Gonzaga da Silveira

Coorientador: Rafael Silva Alípio

Belo Horizonte

2016

Ferreira, Hélciner Vitor

F383m

Metodologia e análise de tensões de restabelecimento transitórias / Hélciner Vitor Ferreira. – 2016.

xvi, 105 f.: il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.

Orientador: Eduardo Gonzaga da Silveira.

Coorientador: Rafael Silva Alípio.

Banca examinadora: Eduardo Gonzaga da Silveira, Rafael Silva Alípio, Marco Aurélio de Oliveira Schroeder e Fabrício Silveira Chaves.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

 Distribuição de energia elétrica – Teses. 2. Disjuntores elétricos – Teses. 3. Arco elétrico – Teses. 4. Transientes (Eletricidade) – Teses.
 Eletromagnetismo – Modelos matemáticos – Teses. I. Silveira, Eduardo Gonzaga da. II. Alípio, Rafael Silva. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

CDD 621.317

Dedico este trabalho ao meu avô Sebastião Jonas Ferreira que, onde quer que esteja, está brilhando mais forte neste momento.

Agradecimentos

A Deus, por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

À minha mãe Evani Maria Ferreira e minha avó Arcelina Ferreira de Oliveira, pelo amor que me mostrou a direção correta e me ensinou a ter fé na vida.

À minha esposa Tamiris Oliveira de Sousa, pelo amor a qual amo muito, pelo carinho, paciência e incentivo.

Ao meu orientador professor Eduardo Gonzaga e Rafael Silva Alípio (coorientador), pelos valiosos ensinamentos, ajuda técnica e incentivo dados para que eu chegasse até esta etapa.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do CEFET: Úrsula Resende, Patrícia Jota e Eduardo Nunes aos ensinamentos aprendidos nas matérias cursadas ao longo do mestrado. À funcionária Rosimeire pela paciência, atenção e compreensão ao longo de todo o curso.

Aos antigos colegas de trabalho da MPN: Alfredo Henrique Duarte Nunes, Hugo Leonardo Werly e em especial aos eternos professores José Pereira da Sila Neto, Nilder Nister Alves dos Reis e José Airton Bregalda.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, por toda a minha formação técnica, apoio financeiro e pelas oportunidades de crescimento pessoal e científico.

A todos os meus familiares e amigos que estiveram comigo nesta caminhada e que, de alguma força, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

"A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo da busca. E ensinar e aprender não pode dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria". (Paulo Freire)

"Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Tudo isso é posto em sua mão como sua herança para que você receba-a, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos". (Albert Einstein)

Resumo

Nos últimos anos, grandes parcelas de consumidores ficaram sem o fornecimento de energia elétrica no Brasil. Isso pode ser ocasionado por situações inesperadas que causam enormes prejuízos financeiros aos consumidores e ameaçam a estabilidade e os equipamentos envolvidos na transmissão e distribuição de energia. Neste contexto, estão os problemas originados pelo fenômeno de tensões de restabelecimento transitórias (TRT). Tornam-se necessários estudos para a maior compreensão deste fenômeno: suas causas e medidas mitigatórias. Neste trabalho são apresentados conceitos de circuitos elétricos, curto-circuito, superação de disjuntores e sua normalização. São descritas as características da tensão de restabelecimento transitória, os tipos de interrupção e o modelamento de seus componentes. A análise da TRT é realizada em quatro simulações. Na primeira tem-se um disjuntor de um primário de um transformador de um Forno Panela. Em seguida é verificado o efeito do tipo de aterramento nas sobretensões transitórias. Na terceira simulação há um ponto de falta nas proximidades de uma fonte geradora. Na última simulação é inserido um ponto de falta em regiões com linhas de transmissão com elevados comprimentos. As soluções encontradas mostram que as respostas teóricas e as obtidas nas simulações apresentaram coerência. Com estes resultados fica evidente a importância das simulações no processo de entendimento dos conceitos que envolvem a TRT, assim como o modelamento e suas suportabilidades normalizadas.

Palavras-chave: Tensão de Restabelecimento Transitória, Redes Elétricas, Transitórios Eletromagnéticos, Corrente de Corte.

Abstract

In recent years, major consumers of parcels were without electricity supply in Brazil. This can be caused by unexpected situations that cause huge financial losses to consumers and threaten the stability and equipment involved in the transmission and distribution of energy. In this context, are the problems caused by the phenomenon of transient reset voltages. Become necessary studies for the better understanding of this phenomenon, its causes and mitigation measures. This paper presents concepts of electrical circuits, short circuit and overcoming breakers, as well as its standardization. The characteristics of the transient recovery voltage are described interruption types and modeling components. The analysis is performed using TRT four simulations. The first has a primary circuit breaker for a transformer of a ladle furnace. It is then checked the effect of the type of ground in surges. In the third simulation there is a fault point near a generating source. In the last simulation entered a fault point in areas with transmission lines with high lengths. The solutions show that the theoretical answers and those obtained in the simulations showed consistency. With these results it is evident the importance of simulations in the process of understanding of the concepts involved TRT, as well as the importance of modeling and their standards.

Keywords: Transient Recovery Voltage, Grids, Electromagnetic Transients, Current Shopping.

Sumário

Ag	Agradecimentosv		
Re	Resumo vii		
Lis	ta de F	iguras	. xi
Lis	ta de T	abelas	xiv
Lis	ta de A	Abreviaturas e Símbolos	xv
1	Intro	dução	1
:	1.1	Relevância	1
	1.2	Contextualização	3
	1.3	Objetivo	3
:	1.4	Estrutura do trabalho	4
2	Estu	do do Estado da Arte	5
	2.1	Introdução	5
	2.2	Estado da arte	6
	2.3	Conclusões	. 10
3	Curte	o-circuito e Superação de Disjuntores	11
	3.1	Parâmetros dos circuitos	. 12
1	3.2	Equações básicas de curto-circuito	.14
1	3.3	Disjuntores	.21
1	3.4	Superação de disjuntores normalizada	. 30
1	3.5	Conclusões	.34
4	Tens	ões de Restabelecimento Transitórias	35
4	4.1	Equações básicas de TRT	.36
4	4.2	Tipos de interrupção de corrente	.44
4	4.3	Taxa de crescimento de tensão de restabelecimento transitória (TCTRT)	.53
4	4.4	Modelamento de componentes do estudo de TRT	.54
4	4.5	Conclusões	.64
5	Simu	llações e Resultados	66
!	5.1	Análise do disjuntor alimentador de um forno panela em relação à TRT e a TCTRT	. 67
!	5.2	Análise do disjuntor de entrada de uma linha de transmissão de 138 kV	. 82
ļ	5.3	Análise do disjuntor de entrada de uma linha de transmissão de 345 kV	. 89
ļ	5.4	Conclusão	.94

6	Conc	lusões e Propostas de Continuidade	95
	6.1	Conclusões	95
	6.2	Propostas de continuidade	97
Aı	nexo 1.		98
	A.1 Exe	mplo de cálculo de TRT	98
	A.2 Tab	elas de suportabilidade1	.01
Re	eferênci	ias Bibliográficas1	03

Lista de Figuras

Figura 2.1: Gráfico representativo para o fenômeno da TRT	5
Figura 3.1: Projeção da corrente e tensão	13
Figura 3.2: Circuito elétrico para análise do curto-circuito	14
Figura 3.3: Componentes alternada e contínua de uma onda	15
Figura 3.4: Estágios de um curto-circuito	16
Figura 3.5: Fator q para o cálculo da abertura de curto circuito em motores assíncronos	19
Figura 3.6: Curto-circuito simétrico inicial trifásico	20
Figura 3.7: Interrupção de Corrente	26
Figura 3.8: Etapas de uma Interrupção de corrente detalhadas no disjuntor	28
Figura 3.9: Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a SF6	29
Figura 3.10: Circuito representativo para um sistema não aterrado	32
Figura 3.11: Curva de dois parâmetros normalizada	33
Figura 3.12: Curva de quatro parâmetros normalizada	34
Figura 4.1: Circuito de análise para a TRT	37
Figura 4.2: Circuito equivalente para a análise da TRT	37
Figura 4.3: Gráfico evidenciando a injeção de corrente	39
Figura 4.4: Técnica de interrupção de corrente	40
Figura 4.5: Aproximação de i'(t)	40
Figura 4.6: Aproximação no valor da TRT	41
Figura 4.7: Sistema com linha de transmissão	42
Figura 4.8: Circuito equivalente	42
Figura 4.9: Circuito equivalente sem capacitâncias	44
Figura 4.10: Teoria da interrupção e reignição de Slepian	45
Figura 4.11: Interrupção de cargas resistivas	46
Figura 4.12: Tensão de restabelecimento transitória durante a interrupção de cargas indutivas	47
Figura 4.13: Tensão e corrente geradas com corrente de corte	49
Figura 4.14: Corrente de corte – sem reignição	49
Figura 4.15: TRT produzido pela corrente de corte	50
Figura 4.16: TRT produzido pela corrente de corte – "Current Chopping"	50
Figura 4.17: TRT durante o chaveamento de uma carga capacitiva	52
Figura 4.18: Diferentes tipos de TCTRT	53
Figura 4.19 Janela de introdução de dados para o modelo PI com matriz de E. Clarke- ATP	55
Figura 4.20: Dados de entrada da linha de transmissão no ATPDraw	56
Figura 4.21: Dados de entrada – Modelo JMartí	

Figura 4.22: Transformador de potência	57
Figura 4.23: Dados de entrada – Modelo BCTRAN	57
Figura 4.24: Modelo de banco de capacitores	58
Figura 4.25: Banco de capacitores	58
Figura 4.26: Representação de carga em circuito série	59
Figura 4.27: Representação de carga em circuito paralelo	59
Figura 4.28: Corte longitudinal de um para-raios	60
Figura 4.29: Dados de entrada de para-raios no ATP	61
Figura 4.30: Dados de entrada da característica V-I do para-raios no ATP	61
Figura 4.31: Curva típica do para-raios	62
Figura 4.32: Curva típica do para-raios com classe 2	62
Figura 4.33: Modelo equivalente de redes	63
Figura 4.34: Modelo do disjuntor	64
Figura 5.1: Diagrama Unifilar da Simulação 01	68
Figura 5.2: Sistema no ATPDRAW	68
Figura 5.3: Dados elétricos do cabo de 240 mm ²	69
Figura 5.4: Modelamento do cabo de 240 mm ²	70
Figura 5.5: Impedância representativa da potência de curto-circuito de entrada	71
Figura 5.6: Dados elétricos do LF	71
Figura 5.7: Representação do transformador TF-1 no ATPDRAW	72
Figura 5.8: Representação do transformador TF-2 no ATPDRAW	72
Figura 5.9: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 01	73
Figura 5.10: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 01 com envoltórias normalizad	las 73
Figura 5.11: Diagrama Unifilar da Simulação 02	75
Figura 5.12: Sistema solidamente aterrado no ATPDRAW	76
Figura 5.13: Sistema não aterrado no ATPDRAW	76
Figura 5.14: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C em sistema não aterrado	77
Figura 5.15: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com envoltórias normalizadas em um sistem	a não
aterrado	77
Figura 5.16: Sistema não aterrado no ATPDRAW com para-raios	79
Figura 5.17: Curva característica do para-raios (15 kV – 10 kA)	79
Figura 5.18: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com sistema não aterrado na presença de pa	ıra-
raios nos terminais do disjuntor	80
Figura 5.19: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B em sistema aterrado	81
Figura 5.20: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com envoltórias normalizadas em um sistem	а
aterrado	81
Figura 5.21: UHE Funil	83
Figura 5.22: Sistema Elétrico da simulação 3	83

Figura 5.23: Representação da simulação 3 no ATP	
Figura 5.24: Dados da impedância equivalente da UTE Funil	
Figura 5.25: Dados da impedância equivalente de UTE Itutinga	
Figura 5.26: Dados elétricos da linha de transmissão Lavras-Funil	
Figura 5.27: Dados elétricos da linha de transmissão Lavras-Itutinga	
Figura 5.28: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com o modelamento do disjuntor	
Figura 5.29: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com o modelamento do disjuntor e er	voltória
normalizada	
Figura 5.30: Resultado gráfico da corrente de corte	
Figura 5.31: Sistema Elétrico da simulação 4	
Figura 5.32: Representação da simulação 4 no ATP	
Figura 5.33: Parâmetros elétricos do equivalente de Pirapora	
Figura 5.34: Parâmetros elétricos do equivalente de Pimenta	90
Figura 5.35: Parâmetros elétricos do equivalente de Taquaril	91
Figura 5.36: Parâmetros elétricos do equivalente de São Gotardo	91
Figura 5.37: Extensões das linhas de transmissão	91
Figura 5.38: Parâmetros elétricos das linhas de transmissão	92
Figura 5.39: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 4	93
Figura 5.40: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 04 com envoltórias norr	nalizadas 93
Figura A.1: Representação equivalente do caso 5.3.3	
Figura A.2: Gráfico comparativo entre o resultado do ATP e o método calculado	
Figura A.3: Gráfico comparativo entre o resultado do ATP e o método calculado	

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Valores do fator de tensão	18
Tabela 3.2: Fator de primeiro polo em função ao tipo de aterramento	31
Tabela 4.1: Valores das constantes Rs , Ls e Cs	64
Tabela 5.1: Características elétricas dos cabos	69
Tabela 5.2: Características elétricas dos transformadores	71
Tabela 5.3: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada	74
Tabela 5.4: Características elétricas dos transformadores	75
Tabela 5.5: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada	78
Tabela 5.6: Recomendação Mitigatória – Disjuntor de 17,5 kV	78
Tabela 5.7: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada na presença de para-raios	80
Tabela 5.8: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada	82
Tabela 5.9: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada	88
Tabela 5.10: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada	93
Tabela A.1: Dados do sistema da Figura 0.1	98
Tabela A.2 Tensão suportável de acordo com o nível de tensão do disjuntor	101

Lista de Abreviaturas e Símbolos

SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
TRT	Tensões de Reestabelecimento Transitórias
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ATP	Alternative Transient Program
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ZnO	Varistores de óxido de zinco
TCTRT	Taxa de crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
DIT	Demais Instalações de Transmissão
R	Resistência
L	Indutância
С	Capacitância
Х	Reatância
Zcc	Impedância de curto-circuito
Zs	Impedância equivalente da fonte de energia
E(t)	Tensão instantânea em função do tempo
Em	Tensão de pico
ω	Velocidade angular
t	Тетро
lsc	Corrente de curto-circuito transitória
Icap	Corrente capacitiva
$arphi_I$	Ângulo de fase da corrente
$oldsymbol{arphi}_U$	Ângulo de fase da tensão
lac	Corrente elétrica alternada senoidal
Idc	Corrente contínua
Ip	Corrente de curto-circuito de pico
l"k	Corrente de curto-circuito simétrica inicial
Ib	Corrente de curto-circuito de interrupção
Ik	Corrente de curto-circuito em regime permanente
Ik SLG	Corrente de curto-circuito fase terra em regime permanente
С	Fator de Tensão
Vn	Tensão nominal
Zm	Impedância de motor
SF6	Hexafluoreto de enxofre
GIS	Gas Insulated Substation
N2	Gás nitrogênio
CO2	Dióxido de carbono
Cr	Condutância residual
Ur	Tensão nominal eficaz

Ud	Tensão suportável eficaz de curta duração à frequência industrial
Up	Tensão suportável nominal de pico de impulso atmosférico
% сс	Valor porcentual de componente contínua
Tr	Tempo de abertura dos contatos do disjuntor
kpp	Fator de primeiro polo
kaf	Fator de amplitude
Uc	Tensão de pico da TRT
U1	Primeira tensão de referência
t1	Tempo característico para a primeira tensão de referência
t2	Tempo característico para a tensão de pico da TRT
to	Tempo de retardo
ωο	Frequência angular natural
Rs	Resistência de perda de contato
Rp	Resistência de perda dielétrica
Rsd	Resistência de amortecimento do gap do disjuntor
Lsd	Indutância de amortecimento do gap do disjuntor
Csd	Capacitância de amortecimento do gap do disjuntor
LF	Forno Panela
EMTP	Electromagnetic Transients Program
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia

1 Introdução

1.1 Relevância

O tema transitório eletromagnético tem despertado ao longo do tempo o interesse de diversos pesquisadores. Muito provavelmente, tal interesse esteja relacionado à importância do conhecimento deste fenômeno para a construção e aplicação de equipamentos elétricos a fim de terem um bom desempenho frente às solicitações transitórias. Esta importância está inserida na análise dos equipamentos elétricos em alta tensão e também nos equipamentos do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O SIN é constituído por todas as subestações e linhas de transmissão com tensão igual ou superior à 230 kV que fazem parte de concessões de serviços públicos de energia elétrica. O órgão controlador é o Operador Nacional do Sistema (ONS). Este órgão compreende um agente de direito privado sobre a forma de associação civil, sem fins lucrativos, instituído pela Lei nº 9.648/98 e Decreto nº 2.655/98, com o objetivo de coordenar, supervisionar e controlar a operação do sistema elétrico brasileiro e as interconexões internacionais assegurando a economia daquele sistema, bem como propor à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ampliações nos sistemas existentes.

A ANEEL regula e fiscaliza o serviço prestado pelas empresas de energia elétrica, desde a geração até a distribuição. Para ter acesso a rede básica é necessária a realização do projeto básico. O objetivo do projeto básico é a apresentação das características técnicas e das premissas de engenharia das instalações, assim como das especificações básicas dos equipamentos de transmissão, proteção, controle e comunicação que irão compor a nova instalação.

De forma geral, um projeto básico pode subdividir-se em dois grupos principais de documentos:

 Estudos elétricos (a frequência fundamental e de transitórios eletromagnéticos), especificação de subestações e equipamentos (arranjos, desenhos, barramentos e equipamentos principais);

1

 II. Estudos e dimensionamento básico de linhas de transmissão e aspectos operacionais (Supervisão e Controle, Telecomunicação e Proteção).

Nestes estudos elétricos há simulações de transitórios eletromagnéticos que permitem estimar o funcionamento de componentes lineares e não lineares presentes nos sistemas elétricos de potência, tais como linhas de transmissão, cabos subterrâneos e para-raios, entre outros (D'Ajuz *et al.*, 1985). Dentro destas simulações tem-se a análise do disjuntor, em um trabalho pertinente chamado de Estudo de Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT). Neste documento há uma análise dos fenômenos transitórios em disjuntores.

Dentro deste contexto, houve um amplo diálogo sobre TRT promovido em diversos seminários e reuniões envolvendo a ANEEL e a comunidade científica. A partir destes encontros, a ONS desenvolveu uma publicação com o título de "Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão (ONS, 2013)", que contêm diretrizes básicas que subsidia o estudo de TRT.

Apesar desta publicação conter conceitos fundamentais para o desenvolvimento do estudo de TRT, muitos aspectos como, o modelamento e as características dos fenômenos envolvidos não são retratados de uma forma quantitativa.

A criação e o aperfeiçoamento deste modelamento têm exigido esforços dos pesquisadores para aumentar a eficiência durante as simulações de TRT. Estudos devem ser efetuados para aperfeiçoar a metodologia existente, assim como o desenvolvimento de novos modelos e também a escolha correta dos modelos atuais dentro do contexto de cada aplicação.

Uma dificuldade associada à grande parte das modelagens presentes na literatura refere-se às aplicações das mesmas. Uma escolha errada leva a inconsistências físicas em relação ao fenômeno investigado. Com esses comentários iniciais, denota-se a relevância do tema em investigação: metodologia e análise de tensões de restabelecimento transitórias.

1.2 Contextualização

As companhias energéticas brasileiras, frente à manutenção e operação do Sistema Elétrico Integrado, têm despertado amplo interesse neste tema. Não há normas que definem a modelagem do fenômeno de TRT. Isso permite a escolha de diferentes modelos eletromagnéticos.

Nas diretrizes para a elaboração de projetos básicos fornecidos pelo ONS (ONS, 2013) é evidenciado que "os engenheiros responsáveis pela elaboração dos estudos de transitórios eletromagnéticos devem ter consciência de que não existe uma forma única de modelar os elementos da rede analisada. Essa modelagem dependerá do tipo de fenômeno e das características da rede. Uma modelagem inadequada levará a resultados inconsistentes" (ONS, 2013).

Apesar dos inúmeros trabalhos desenvolvidos sobre o tema, alguns pontos ainda precisam de investigações adicionais. Nesse sentindo foram eleitos os seguintes tópicos norteadores do projeto em questão:

- I. Um maior entendimento sobre o processo de superação de disjuntores;
- II. Uma importância maior sobre os cálculos de TRT, através de equações básicas, a fim de ter uma referência na comparação com os resultados obtidos nas simulações;
- III. O estudo de modelamentos, para a representação correta dos equipamentos elétricos, utilizando o software ATP (Alternative Transient Program).

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é pesquisar técnicas de modelamento de tensões de restabelecimento transitórias a fim de realizar uma análise deste fenômeno. Em relação ao contexto e o objetivo principal deste trabalho, as seguintes atividades são estudadas:

- Análise da superação dos disjuntores e dos fenômenos envolvidos. Dentro deste contexto é pertinente o estudo dos conceitos de parâmetros dos circuitos, de curtocircuito, estresse na isolação e teoria da interrupção de corrente.
- II. Avaliação do equacionamento matemático junto com os resultados fornecidos pelas simulações, de modo a eleger modelamentos que apresentem maior viabilidade a serem aplicados em condições reais de operação;
- III. Estudo da aplicação dos modelos no software ATP e simulação de casos relevantes que exemplificam a análise dos fenômenos eletromagnéticos.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, tal como descrito na sequência.

O primeiro capítulo se dedica a apresentar uma relevância do tema abordado, objetivo e a estruturação deste trabalho. No segundo capítulo apresentado o estudo do estado da arte, com um levantamento dos conceitos atuais inerentes ao fenômeno da TRT. No terceiro e quarto capítulos, são mostrados os princípios básicos sobre parâmetros de circuitos, cálculos de TRT e suas suportabilidades para a análise deste fenômeno. No capítulo 5 são apresentadas as simulações e os resultados. O capítulo 6 é dedicado às conclusões e às futuras propostas de trabalho. No anexo são dados exemplos de cálculos de TRT através dos métodos das tensões e injeção de corrente.

2 Estudo do Estado da Arte

2.1 Introdução

A Figura 2.1 mostra um fenômeno que surge durante um processo de interrupção de corrente de falta em um disjuntor. Este fenômeno é chamado de TRT.



Figura 2.1: Gráfico representativo para o fenômeno da TRT (Stewart, 1995)

O fenômeno da TRT é um tema a ser investigado e objeto de estudo desta dissertação. Nos próximos capítulos são abordados importantes conceitos referentes à TRT. A natureza do entendimento desta questão envolve alguns princípios e fenômenos preliminares que são fornecidos paralelamente a esta resposta.

Com o propósito de conhecer a TRT, são levantados alguns dos importantes trabalhos desenvolvidos sobre este tema. A abordagem inclui uma análise abrangente deste assunto e contextualização de pontos de vistas de diversos autores. São verificadas as principais técnicas e metodologias utilizadas, com destaque para os trabalhos que utilizam ferramentas computacionais para análise no domínio do tempo. Isto permite observar a qualidade técnica e desempenho obtidos.

Em referência a ferramentas computacionais, de acordo com o ONS (Submódulo 18.2, 2009), o *software* ATP é utilizado para a simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos. Os seus resultados auxiliam no planejamento e na operação

do sistema, bem como nos cálculos para a fabricação de equipamentos elétricos. Alguns artigos que apresentam as técnicas e análises de TRT são expostos no próximo item.

2.2 Estado da arte

A primeira atenção a esta dissertação é em relação à resposta transitória. Com isso é analisado o trabalho de Cheng-Chien Kuo (Cheng *et al.*, 2012), que avaliou a resposta transitória durante a operação de um disjuntor alimentando um reator. Ele simulou este fenômeno durante o chaveamento da potência reativa, utilizando uma modelagem com o *software* ATP. Através de simulações, foram propostos métodos para mitigar a TRT por meio de para-raios. Cheng-Chien Kuo concluiu que a condição mais severa para um disjuntor seria a abertura de curto-circuito e a capacidade de resistir a longos períodos de operação. Na situação onde as cargas do disjuntor são elementos indutivos, isso leva ao pico de corrente, alta TRT e ocorrência de vários arcos durante as operações normais de comutação. A partir da análise do trabalho de Cheng-Chien Kuo, é avaliado o para-raios como elemento mitigador e a TRT na presença de curto-circuito durante as simulações desta dissertação.

A importância dos para-raios como elemento mitigador durante o processo de TRT também foi analisada no trabalho de Azevêdo (Azevêdo et al., 2010). Azevêdo, através de redes de média tensão, realizou estudos para avaliar o projeto e desempenho de um dispositivo que pode reduzir os picos de TRT. O dispositivo é composto por varistores de óxido de zinco (ZnO) onde sua característica não linear permite reduzir a magnitude do TRT quando usado em disjuntores durante a interrupção de faltas trifásicas não aterradas. Os dados do sistema de alimentação do Nordeste brasileiro em relação à rede da Energisa são apresentados nos estudos de caso e as simulações foram realizadas no ATP. Aspectos importantes do planejamento são abordados para garantir um diagnóstico correto da TRT com objetivo de reduzir investimentos que seriam utilizados para substituir disjuntores ou religadores por equipamentos com classe de tensão mais elevada. Azevêdo conclui que simulações digitais podem indicar a viabilidade de uma alternativa barata para a redução de tensões impostas pela TRT entre os contatos do disjuntor, mostrando que as operações preliminarmente qualificadas como inseguras podem se tornar permissivas. A instalação do dispositivo de ZnO é realizada em paralelo com os polos do disjuntor, o que permite limitar a magnitude da TRT nos cenários mais graves de solicitações.

Para fenômenos envolvendo TRT uma importante etapa é a análise da linha de transmissão, principalmente com relação à sua distância ao ponto de falta. Esta etapa contempla o trabalho de Todeschini (Todeschini *et al.*, 2012), que descreveu uma abordagem para avaliar o efeito da distância na forma da TRT resultante devido a uma falha de uma linha de transmissão curta. Todeschini apresentou um procedimento para a escolha do pior caso de falha de linha curta para um disjuntor instalado em uma subestação. A abordagem foi realizada de acordo com o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e um procedimento de modelagem é apresentado para o método proposto. Ele sugere maior estudo sobre o tema envolvendo diferentes modelos de linha que podem ser usados para representar com mais precisão as oscilações decorrentes de curto-circuito de linhas curtas. Com as conclusões de Todeschini, foi escolhido um modelo de linha de transmissão que representa satisfatoriamente o fenômeno de TRT, assim como uma análise do efeito de sua distância com uma simulação com um curto-circuito na proximidade de uma unidade geradora.

Outro aspecto importante para o entendimento de TRT são os disjuntores. Este conceito foi observado com o trabalho de Liao (Liao Minfu *et al.*, 2010), que analisou o efeito de TRT em disjuntores a vácuo com múltiplos chaveamentos em função de sua capacidade de ruptura. Liao estudou a distribuição de TRT e a sua relação com a rigidez dielétrica entre os contatos do disjuntor. Há comparação entre disjuntores com diferentes capacitâncias. Os resultados experimentais mostram que o sucesso no processo de interrupção é devido à recuperação dielétrica. A distribuição de tensão é função da resistência de arco elétrico resultantes no processo de recuperação dielétrica. Com o trabalho de Liao ficou evidenciada a importância do disjuntor e de sua rigidez dielétrica no processo do entendimento do fenômeno da TRT. Com isso é dedicado nesta dissertação um capítulo para analisar o conceito de rigidez dielétrica e também para a superação de disjuntores.

Em uma análise de TRT é relevante a avaliação do equacionamento matemático como referência nos resultados obtidos. Com esta premissa Koshizuka (Koshizuka *et al.*, 2010) investiga o cálculo das tensões de restabelecimento transitórias, utilizando-se o princípio de injeção de corrente. O TRT é mensurado através do envelopamento de quatro parâmetros e os resultados variam conforme as condições de chaveamento do disjuntor. A forma de uma TRT mitigada por para-raios pode ser calculada pelo método proposto em seu respectivo

estudo. Koshizuka conclui que as análises dos fenômenos transitórios são importantes para a escolha e desenvolvimento do disjuntor, com uma proposta de um cálculo da TRT, utilizando o princípio de injeção de corrente. Devido às conclusões extraídas no trabalho de Koshizuka é dedicado um capítulo para o entendimento do cálculo de TRT, utilizando o método de injeção de corrente.

O tempo de duração de TRT e suas características peculiares são fundamentais para a sua análise. Neste contexto, foi analisado o trabalho de Halim (Halim *et al.*, 2010), que apresenta a tensão de restabelecimento transitória no disjuntor em uma rede do sistema de energia, onde observa que a TRT é uma característica do sistema com duração de apenas alguns microssegundos. Seu objetivo é a simulação e análise da TRT no disjuntor, investigando a tensão transitória antes e depois das interrupções e também a tensão transitória de retorno na presença de uma falha. O método utilizado neste projeto foi de simulação do circuito, utilizando o programa de transitórios que permite simular o modelo de circuito e coletar alguns dados para dar confiabilidade na TRT. Halim conclui que a TRT afeta a capacidade de interrupção do disjuntor e a operação da rede do sistema de energia.

A intensidade do curto-circuito está diretamente relacionada com a magnitude do TRT. Isso é evidenciado no estudo de Tasdighi (Tasdighi, 2013). Ele relata que a magnitude da corrente de curto-circuito e da TRT são dois fatores importantes na escolha do disjuntor durante faltas de linhas de transmissão curtas. As equações matemáticas apresentadas para um curto-circuito de uma linha curta fornecem uma referência teórica para seleção adequada de disjuntores e de suas características de interrupção. Com as conclusões de Tasdighi, devido à importância do curto-circuito no entendimento da TRT, é dedicado um capítulo para o entendimento dos conceitos básicos e normalizados deste fenômeno.

As características do curto-circuito também foram analisadas no trabalho de Baina (Baina *et al.*, 2012), onde comenta que a TRT é uma das características inerentes do sistema de energia, e o pico e a taxa de crescimento da TRT são fatores importantes que afetam o curso de trabalho do disjuntor. Os disjuntores podem deixar de interromper a corrente de falta se o sistema de energia possuir características de TRT acima do valor nominal do disjuntor. Em seu trabalho, Baina investiga os requisitos de TRT para disjuntores de 1100 kV a partir de uma simulação computacional, utilizando-se o ATP. Em sua pesquisa obtém-se a TRT após a interrupção de curto-circuito com diferentes tipos de faltas. Baina conclui que onde há a interrupção de um curto-circuito há uma produção de uma TRT que afeta a capacidade de interrupção do disjuntor. Baina simula vários tipos de curto-circuito e observa nos resultados das simulações que o curto-circuito trifásico aterrado é o caso mais grave, onde o pico de TRT e a taxa de crescimento da TRT são maiores e o grau de distorção é mais grave. Além disso, o artigo introduz medidas mitigatórias de TRT, simula e analisa efeitos de supressão do para-raios em TRT. A instalação de para-raios na linha de transmissão evidencia a redução do pico da TRT.

A superação normalizada dos disjuntores é necessária para a correta especificação deste equipamento. Com isso, foi analisado o trabalho de (Rasheek, 2014), onde argumenta que as redes de distribuição industriais fornecem energia elétrica para consumidores distintos. Em alguns aspectos, esses sistemas possuem características diferentes e necessitam de atenção especial na realização de estudos de TRT. Rasheek relata que na América do Norte (IEEE) e na Europa com a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), padrões estavam sendo feitos em um esforço significativo para harmonizar as especificações dos disjuntores e requisitos de teste de TRT. Rasheek realizou estudo de TRT utilizando um programa de transitórios eletromagnéticos, *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), para verificar os requisitos da TRT sobre diferentes condições em relação aos padrões de fornecimento. Rasheek conclui que uma análise da TRT é fundamental para verificações de desempenho de disjuntores. Em sistemas industriais e de mineração, onde o neutro do transformador de alimentação pode ser solidamente aterrado, a verificação se torna mais necessária. A utilização das Normas IEEE atualizadas em combinação com simulações utilizando ATP permitem a conclusão da análise e a seleção apropriada de disjuntor. Um exemplo de um sistema de distribuição de 72,5 kV foi discutido e demonstrado para ajudar na elaboração de estudos de casos TRT com sistemas semelhantes. Observando as conclusões do trabalho de Rasheek, ficou evidenciado que o tipo de aterramento afeta os resultados de TRT. Ele também evidencia a importância da padronização durante a especificação dos dispositivos frente a estas solicitações. O tipo de aterramento e a padronização dos disjuntores analisados nesta dissertação.

Os estudos de transitórios são fundamentais para a determinação dos requisitos dielétricos dos disjuntores e chaves. Com isso foi analisado o trabalho de (Portela, 1995), onde

argumenta que esses requisitos dependem não somente das características do sistema de transmissão, como também do arranjo físico das subestações onde estes equipamentos serão aplicados. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de realizar estudos modelando-se convenientemente as linhas de transmissão e, quando necessário, os elementos interiores à subestação, levando-se em conta a configuração operativa dos equipamentos de manobra. A elaboração dos estudos requer uma sofisticação que de pronto inviabiliza o cálculo manual dos parâmetros elétricos decorrentes do regime transitório. O usual no setor elétrico é a utilização de programas computacionais adequados.

2.3 Conclusões

Em resumo, os autores abordaram os componentes e às características da rede elétrica que subsidiam os cálculos de TRT. Isso é necessário para a correta especificação dos disjuntores. Ao estabelecer a ferramenta digital e a modelagem dos elementos da rede elétrica, prossegue-se com a realização de simulações, considerando critérios rigorosos para obter resultados mais críticos. Isso objetiva minimizar prejuízos financeiros decorrentes do dimensionamento inadequado de equipamentos e de dispositivos mitigadores.

Tendo em vista a revisão dos principais trabalhos que propõem metodologias para investigação do comportamento da TRT, algumas análises preliminares devem ser esboçadas. Os aspectos mitigadores, a relação dos elementos do circuito elétrico, o efeito dos disjuntores, o curto-circuito e os aspectos normativos são de suma importância para a análise deste fenômeno. Nos próximos capítulos tem-se uma descrição destes conceitos norteados pelas conclusões dos autores desta revisão bibliográfica.

3 Curto-circuito e Superação de Disjuntores

No presente capítulo são apresentados os conceitos que precedem a análise de TRT. Um entendimento sobre os parâmetros de circuitos, associados aos conceitos de curto-circuito e disjuntores possuem uma particular importância para a análise do fenômeno eletromagnético.

Antes de iniciar as prerrogativas deste capítulo, deve-se ter em mente que todo novo empreendimento ou reforma de subestação inserida na rede básica tem por obrigatoriedade uma análise de superação de equipamentos. A empresa contratada em licitação, responsável por este serviço, inicia seu trabalho com uma análise do projeto básico e são consolidados no relatório de estudos no projeto executivo.

De acordo com a Lei 8.666/1993, inciso IX, Projeto Básico é o conjunto de elementos necessários e suficientes, com nível de precisão adequado, para caracterizar a obra ou serviço, ou complexo de obras ou serviços objeto da licitação, elaborado com base nas indicações dos estudos técnicos preliminares, que assegurem a viabilidade técnica e que possibilite a avaliação do custo da obra e a definição dos métodos e do prazo de execução.

A Lei 8.666/93, inciso X, diz que o Projeto Executivo é o conjunto dos elementos necessários e suficientes à execução completa da obra, de acordo com as normas pertinentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

Importante destacar que o Projeto Executivo não é um novo Projeto, e sim, o melhor detalhamento do Projeto Básico. Estes conceitos sobre projetos são necessários para evidenciar a importância das informações geradas no contexto desta dissertação, o que produz como resultado a especificação de equipamentos.

O primeiro documento que faz referência prévia na análise da TRT é o estudo de curtocircuito. Este estudo fornece informações de corrente de falta simétrica e valores de X/R calculados para todas as barras do SIN. Com estes cálculos têm-se as análises de superação por crista da corrente de curto-circuito no disjuntor devido à evolução da constante de tempo da rede (Submódulo 11.3, 2009).

Como consequência deste estudo tem-se a dinâmica do entendimento da superação de disjuntores, onde é imprescindível o conhecimento dos parâmetros relativos aos componentes da rede elétrica.

Apesar dos disjuntores operarem em regime permanente a maior parte do tempo, em seu projeto há a necessidade de prever a pior condição de contingência. Em sua grande maioria, estas solicitações críticas são produzidas durante eventos transitórios dos sistemas, o que faz com que os projetos sejam também determinados pelas condições transitórias. As características básicas dos parâmetros de circuito elétrico darão início a este tema objetivando fortalecer o entendimento deste capítulo.

3.1 Parâmetros dos circuitos

Os parâmetros que representam os equipamentos em um sistema de energia, em condições normais de operação, podem ser representados como circuitos equivalentes. Para a análise em regime transitório, a característica de cada elemento é importante e seu modelamento específico é necessário. Os elementos individuais dos circuitos equivalentes são a resistência, a reatância e a fonte de tensão. Estes, por sua vez, são regidos pela lei de Ohm.

Ao lidar com sistemas alternados deve-se notar que as correntes e as tensões em geral não estão em fase. O defasamento da fase depende da quantidade de indutância L, capacitância C e da resistência R de um sistema. No decorrer do tempo, por exemplo, uma corrente i(t) ou de tensão u(t) é regida de acordo com as equação 1 e 2.

$$u(t) = \sqrt{2} \times U \times sen(\omega t + \varphi_U) \tag{1}$$

$$i(t) = \sqrt{2} \times I \times sen(\omega t + \varphi_I)$$
⁽²⁾

Onde U e I são valores em RMS de tensão e corrente e φ_{U} e φ_{I} são os ângulos de fase de tensão e corrente respectivamente.

A tensão e a corrente podem ser representadas por gráficos senoidais ou diagramas com fasores formados de números complexos, que percorrem o sentido anti-horário, conforme Figura 3.1.



Figura 3.1: Projeção da corrente e tensão

A frequência angular é representada pelo símbolo ω . O termo genérico para uma impedância é Z = R + jX. A reatância depende da frequência angular e pode ser capacitiva X_c ou indutiva X_L, conforme as equações: $X_C = \frac{-1}{\omega C} e X_L = \omega L$.

A indutância armazena energia através do campo magnético, enquanto que a capacitância acumula energia por meio do campo elétrico. Ambas as energias são proporções de corrente e tensão instantâneas respectivamente representadas por $\frac{1}{2}Li^2$ e $\frac{1}{2}Cu^2$.

Estes conceitos iniciais dos parâmetros de circuito são relevantes para subsidiar o entendimento do próximo conceito deste capítulo que são as equações básicas de curtocircuito.

3.2 Equações básicas de curto-circuito

A Figura 3.2 mostra um circuito elétrico para a análise do curto-circuito. Este circuito possui uma impedância Z_{cc} que é a resultante de Thévenin da rede elétrica. A impedância Z_s representa a carga, objeto de estudo de um sistema específico, que pode ser uma indústria, uma subestação, ou um equivalente de rede de distribuição ou transmissão.



Figura 3.2: Circuito elétrico para análise do curto-circuito

Uma falta entre A e B resulta em uma corrente de curto-circuito I_{sc} que por sua vez está sendo limitada apenas pela impedância Z_{cc}. A corrente I_{sc} depende da reatância X_{cc} e da resistência R_{cc} que compõem a impedância de curto-circuito: $Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$.

Nas diversas redes de distribuição de energia (Cahier Technique 158), a reatância é normalmente maior do que a resistência e as condições transitórias predominantes dependem da distância entre o local de falta e da fonte. A corrente total possui uma componente alternada senoidal i_{ac} e uma contínua i_{dc} (Cahier Technique 158), de acordo com a equação 3.

$$I_{sc}(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t)$$
(3)

Logo, as componentes i_{ac} e i_{dc} podem ser reescritas como 4 e 5, onde φ é o arco tangente da relação entre a reatância e a resistência do sistema.

$$I_{ac}(t) = \sqrt{2} \, Isen(\omega t + \varphi_I - \varphi) \tag{4}$$

$$I_{dc}(t) = \sqrt{2} \, Isen(\varphi_I - \varphi) e^{-\frac{\kappa}{L}t}$$
(5)

Onde
$$I = \frac{E_m}{Z_{cc}}$$

A evolução da componente de corrente alternada e a contínua em função do tempo é mostrada na Figura 3.3. O entendimento destas duas parcelas de corrente, juntamente com os parâmetros básicos dos circuitos elétricos, possibilita o primeiro passo para a compreensão e análise de fenômenos de transitórios eletromagnéticos e a avaliação da dinâmica e suportabilidade dos disjuntores envolvidos.



Figura 3.3: Componentes alternada e contínua de uma onda (Meets, 2015)

Os dispositivos de proteção interrompem as correntes de curto-circuito em um curto espaço de tempo de maneira segura. Esta corrente pode fluir na terra e induzir tensões inadmissíveis na vizinha de dutos metálicos, comunicação e circuitos de energia.

As correntes de falta estimulam oscilações mecânicas de unidades geradoras que conduzirão a oscilações de potência ativa e reativa, causando problemas de estabilidade na transferência de potência. Além disso, equipamentos e instalações devem suportar os efeitos térmicos e eletromagnéticos da corrente de curto-circuito. Esta importância do valor do curto-circuito se estende para diferentes contextos e temas que podem ser visualizados pela Figura 3.4.



Figura 3.4: Estágios de um curto-circuito (adaptado de Schlabbach, 2005)

Uma atenção maior deve ser dada para quatro regiões dentro de um evento de curtocircuito, conforme a Figura 3.4:

- O tempo de duração total: a duração total do tempo da corrente de curto-circuito é a somatória do tempo de atuação dos dispositivos de proteção com o tempo de abertura do disjuntor.
- II. O valor de pico do curto-circuito: é o máximo valor instantâneo da corrente de curtocircuito e ocorre aproximadamente a um quarto de período após a inicialização da falta. Como as forças eletromagnéticas são proporcionais ao valor instantâneo da corrente, o cálculo deste pico é importante a fim de calcular as forças sobre os condutores e os componentes afetados pela passagem da falta. Seus efeitos durante o chaveamento dos circuitos são calculados de acordo com a
- III. O valor eficaz do curto-circuito: o valor eficaz da corrente de curto-circuito decai ao longo do tempo, e se estabiliza após o término da componente Idc e das contribuições dos motores. Esta corrente vai aquecer o condutor devido a perdas ôhmicas. O seu valor de corrente, juntamente com o tempo total de duração, é uma referência para os efeitos térmicos do curto-circuito.

IV. A corrente de abertura de curto-circuito: a corrente de abertura é o valor eficaz da corrente de curto-circuito no momento da interrupção ou operação do disjuntor. O quantitativo desta corrente de abertura define a suportabilidade do disjuntor em relação ao curto-circuito.

A partir dos conceitos expostos neste capítulo, conclui-se que os parâmetros do curtocircuito são parte do contexto da suportabilidade das tensões de restabelecimento transitórias. Para prosseguir com o entendimento deste tema é necessário conhecer os procedimentos para o cálculo normalizado das correntes de curto-circuito.

3.2.1 Curto-circuito normalizado: IEC 60909-0

Existem diversas formas e considerações para o cálculo de curto-circuito, principalmente nas escolhas dos parâmetros elétricos dos equipamentos e na estimativa de dados. Para facilitar o entendimento e aumentar a qualidade e a confiabilidade dos resultados de um estudo de curto-circuito, a comunidade científica criou normas que padronizam o seu cálculo. Dentre as padronizações existentes, a IEC desenvolveu uma metodologia com a norma (IEC 60909-0:2016) que contém parâmetros, procedimentos e premissas básicas para orientar o profissional durante os cálculos sobre este tema.

No início do cálculo normalizado o primeiro parâmetro a ser analisado é a tensão nominal (U_n) . A fim de resultar em valores de curto-circuito considerando as piores solicitações, há uma inserção de um fator "c" em seu cálculo, onde a resultante é chamada de tensão préfalta: $V_{pré-falta} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}}$. Este fator é utilizado para compensar possíveis variações de tensão e mudanças no "tap" dos transformadores, o que também influencia no comportamento subtransitório dos geradores e motores. Com isso os valores das correntes calculadas levam em consideração uma possível sobretensão na concessionária, o que causa um aumento nos valores das correntes.

A tabela 3.1 mostra os valores de "c" utilizados:

Tensão Nominal (Un)	Fator de Tensão c
Baixa Tensão	1,05
Média Tensão	1,05
Alta Tensão	1,10

Tabela 3.1: Valores do fator de tensão (IEC 60909-0:2016)

As correntes de curto-circuito são divididas ao longo do tempo de acordo com suas propriedades. Estas correntes calculadas de acordo com a norma IEC estão definidas conforme abaixo:

- Ip: Corrente de curto-circuito de pico: máximo valor instantâneo possível da corrente de curto-circuito.
- II. I''k: Corrente de curto-circuito simétrica inicial: valor eficaz da componente simétrica de corrente alternada da corrente de curto-circuito aplicável no instante do curtocircuito.
- III. Ib : Corrente de curto-circuito de interrupção: valor eficaz no instante da separação dos contatos do dispositivo de interrupção durante o curto-circuito.
- IV. Ik: Corrente de curto-circuito em regime permanente: valor eficaz da corrente de curto-circuito que permanece após o decaimento do fenômeno transitório.
- V. Ik SLG: Corrente de curto-circuito fase-terra em regime permanente: valor eficaz da corrente de curto-circuito fase-terra.

As correntes de curto-circuito relevantes em um estudo de TRT são a lb e a l"k, pois estas correntes são valores de referência normalizados que o disjuntor deve suportar no decorrer de sua abertura. Com isso, o procedimento de cálculo destas correntes é visto nas equações 6 a 8. Primeiramente tem-se a corrente lb, onde é calculada de acordo com a equação 6.

$$Ib = \mu \times q \times I''k$$

(6)

O fator "µ" é relação entre a corrente de contribuição do motor e a sua corrente nominal, conforme equação 7.

$$\mu = \frac{I''k_m}{I_n} \tag{7}$$

Onde:

I_n: Corrente nominal do motor;

I''k_m: Corrente de contribuição do motor.

O fator "q" pode ser encontrado de acordo com a Figura 3.5.



Figura 3.5: Fator q para o cálculo da abertura de curto circuito em motores assíncronos (IEC 60909-0:2016)

A segunda componente em questão é a l''k, que depende do tipo de curto-circuito do sistema. Seu maior valor é o curto-circuito inicial trifásico l''k3 onde é calculado de acordo com a equação 8 e ilustrado na Figura 3.6.

Curto-Circuito simétrico inicial trifásico (I"k3):

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} \tag{8}$$

A partir da equação 8 tem-se:

Un: Tensão de linha do sistema elétrico;

Z₁: Impedância de sequência positiva;

c: Fator de tensão.



Figura 3.6: Curto-circuito simétrico inicial trifásico (IEC 60909-0:2016)

Com os conceitos dos parâmetros do sistema elétrico e curto-circuito, o próximo tema a ser abordado são as características principais dos disjuntores, o que inclui a análise de sua suportabilidade e normalização.
3.3 Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos fundamentais no sistema elétrico. Stan Stewart (Stewart, 1995) comenta esta questão em seu livro, onde engenheiros eletricistas são questionados pelos seus clientes sobre a importância dos disjuntores. Este dispositivo tem um valor elevado, um custo para instalação e manutenção sem que haja qualquer ganho ou receita direta. Este pensamento é uma simplificação do pensamento de uma grande parcela de consumidores finais de energia elétrica. Uma primeira resposta seria admitir para o cliente que o disjuntor é necessário para isolar o equipamento defeituoso, e permitir a restauração rápida de fontes de alimentação.

A importância do disjuntor vai além de um simples interruptor ou isolador de equipamento defeituoso. O disjuntor tem que estar preparado para suportar inúmeros fenômenos que o norteia durante o processo de interrupção. Dentro destes fenômenos está inserida, com grande importância, a sua suportabilidade frente às solicitações de TRT.

Como entendimento inicial, um disjuntor possui natureza eletromecânica, ou seja, é um elemento do circuito elétrico que possui natureza mecânica e funciona como um interruptor. A sua função principal é receber um sinal de abertura, geralmente originado de um relé de proteção, interrompendo a sobrecorrente imediatamente antes que os seus efeitos térmicos e mecânicos possam evoluir em danos à instalação elétrica.

Suas principais características são:

- Possui operabilidade excelente e ótima segurança para manobras;
- Possui característica de um bom condutor quando fechado e um bom isolador quando aberto;
- Bem dimensionado, interrompe uma corrente de falha sem restabelecimento de arco elétrico;
- Possui alta confiabilidade.

Alguns conceitos básicos são necessários para um melhor entendimento sobre disjuntores. Suas principais características, como o estresse na isolação, a teoria da interrupção de corrente e suas características de superação normalizada são importantes para a assimilação de seu contexto frente à TRT.

3.3.1 Estresse na isolação

Em projetos mecânicos o dimensionamento depende da resistência mecânica dos materiais e das tensões geradas durante o seu funcionamento. Esta analogia é válida para aplicações de alta tensão. A rigidez dielétrica de materiais isolantes e o campo elétrico são os fatores importantes em sistemas de alta tensão. Em um disjuntor, o material isolante impede o fluxo de corrente em caminhos e situações indesejadas (Cassie, 1939).

Um dos requisitos que define a capacidade de interrupção e o nível de tensão de trabalho de um disjuntor é seu material isolante. A resistência dielétrica de um material isolante pode ser definida conforme a TRT e taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TCTRT) que o material pode suportar.

A suportabilidade elétrica depende de uma série de parâmetros, tais como a pressão, a temperatura, a umidade, as conFigurações de campo, a natureza da tensão aplicada, as imperfeições em materiais dielétricos, o material de eletrodos e as condições em sua superfície, entre outros.

A causa mais comum de falha de isolamento é a presença de descargas dentro dos espaços vazios e em sua superfície. A probabilidade de falha será muito reduzida se essas descargas ou solicitações estiverem dentro da suportabilidade do disjuntor. Existem alguns meios isolantes mais utilizados em disjuntores de alta tensão (Cassie, 1939):

I. Meio Isolante: Gás

O ar é o meio mais comum de isolamento gasoso. A composição do ar é de considerável importância prática para os engenheiros especialistas em linhas de transmissão. Para alta tensão, as regiões de seccionamento em disjuntores estão imersas em gases a fim de amenizar os efeitos da ionização. Durante a ionização, os elétrons se multiplicam de forma

exponencial e se o campo elétrico aplicado for suficientemente grande ocorre o aparecimento de um arco elétrico.

Um conceito importante para o entendimento do processo de isolação nos disjuntores é a rigidez dielétrica. Também chamada de gradiente de tensão de ruptura de um material, a rigidez dielétrica é a maior intensidade de campo elétrico que um meio dielétrico pode suportar, por unidade de espessura, em um campo elétrico uniforme. Em gases, a rigidez aumenta progressivamente com a distância entre os eletrodos.

O gás em alta pressão proporciona uma forma flexível e viável para o isolamento de alta tensão. Estes produzem campos de até 25 MV/m. O gás nitrogênio (N2) foi o primeiro gás utilizado para altas pressões devido à sua inércia e estabilidade química, contudo, sua resistência dielétrica é praticamente a mesma do ar.

A busca por gases mais pesados como possíveis isoladores foi efetuada e resultou no descobrimento do gás Hexafluoreto de Enxofre (SF6). Este gás foi desenvolvido para manter uma superioridade em cerca de duas vezes e meia em relação ao isolamento do gás N2 à pressão atmosférica. Foi observada no gás SF6 uma capacidade superior em extinguir um arco elétrico em relação aos outros gases. É relevante salientar que, dos gases analisados, o gás SF6 é provavelmente o dielétrico mais utilizado.

II. Meio Isolante: Líquido

Os líquidos são usados em equipamentos de alta tensão e servem como isolamento e condução de calor. As falhas temporárias devido às sobretensões são novamente isoladas com rapidez pelo fluxo do líquido na área atacada, no entanto, os produtos oriundos das descargas elétricas podem levar a sua degradação. Este fato é perigoso uma vez que estes líquidos são inflamáveis. O mecanismo de desagregação dos líquidos é o mesmo do gás e pode ser significativamente alterado pela presença das impurezas sólidas e gases dissolvidos.

Os líquidos isolantes mais comuns são os óleos derivados do petróleo. Fluorocarbonetos, silicones e o óleo de rícino são utilizados em quantidades significativas. Entre as propriedades elétricas mais importantes do líquido estão a rigidez dielétrica, a condutividade, o ponto de fulgor, o teor de gás, a viscosidade, a constante dielétrica, o fator de dissipação, a estabilidade, entre outros.

A utilização dos polibutanos vem aumentando gradativamente devido ao seu baixo fator de dissipação. O óleo de mamona é um bom dielétrico em alta tensão devido a sua alta resistência ao efeito corona, a alta constante dielétrica, a não toxicidade e alto ponto de fulgor.

Os líquidos podem ser utilizados em solicitações na ordem de 5-6 MV/m em equipamentos operados de forma contínua. Em aplicações onde o líquido somente preenche os espaços vazios do sólido, como as buchas de alta tensão, ele pode ser utilizado em tensões elevadas na ordem de 10-20 MV/m.

III. Meio Isolante: Sólido

Se o material isolante em estado sólido é verdadeiramente homogêneo e livre de imperfeições, o seu ponto de ruptura dielétrica é na ordem de 1000 MV/m. Este valor somente pode ser obtido em condições de laboratório cuidadosamente controladas. Na prática os valores obtidos são muito menores que 1000 MV/m. Esta diminuição ocorre devido a vários mecanismos e se deve principalmente a falha de isolamento na sua superfície.

Um problema comum é a ruptura dielétrica. Esta falha pode ocorrer devido à degradação química causada pelo calor gerado nas perdas dielétricas do material em seu isolamento. Este processo é cumulativo ao longo do tempo sendo mais grave na presença de ar e umidade. Um simples abrasamento ou a formação de um caminho condutor sobre a superfície pode gerar um rompimento sobre um isolador, causando a degradação do material.

A vida útil das características de tensão do dielétrico é determinada pelas descargas parciais. Estas descargas circulam em espaços vazios internos das cavidades do dielétrico e a energia dissipada neste processo provoca a deterioração das paredes da cavidade. Isso dá origem ao aparecimento de pequenas regiões de gás. Na prática não é possível eliminar completamente as descargas parciais, mas um nível de descargas é fixado, estipulando a vida útil esperada do equipamento. Além disso, o engenheiro responsável pelo equipamento deve projetar cuidadosamente as distribuições de campo elétrico e eliminar espaços vazios. Este conceito deve ser aplicado especialmente nos sistemas de alta tensão e alto campo magnético que exigem um controle de qualidade elevado durante a fabricação e montagem. Como uma solução mitigatória, o efeito das descargas parciais pode ser minimizado por isolamento a vácuo.

Os disjuntores de alta tensão, as buchas, os cabos e os transformadores são dispositivos típicos para os quais os efeitos de descargas parciais devem ser considerados no projeto. Esta consideração leva em conta a intensidade do campo elétrico no início de ruptura e a taxa de aumento da corrente antes da ruptura.

É importante que a tensão de ruptura seja adequadamente avaliada e sua distribuição determinada. Com isso, tem-se um melhor dimensionamento do nível de isolamento do disjuntor, principalmente na suportabilidade em relação a TRT e a TCTRT.

3.3.2 Teoria de interrupção de corrente

Em um disjuntor, a interrupção ocorre durante a passagem da corrente pelo zero. Neste processo a resistência elétrica aumenta e cede espaço à passagem de corrente elétrica pelo material dielétrico durante a abertura dos contatos metálicos do disjuntor.

O meio dielétrico se opõe a passagem de corrente elétrica e resiste ao esforço da tensão em manter o fluxo de corrente. Este esforço é chamado de tensão de recuperação ou TRT.

Como exemplo de uma interrupção tem-se a Figura 3.7. Esta Figura mostra uma forma de onda de um curto-circuito típico em um meio indutivo. Uma falta é aplicada em um tempo inicialmente zero e limitada por uma impedância.



Figura 3.7: Interrupção de Corrente (Dufournet et al., 2008)

O disjuntor inicia sua abertura em t_1 devido ao tempo gasto pelo mecanismo eletromecânico em abrir os seus contatos e pelo tempo de atuação do relé de proteção. Neste período até o tempo t_2 há uma manifestação do arco elétrico e em seguida tem-se uma TRT entre os contatos do disjuntor. Se houver a ruptura da rigidez dielétrica durante o aparecimento da TRT um novo arco elétrico será formado. Durante a abertura, considerando uma tensão crescente aplicada, podem ocorrer cinco etapas distintas:

I. Etapa ôhmica

A corrente de curto que fluía pelos contatos fechados do disjuntor vai inicialmente se estabelecendo através da ionização do meio dielétrico. Com isso, em um primeiro momento, a corrente varia linearmente de acordo com a tensão.

II. Etapa de saturação

Devido ao número de íons serem constantes e limitados, a corrente elétrica atinge um valor máximo chamado de saturação de arco. Durante a saturação, o acréscimo de tensão não ocasionará aumento de corrente. As partículas carregadas e recolhidas pelos eletrodos são substituídas por novas partículas formadas (Cahier Technique 158).

Um fenômeno denominado recombinação diminui o número de partículas ionizadas paralelamente ao processo de ionização. A simultaneidade destes processos retrata um comportamento de equilíbrio dinâmico, o que favorece o predomínio de um deles.

III. Etapa de pré-descarga

Durante esta etapa os elétrons fortemente acelerados adquirem uma energia cinética que possibilita o acréscimo de um novo elétron por choque de uma partícula neutra. Se a tensão reduzir, a aceleração dos elétrons e a corrente diminuirão. Por outro lado, se a tensão aumentar, a corrente aumenta exponencialmente.

IV. Etapa de descarga autossustentada

Nesta etapa um arco entre os contatos do disjuntor é estabelecido com um determinado valor de tensão. Uma vez estabelecido o arco, mesmo com o decréscimo da tensão, a corrente permanece aproximadamente constante.

V. Etapa da extinção térmica e dielétrica

No instante em que a corrente do arco elétrico chega próximo de zero, o valor da resistência do meio cresce. Isso dá origem ao primeiro passo em direção à interrupção. O meio entre os terminais do arco não está totalmente recombinado e o valor da condutância residual, apesar de ser pequena, é diferente de zero. A partir do momento em que é aplicada uma tensão sobre C_r, surge uma corrente de pequena amplitude denominada corrente pós-arco. Os valores de C_r e da corrente pós-arco são baixos e a potência dissipada no meio entre os terminais não é suficiente para reiniciar a ionização e uma consequente descarga elétrica.

Para o sucesso da interrupção do arco durante fase térmica é necessário que a energia total dissipada entre o arco até o zero de corrente seja menor que a absorvida pelo fluxo de gás. A energia dissipada pela corrente pós-arco tem que ser insuficiente para reaquecer o meio (Alessandra Sá, 2010).

Pode-se observar que a eficiência de ionização pode aumentar devido ao campo elétrico, principalmente em regiões com grande densidade de partículas carregadas. Existem

algumas formas para aperfeiçoar o processo de interrupção de uma corrente elétrica. Para a interrupção de um arco (Cahier technique 158) deve-se trabalhar com as seguintes propriedades:

I. Aumentar sua resistência

Isto pode ser realizado com o alongamento ou diminuição da seção do caminho do arco dentro do disjuntor.

II. Aumento de sua mobilidade

O dispositivo mecânico do disjuntor deve ser o mais rápido possível. Isso faz com que diminua a emissão de arco pelo aquecimento dos contatos do disjuntor.

III. Aumento da agitação molecular

A agitação molecular vai dificultar a ionização e consequentemente o desencadeamento do processo de formação do arco. Uma forma de aumentar a agitação é o acréscimo de pressão no meio onde estão inseridos os contatos de seccionamento do disjuntor.

Como exemplo ilustrativo tem-se uma solução patenteada pela SIEMENS em 1973, chamada de princípio da auto compressão, que utiliza a energia do arco para aumentar a pressão durante sua trajetória pelo disjuntor (Siemens, 2015).





O caminho da corrente é formado pelas placas terminais de 1 a 8. No momento em que o disjuntor está fechado a corrente de operação é dirigida para o contato principal (4). Um contato em arco (5) é paralelo a esta corrente (Siemens, 2015). Durante o processo de abertura, o contato principal (4) abre e a corrente comuta para o contato de arco ainda fechado. Se este contato for aberto em seguida, um arco surge entre os contatos (5). Ao mesmo tempo, o cilindro (6) move para a base (7) e comprime o gás na têmpera. Em seguida, o gás flui na direção inversa por meio do cilindro (6) em direção ao contato em arco (5) e extingue o arco presente (Siemens, 2015). As Figuras representativas das etapas de interrupção de corrente no disjuntor podem ser vista pela foto real tirada de um disjuntor mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.9: Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a SF6

Na presença de elevadas correntes de curto-circuito, o gás de extinção será aquecido substancialmente pela energia do arco. Isto leva a um aumento da pressão no cilindro de contato. Neste caso, a energia da pressão de extinção necessária tem de ser produzida pelo mecanismo de operação. Em seguida, o contato de arco fixo libera o fluxo externo do bocal (3). O gás é expelido do cilindro de contato de volta ao bocal, eliminando o arco (Siemens, 2015). Todo este processo é uma maneira de aperfeiçoar o processo de interrupção do disjuntor e garantir que não haja reignição do arco elétrico.

De uma maneira geral é importante conhecer mais detalhadamente sobre o meio dielétrico constituinte do disjuntor. Em manobras em alta tensão os contatos do disjuntor devem ser constituídos de materiais que promovam condições favoráveis para a interrupção da corrente elétrica.

3.4 Superação de disjuntores normalizada

A norma atualmente em vigor no Brasil, adotada como referência para os parâmetros de suportabilidade de TRT é a (IEC 62271-100:2008). Esta norma contém as condições necessárias para a especificação dos disjuntores em suportar as solicitações máximas previstas nos estudos de TRT.

3.4.1 Características nominais do disjuntor

Os aspectos intrínsecos de um disjuntor, incluindo acessórios e equipamentos auxiliares, devem estar condizentes com as especificações nominais do sistema. Existem características normalizadas que aplicam a todos os disjuntores, ou seja, há uma obrigatoriedade do fabricante em fornecer construtivamente disjuntores de acordo com a norma (IEC 62271-100:2008). Estas especificações estão relacionadas conforme:

- I. Tensão nominal;
- II. Nível de isolamento nominal;
- III. Corrente nominal de regime contínuo;
- IV. Corrente suportável nominal de curta duração;
- V. Valor da crista da corrente suportável nominal;
- VI. Duração nominal do curto-circuito;
- VII. Capacidade de interrupção nominal de curto-circuito;
- VIII. Tensão de restabelecimento transitória relativa à capacidade de interrupção nominal de curto-circuito.

3.4.2 Nível de isolamento

Em disjuntores existem vários níveis de isolamento nominal para permitir a aplicação de critérios ou padrões de suportabilidade. Em relação ao curto-circuito, os disjuntores são especificados para suportar o Ik no tempo máximo de 1s e seu valor é calculado considerando um curto-circuito permanente no tempo de 30 ciclos. No momento da abertura dos contatos, o disjuntor deve suportar a corrente de curto-circuito de abertura (Ib) simétrica, sendo que a componente contínua não pode ultrapassar 20% (IEC 62271-100:2008).

Em relação ao TRT é recomendável que a escolha seja feita considerando o grau de exposição a sobretensões de frente de onda rápida e lenta, o tipo de aterramento do neutro e o tipo dos dispositivos limitadores de sobretensão (IEC 60909-0:2016). A tabela A.2 do anexo, retirada da norma (IEC 62271-100:2008), contém os limites de isolamento nominais válidos para fase e terra, entre fases e entre os contatos abertos do dispositivo de manobra.

3.4.3 Fator de primeiro polo

No instante da TRT, a maior solicitação de tensão incide no primeiro polo. Este fator é um dos requisitos básicos para o dimensionamento das solicitações impostas no disjuntor durante o fenômeno da TRT. É a razão da tensão à frequência nominal entre os terminais do primeiro polo a interromper antes da ocorrência do curto-circuito (Dufournet *et al.*, 2008). O fator de primeiro polo depende das condições de aterramento do sistema e caracteriza-se pela tensão em regime permanente nos terminais do primeiro polo a abrir (J. Zanetta, 2003). A sua classificação está relacionada com o tipo de aterramento e pode ser sugerida conforme tabela 3.2.

Tipo de Aterramento	Fator de Primeiro Polo (k _{nn})			
Neutro solidamente aterrado	1,0			
Neutro aterrado	1,3			
Neutro isolado	1,5			

Tabela 3.2: Fator de primeiro polo em função ao tipo de aterramento (Dufournet et al., 2008)

No cálculo do fator de primeiro polo, considerando faltas trifásicas, utiliza-se a equação 9 (Naidu, 1995).

$$k_{pp} = \frac{3X_0}{X_1 + 2X_0} \tag{9}$$

Onde $X_0 e X_1$ são respectivamente, as reatâncias de sequências zero e positiva do sistema. Se $X_0 >> X_1$ o valor do k_{pp} tende a 1,5 e para $X_0 = 3 X_1$ seu valor tende a 1,3. Em sistemas com variação do tipo de falta e de valores das reatâncias, utilizam-se os seguintes conceitos (Naidu, 1995):

A. Sistemas não aterrados

Logo após a abertura do primeiro polo, as correntes remanescentes se distribuem pelas outras duas fases. As tensões fase-fase $E_B e E_C$, conforme Figura 3.10, estão em série. A diferença de tensão entre estas duas fases resultará no respectivo valor da tensão fase-terra multiplicada por $\sqrt{3}$. As metades destes equivalentes de tensão estarão disponíveis para os dois polos restantes. Com isso, o fator de polo para os demais a serem abertos resulta em:

 $k_{pp} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$



Figura 3.10: Circuito representativo para um sistema não aterrado (Dufournet et al., 2008)

B. Sistemas aterrados

Para sistemas aterrados com falta trifásica a terra, o fator de polo obedece a equação 10 (Naidu, 1995). Considerando $(X_0/X_1) = 3$, o valor do k_{pp} para o segundo e terceiro polo resulta respectivamente em 1,25 e 1.

$$k_{pp} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{X_0^2 + X_0 X_1 + X_1^2}}{X_0 + 2X_1} \tag{10}$$

3.4.4 Suportabilidade de TRT frente às faltas terminais

Para mensurar a suportabilidade da TRT é utilizada a técnica de envelopamento. Esta técnica consiste em uma análise gráfica onde são traçadas retas que contém o limite de superação do disjuntor. A onda de uma TRT pode assumir diferentes formas, na maioria das vezes oscilatórias. A análise destas oscilações ou formas de TRT garante que não haja reignição do arco e também rompimento no dielétrico.

Os níveis de superação durante a análise de TRT nos disjuntores são aplicáveis levando em consideração o tipo de curto-circuito, aterramento e nível de tensão nominal máxima do disjuntor. Os segmentos de reta são formados por envelopes de dois ou quatro parâmetros. Estes envelopes, ilustrados nas Figuras 3.11 e 3.12, foram introduzidos em norma (IEC 62271-100:2008), a fim de facilitar a comparação de uma TRT obtida durante os testes ou simulações, em comparação a um TRT especificada.



Figura 3.11: Curva de dois parâmetros normalizada (IEC 62271-100:2008)



Figura 3.12: Curva de quatro parâmetros normalizada (IEC 62271-100:2008)

Primeiramente é traçado o segmento de reta relativo à suportabilidade do disjuntor. De acordo com a tabela A.2 do Anexo 1, dentre todos os níveis de tensões disponíveis, é escolhido o nível de tensão conforme projeto. Dependendo do tipo de falta e nível de tensão é fornecido envelopes com dois ou quatro parâmetros. Para o envelope de dois parâmetros, é fornecido o parâmetro de tensão U_c e o tempo t₃. No envelope de quatro parâmetros são fornecidos U₁ e t₁, para o primeiro segmento de reta, e U_c e t₂ para o segundo segmento de reta. Todas as oscilações de tensão não podem ultrapassar este envelopamento.

3.5 Conclusões

Neste capítulo são vistas as informações necessárias para o conhecimento da superação dos disjuntores. Estas informações precedem o entendimento da TRT e auxiliam na escolha correta das mitigações. O próximo capítulo explora os conceitos e as prerrogativas propostas nesta dissertação, iniciando com as análises do fenômeno da TRT.

4 Tensões de Restabelecimento Transitórias

Inicia-se este capítulo com uma definição básica: tensão de restabelecimento transitória é a tensão que surge nos terminais do disjuntor no momento da interrupção, com a passagem do zero de corrente, durante um curto-circuito.

A fim de atingir o objetivo desta dissertação, necessita-se explorar além deste conceito. No capítulo 2 é feito um questionamento sobre o fenômeno da TRT. A partir dos conceitos dos capítulos anteriores, esta resposta começa a ser esclarecida. Pode-se avançar no raciocínio que o surgimento desta tensão é o resultado da mudança de estado do sistema elétrico. Neste processo de transição, o disjuntor deixa de ser condutor e torna-se isolador. Esta transição fará com que o mesmo seja imerso em uma série de fenômenos. Considerando os contatos do disjuntor, no momento de sua abertura, haverá uma força contrapondo o movimento de abertura, provocando uma oscilação de energia no disjuntor, sujeitando-o a uma solicitação em seu meio dielétrico. Um bom disjuntor irá seccionar o curto-circuito sem maiores problemas. Um disjuntor mal dimensionado conduzirá uma corrente elétrica através de um arco elétrico devido ao rompimento da rigidez dielétrica em seus contatos.

Em resumo, os estudos de TRT compreendem a análise de disjuntores e dos tipos de interrupções e solicitações a que eles são submetidos. Este fenômeno tem a capacidade de restabelecer a corrente de curto-circuito após a abertura do disjuntor. Estes estudos objetivam quantificar as solicitações impostas aos disjuntores e abrangem avaliações de TRT sob as diversas condições de manobras de abertura de disjuntores (ONS, 2013). Os impactos que podem ocorrer em um sistema elétrico é um dos mais importantes objetivos da análise transitória. Estes fenômenos são causados por distúrbios que propagam pelo sistema (D'ajuz *et al.*, 1987).

Uma TRT possui uma alta frequência e alta tensão. A sua forma de onda pode ser oscilatória, exponencial ou uma combinação destas duas formas. O resultado final é determinado pelas ligações e características dos parâmetros elétricos distribuídos ao longo da rede elétrica (Baina *et al.*, 2012).

O período de interesse de uma tensão de restabelecimento transitória (TRT) varia na ordem de 1 a 2 ms (J. Zanetta, 2003). Em sua análise, há a necessidade do entendimento prévio deste fenômeno, suas equações e modelos matemáticos. Geralmente estes modelos são conservativos, pois não englobam totalmente todas as características físicas de amortecimento. Neste capítulo, têm-se os conceitos básicos fundamentais para o entendimento deste fenômeno, incluindo:

- Os cálculos da TRT;
- Os tipos de interrupção;
- A sua taxa de crescimento;
- O modelamento e os componentes do estudo de TRT.

Estes conceitos são importantes como pré-requisito para as simulações deste fenômeno.

4.1 Equações básicas de TRT

4.1.1 Introdução

Com o intuito de acrescentar uma verificação aos resultados da TRT, é evidenciado neste capítulo o equacionamento básico para o cálculo da TRT. Em um primeiro instante, é analisado um circuito para a análise de TRT, utilizando equações diferenciais. Vários aspectos relevantes, como o equivalente de rede e de carga são mostrados e modelados nas equações. Uma segunda ferramenta de cálculo, conhecida como método de injeção de corrente, também é referenciada devido a sua grande importância e aplicabilidade. A escolha destes cálculos depende do tipo de circuito e de sua complexidade.

Para o prólogo deste capítulo tem-se um sistema elétrico equivalente de acordo com a Figura 4.1. A capacitância parasita dos contatos do disjuntor, cabos e bucha do transformador são representadas pela capacitância C_{eq}. Esta capacitância influencia no pico de tensão de recuperação, que é estabelecido nos contatos dos disjuntores logo após a abertura.



Figura 4.1: Circuito de análise para a TRT

Considere um curto-circuito na carga com tensão de alimentação e(t) igual a $E_m sen(\omega t + \theta)$. A tensão nos terminais do disjuntor é igual à tensão no capacitor V_c(t). Logo, simplificando o circuito da Figura 4.1 tem-se seu equivalente conforme da Figura 4.2.



Figura 4.2: Circuito equivalente para a análise da TRT

Para sua solução, inicialmente aplica-se a lei de Kirchhoff para tensões (J. Zanetta, 2003).

$$e(t) = v_r(t) + v_l(t) + v_c(t)$$
(11)

A equação 11 evidencia a distribuição de tensão na resistência, na indutância e na capacitância. Estas podem ser reescritas na forma de equações diferenciais de acordo com a equação 12.

$$e(t) = v_c(t) + L\frac{di}{dt}(t) + Ri(t)$$
(12)

A corrente no capacitor pode ser representada conforme $i(t) = C \frac{dv_c}{dt}(t)$. Como o circuito está em série, a mesma corrente que passa pelo capacitor percorre também a indutância e a resistência. Pode-se então substituir esta corrente capacitiva na equação 12. O resultado é visto na equação 13.

$$e(t) = v_c(t) + RC\frac{dv_c}{dt}(t) + LC\frac{d^2v_c}{dt}(t)$$
(13)

A solução para esta equação considerando condições iniciais nulas resulta na equação 14. As raízes extraídas do denominador são conforme 15 e 16.

$$V_c(s) = \frac{E_m[\omega\cos(\theta) + s\sin(\theta)]}{LC(s^2 + \omega^2)(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC})}$$
(14)

$$\lambda_{1,2=} \pm j\omega \tag{15}$$

$$\lambda_{3,4=} - \frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \tag{16}$$

Em análise às raízes resultantes 15 e 16, as soluções da equação 14 assumem três condições:

- a) $\frac{R}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC}}$: Raízes reais, circuito superamortecido;
- b) $\frac{R}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$: Amortecimento crítico e raízes iguais;
- c) $\frac{R}{2L} < \frac{1}{\sqrt{LC}}$: Circuito subamortecido e raízes complexas.

Se a resistência for pequena e introduzindo simplificações, obtém-se a resposta em função do tempo:

$$v_c = E_m[\cos(\omega t) - e^{-\frac{R}{2L}t}\cos(\omega_0 t)]$$
(17)

A frequência natural pode ser calculada por $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Desprezando o amortecimento, quando $\omega_0 > \omega$ e considerando um pequeno intervalo de tempo resultando em $\cos(\omega t) \cong 1$, pode-se reescrever a equação 17 em sua forma simplificada:

$$v_c = E_m[1 - \cos(\omega_0 t)]. \tag{18}$$

Esta equação fornece bons resultados para circuitos com pouco amortecimento e pode ser adotada como ponto de partida para o cálculo de TRT.

4.1.2 Método de injeção de corrente

O método de injeção de corrente simula o efeito da abertura do disjuntor com a injeção de uma corrente contrária à do sistema. Este método é mostrado na Figura 4.3. A polaridade da corrente inversa –I(t) é sobreposta à corrente que flui inicialmente I(t) a partir dos terminais do disjuntor. A somatória destas duas correntes é igual a zero, o que corresponde à interrupção da corrente.



Figura 4.3: Gráfico evidenciando a injeção de corrente

O método de injeção de corrente é representado na Figura 4.4 em (a), (b) e (c). A somatória total é vista em (a), que pode ser decomposta por (b) + (c), por meio do princípio da superposição. Neste método são considerados apenas os parâmetros do circuito visto a partir dos terminais do disjuntor.



Figura 4.4: Técnica de interrupção de corrente

Como foi visto anteriormente, a tensão de restabelecimento tem um período de interesse muito curto (1 a 2ms) onde a resposta senoidal pode ser aproximada por uma rampa de corrente durante este período (J. Zanetta, 2003).



Figura 4.5: Aproximação de i'(t)

A partir deste conceito, considera-se a corrente do sistema como $i(t) = i_0 sen(\omega t)$. Como pode ser visto na Figura 4.5 esta corrente tem sua forma senoidal e pode ser aproximada em sua tangente, ou seja, derivando i(t) em relação ao tempo: $\frac{di_{(t)}}{dt}|_{t=0} = \omega i_0 cos(\omega t)$. Utilizando o mesmo raciocínio do item anterior e considerando um pequeno intervalo de tempo com $\cos(\omega t) \cong 1$, resulta na derivada de i(t) conforme equação 19.

$$i'(t) = \omega i_0 t. \tag{19}$$

Considerando ωi_0 como uma constante $k = \omega i_0$, o resultado de i'(t) pode ser reescrito como:

$$i'(t) = kt. (20)$$

Onde i'(t) representa a rampa aproximada anteriormente vista pela Figura 4.5. A partir desta aproximação, pode-se calcular a TRT. Considerando $i_0 = \frac{E_0}{\omega L} e e(t) = L \frac{d (i'(t))}{dt}$ tem-se: e(t) = Lk. (21)

A equação 21 é uma reta aproximada que contém o valor da TRT obtida a partir de i'(t). A forma gráfica desta representação do valor da TRT é visto na Figura 4.6.



Figura 4.6: Aproximação no valor da TRT

Com os conceitos apresentados neste item, pode-se utilizar o pequeno sistema elétrico ilustrado na Figura 4.7 a fim de exemplificar o uso do método de injeção de corrente no cálculo da TRT. O equivalente deste sistema pode ser representado pelo circuito da Figura 4.8.



Figura 4.7: Sistema com linha de transmissão



Figura 4.8: Circuito equivalente

A sua impedância equivalente é exposta na equação 22.

$$Z_e(s) = \frac{s}{C\left(s^2 + \frac{s}{ZC} + \frac{1}{LC}\right)}.$$
 (22)

Logo, obtém-se a tensão:

$$V(s) = \frac{k}{Cs\left(s^2 + \frac{s}{ZC} + \frac{1}{LC}\right)}.$$
(23)

A partir da antitransformada, têm-se os polos da função racional:

$$S_{s,3} = -\frac{1}{2ZC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2ZC}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$
(25)

No caso de uma resposta oscilatória, tem-se:

$$\frac{1}{2ZC}^2 < \frac{1}{LC}.$$
(26)

Com isso, as expressões presentes nas equações 24 e 25 podem ser substituídas a fim de se ter uma simplificação na equação final, utilizando $\delta = -\frac{1}{2ZC} e \omega_d = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2ZC}\right)^2}$. A partir desta simplificação, obtém-se:

$$v(t) = kL \left[1 - e^{\delta t} (\cos(\omega_d t) - \frac{\delta}{\omega_d} sen(\omega_d t)) \right]$$
(27)

Pode-se considerar a equação 28 para o caso de uma resposta amortecida:

$$\frac{1}{2ZC}^2 > \frac{1}{LC}.$$
(28)

Assim, simplificando com $a = -\frac{1}{2ZC} e b = \sqrt{\left(\frac{1}{2ZC}\right)^2 - \frac{1}{LC'}}$ obtêm-se:

$$v(t) = kL \left[1 - e^{at} (\cosh(bt) - \frac{a}{b} \operatorname{senh}(bt) \right]$$
(29)

Na maioria dos casos, pode-se desprezar o efeito da capacitância parasita, obtendo o circuito da Figura 4.9. O equivalente deste circuito resulta em: $Z_e(s) = \frac{ZsL}{Z+sL}$. Com isso obtém-se a tensão de acordo com a equação 30 e sua antitransformada conforme equação 31.

$$V(s) = \frac{k}{s^2} \frac{Zs}{(s + \frac{Z}{L})} = \frac{kZ}{s(s + \frac{Z}{L})}.$$
(30)

$$v(t) = kL\left(1 - e^{-\frac{Z}{L}t}\right).$$



Figura 4.9: Circuito equivalente sem capacitâncias

A equação 31 é uma forma simplificada que pode ser utilizada durante o cálculo da TRT. É uma primeira aproximação durante o cálculo deste fenômeno. A partir deste procedimento e considerando os demais analisados até o momento, encerram-se os conceitos de cálculos de TRT. Em sequência tem-se um acréscimo ao entendimento deste fenômeno com a abordagem dos tipos de interrupções de corrente.

4.2 Tipos de interrupção de corrente

A interrupção de corrente é um dos princípios básicos para o entendimento da TRT. No processo de abertura de um disjuntor existem vários tipos de interrupções. Cada tipo afeta o comportamento e a natureza da TRT de uma maneira particular. Nos próximos itens, são abordados os tipos de interrupções em um disjuntor.

(31)

4.2.1 Interrupção de arco

Uma interrupção de corrente elétrica, mesmo após os contatos elétricos estarem abertos, será bem sucedida desde que os meios de reignição elétrica sejam removidos. A diferença entre os contatos terão que mudar de uma forma de condutor elétrico a um isolante elétrico onde idealmente ficará com uma corrente zero.

Antes da abordagem deste assunto, é necessário o entendimento das teorias que envolvem este tema. Neste contexto, há inúmeras teorias relativas à interrupção da corrente elétrica e a maioria é baseada nas teorias originais de Cassie (Cassie, 1939) ou Slepian (Slepian, 1928).

Na primeira teoria de interrupção analisada, segundo Cassie "se a energia perdida do arco, a corrente de zero exceder o fornecimento de energia a partir do circuito elétrico externo, a corrente elétrica deixará de fluir." (Cassie, 1939)

Na segunda teoria sobre interrupção de corrente elétrica, segundo Slepian "se depois de zero de corrente a rigidez dielétrica do espaço de contato aumenta a uma taxa maior do que a tensão transitória, então o disjuntor irá interromper o circuito definitivamente" (Slepian, 1928).

O contexto da interrupção de corrente é ilustrado de acordo com a teoria de Slepian na Figura 4.10.



Figura 4.10: Teoria da interrupção e reignição de Slepian (Slepian, 1928)

O sucesso da interrupção é mostrado na Figura 4.10 (a), onde a recuperação dielétrica excede a tensão transitória. A Figura 4.10 (b) mostra uma interrupção mal sucedida com uma reignição em um ponto onde a tensão supera a rigidez dielétrica do disjuntor. Existem três tipos de correntes durante a análise do processo de interrupção: a corrente resistiva, a indutiva e a capacitiva. Uma abordagem destes tipos de interrupção é necessária para compreender o processo de formação da TRT.

4.2.2 Interrupção de cargas resistivas

Como exemplo tem-se um circuito constituído puramente com carga resistiva. Isto significa que a tensão da rede e a corrente de carga estão em fase, com valores de zero coincidente. Quando a corrente de carga é interrompida próxima à passagem do zero de corrente, a corrente de carga e a tensão de recuperação do sistema tem um valor relativamente baixo (Stewart, 1995). Isto é ilustrado na Figura 4.11 onde o pico do arco é muito baixo e a resistência relativamente elevada do circuito irá amortecer as oscilações de tensões. Neste tipo de interrupção as solicitações impostas nos disjuntores são menores.



Figura 4.11: Interrupção de cargas resistivas (Stewart, 1995)

4.2.3 Interrupção de cargas indutivas

Um disjuntor interrompe correntes indutivas em dois principais tipos de circuito: a primeira sendo a interrupção de uma corrente de curto-circuito e a segunda a interrupção da corrente de magnetização.

A tensão transitória de um circuito altamente indutivo é completamente diferente em relação à interrupção da corrente de carga resistiva. Isso é devido aos diferentes valores instantâneos de tensão do sistema na passagem pelo zero de corrente. Durante o período de formação de arco elétrico, a tensão entre os contatos é igual à queda de tensão no arco. No processo de interrupção da corrente de carga, na medida em que a corrente deixa de fluir, a tensão entre os contatos aumenta (Stewart, 1995). Esta tensão cresce para coincidir com a tensão do sistema.

A tensão de recuperação em um circuito indutivo tenderá a duas vezes em relação ao valor nominal. Esta tensão irá aparecer em todo o espaço entre os contatos de um disjuntor, no momento da interrupção de uma falta indutiva. Isso é ilustrado na Figura 4.12.



Figura 4.12: Tensão de restabelecimento transitória durante a interrupção de cargas indutivas (Stewart, 1995)

Pode-se de uma maneira qualitativa, conforme os conceitos esboçados neste item, estimar os valores do pico da TRT. Considerando um sistema com neutro aterrado, o valor de pico da tensão será conforme a equação 32. E para um sistema com neutro isolado, o pico de tesnão é de acordo com a equação 33 (Stewart, 1995).

A partir das equações 32 e 33 tem-se:

D: Fator de amortecimento;

E: Valor de pico da tensão fase-terra do sistema;

V: Tensão de arco.

Este método conduz ao valor máximo de TRT. O valor do amortecimento é verificado durante a simulação no ATP sendo que o mesmo se encontra entre 0,7 e 1. A tensão de arco é aproximadamente 300 V (Stewart, 1995). As equações 32 e 33 são utilizadas como uma referência adicional nas simulações de TRT durante a abertura de correntes indutivas.

4.2.4 Interrupção de pequenas correntes indutivas

Dentro do contexto de correntes indutivas, seus pequenos valores possuem uma análise peculiar. Quando uma pequena corrente com grande indutância está sendo seccionada, o nível de tensão resultante pode ser elevado. As tensões e correntes no momento da interrupção são ilustrados na Figura 4.13 (Stewart, 1995). Antes de diminuir em direção ao seu zero, a corrente de arco atinge um nível limite em que se torna instável e se interrompe. Este limiar é função do material dos contatos do disjuntor.



Figura 4.13: Tensão e corrente geradas com corrente de corte (Stewart, 1995)

Esta pequena corrente indutiva também é chamada de corrente de corte ou *current chopping*. Este termo veio para o vocabulário com o advento do disjuntor a vácuo que foi inserido comercialmente na década de 1950. Anteriormente, a comutação era feita por disjuntores a ar ou óleo, onde seus tempos de abertura eram relativamente lentos e sua taxa de recuperação dielétrica era superior à TCTRT.

Na abertura de um disjuntor a vácuo têm-se movimentos de alta velocidade com pequenos deslocamentos necessários para obter a interrupção do arco. Isto é devido a sua baixa massa. Com isso, o arco será extinto e imerso a uma taxa de restabelecimento transitória elevada em intervalo de tempo curto. Isso leva a uma diminuição da corrente instantânea para o zero com uma TRT para o equipamento a jusante.

O corte da corrente instantânea para o zero gera como resultado um alto di/dt, induzindo uma alta tensão transitória com uma alta frequência, como mostrado na Figura 4.14.



Figura 4.14: Corrente de corte - sem reignição (Meets, 2015)

Para exemplificar as características da corrente de corte tem-se a Figura 4.15. Nesta Figura estão representadas as tensões durante uma abertura de um disjuntor em um sistema elétrico com baixas correntes e susceptíveis a este fenômeno. Uma TRT₁ surge entre os contatos no momento que o circuito do disjuntor V_{AB} inicia sua abertura. As retas AB e AC representam os limites da rigidez dielétrica no espaçamento ("gap") entre os contatos do disjuntor, em função do tempo (Meets, 2015).



Figura 4.15: TRT produzido pela corrente de corte (Meets, 2015)



Figura 4.16: TRT produzido pela corrente de corte – "Current Chopping" (Meets, 2015)

A Figura 4.15 apresenta duas retas A e B que representam o limite da tensão de ruptura do disjuntor. Caso a tensão entre os contatos exceda o limite caracterizado por estas retas, haverá tensão transitória entre os contatos do disjuntor. Nas Figuras 4.15 e 4.16 as formas de ondas da tensão estão representadas em preto e as formas de ondas de corrente em vermelho. Como a TRT₁ atinge o limite de tensão de ruptura AB e a distância entre os contatos aumenta, um arco elétrico é formado. A tensão entre os contatos e a corrente I_1 que flui através do circuito são mostradas na Figura 4.16. O arco entre os contatos é interrompido apenas quando I1 atinge o seu zero de corrente. Logo após, outra TRT2 aparece entre os contatos. Isso faz com que haja outra solicitação de tensão que surge devido à diferença de tensão entre contatos do disjuntor que ainda estão em processo de separação. Um arco é formado através dos contatos e uma corrente I₂ flui no sistema. Este arco extingue quando I₂ atinge o seu zero e outra tensão transitória TRT₃ aparece entre os contatos. A reignição de contato continua até que a diferença entre os contatos do disjuntor seja tão grande que a tensão transitória de recuperação não possa mais interrompê-lo. A corrente de corte, apesar de pequena, possui grande capacidade de danos ao sistema elétrico. Sua análise deve ser bem criteriosa e inclusa durante as simulações.

4.2.5 Interrupção de cargas capacitivas

A comutação de bancos de capacitores e linhas a vazio exige que o disjuntor interrompa pequenas correntes capacitivas. Estas correntes são menores que dez amperes para a comutação de linhas em vazio e na maioria das vezes menos de mil amperes para desligar bancos de capacitores (Garzon, 2002).

No momento da interrupção de corrente, a tensão armazenada no capacitor E_c em um sistema solidamente aterrado é igual a 1,0 pu. Logo após meio ciclo, a tensão da fonte atinge o seu pico. Neste momento, o contato do disjuntor no lado da fonte tende seguir a oscilação da tensão de alimentação e a tensão entre os contatos pode atingir o seu valor de pico seguido de uma inversão da sua polaridade (T. E. Brown, 1984). Com isso a tensão total através dos contatos atinge um valor de 2,0 pu. Este valor corresponde à diferença algébrica da tensão do capacitor e a tensão da fonte como é mostrado na Figura 4.17. Se o sistema

possui neutro isolado, então a tensão no capacitor é de 1,5 pu e a tensão total através dos contatos após meio ciclo será igual a 2,5 pu (Garzon, 2002).



Figura 4.17: TRT durante o chaveamento de uma carga capacitiva (Garzon, 2002)

Um reacendimento ou "*restrike*" é análogo a uma operação de fechamento do disjuntor, onde o capacitor é subitamente de novo ligado à fonte. Se este reacendimento acontece no pico da tensão de sistema, então a tensão do capacitor irá atingir uma tensão de 3,0 pu. Sob estas condições, se o pico de corrente em alta frequência é interrompido na passagem por zero, então o capacitor fica com uma tensão de 3.0 pu e, meio ciclo depois, haverá uma tensão de 4,0 pu aplicada através dos contatos do disjuntor. Se a sequência é repetida, a tensão do capacitor irá atingir um valor de 5,0 pu (Garzon, 2002). A Figura 4.17 mostra a primeira reignição e posteriormente a segunda reignição interrompida na passagem pelo zero.

Teoricamente, se o amortecimento é ignorado, a tensão através do capacitor pode ser elevada sem limite. Com isso pode-se concluir que a interrupção de correntes capacitivas leva a picos severos durante uma TRT. Na análise da TRT, o pico de tensão é um dos fatores que mensuram a suportabilidade do disjuntor. Outro parâmetro importante é a TCTRT, onde é descrita no próximo item.

4.3 Taxa de crescimento de tensão de restabelecimento transitória (TCTRT)

A TCTRT, representada em kV/μs, é a taxa de crescimento ou a derivada da tensão em relação ao pico de tensão considerada. É definida de quatro maneiras distintas de acordo com a Figura 4.18, coma as retas A, B, C e D (Flurscheim, 1975):

A - Taxa média de crescimento de zero ao pico máximo da TRT;

B - Taxa média de crescimento de zero ao primeiro pico da TRT;

C - Máxima taxa média de crescimento expressa como a tangente à curva da TRT que passa pela origem;

D - Máximo valor instantâneo da TCTRT.



Figura 4.18: Diferentes tipos de TCTRT (Flurscheim, 1975)

$$TCTRT = \frac{dV}{dt}$$
(34)

Para a seleção e definição de TCTRT adotada (Flurscheim, 1975), deve-se levar em consideração o tipo do disjuntor a ser analisado. Para disjuntores a óleo, as definições A e B são mais apropriadas, enquanto que para disjuntores a ar comprimido e a SF6 é recomendável considerar as definições C e D, respectivamente.

A TCTRT calculada conforme equação 34 tem a propriedade de destruir o isolamento de componentes do sistema elétrico. A sua análise e mitigação é importante para a prevenção deste problema. A partir do pressuposto deste capítulo, com os conceitos até então adquiridos, tem-se os pré-requisitos básicos para o modelamento da TRT, que são descritos no próximo item.

4.4 Modelamento de componentes do estudo de TRT

O modelamento é uma representação numérica dos conceitos físicos que norteiam o sistema elétrico. Este sistema é constituído por vários componentes, onde cada um possui uma natureza física peculiar. Neste capítulo, tem-se a análise dos principais componentes dentro do horizonte da TRT.

4.4.1 Linha de transmissão e cabos

As linhas de transmissão podem ser representadas a partir de indutâncias, capacitâncias, resistências e condutâncias. Estes parâmetros por sua vez podem ser inseridos entre diversos modelos disponíveis no ATPDRAW. A sua utilização deve estar associada à escolha pertinente no ATP, em sua correta aplicação para fenômenos transitórios.

Parâmetros distribuídos, com o modelo de Clarke, podem ser utilizados em cabos de comprimento curto (< 100m) que conectam barramentos e equipamentos, tal como é o caso de grande parte das subestações industriais (Gustavsen *et al.*, 2005). A representação deste modelo no *software* ATPDRAW é ilustrada na Figura 4.19.

Component: LINEZT_3						
Attributes						
DATA	UNIT	VALUE		NODE	PHASE	NAME
B/I+	0hm/m	0		IN1	1	
R/I0	Ohm/m	0		OUT1	1	
L' +		500				
L'0		500				
C' +		3000000	00			
C' 0		3000000	00			
Copy 🏠 Paste 🔻 📄 Reset Order: 0 Labet						
Length DUU [M]			Eline Gondaddinoo G=0 G=0 G G=0 G			Vintage 1
Output No C, v C, tau G=R*C/L Svintage, 1					e ovindge, i	
Edit definitions C					Cancel	Help

Figura 4.19 Janela de introdução de dados para o modelo PI com matriz de E. Clarke- ATP

Na abordagem de linhas de transmissão são relevantes o entendimento sobre a variação de seu comportamento com a frequência. A partir deste conceito, e considerando linhas de transmissão com parâmetros variantes na frequência (Oramus, 2014), o *software* ATP possui uma rotina "LCC parameters", com os modelos Semlyen (Semlyen, 1975), Jmarti (Marti, 1982) e o modelo Taku Noda (Noda *et al.*, 1996). Em relação a estes modelos, o Jmarti é o mais utilizado devido a seu melhor desempenho e facilidade de uso, (Gomez, 2007).

José Marti (Jmarti) criou um modelo de linha de transmissão com uma abordagem mais precisa para a modelagem de linhas de transmissão em comparação com o modelo PI. O comportamento do modelo Jmarti é variável no domínio da frequência, o que melhora a precisão de cálculo para uma frequência definida em certa faixa de trabalho. Neste modelo a impedância característica e a função de propagação são calculadas utilizando características modais em uma faixa de frequência definida para uma matriz de transformação constante (Oramus, 2014). A entrada de dados do modelo Jmarti, conforme as Figuras 4.20 e 4.21 são efetuadas a partir dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão e suas disposições físicas. Estas informações são de fácil acesso e estão disponíveis de acordo com o projeto.

	Mo	del	Data Noo	des									
Γ		Ph.no.	Bin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid					
-	#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]					
-	1	1	0	0.742	0.2032	-17.5	27.9	13					
	2	2	0	0.742	0.2032	0	27.9	13					
	3	3	0	0.742	0.2032	17.5	27.9	13					
		Add re	ow	Delete las	t row	nsert row o	сору		(†	Move	ł	

Figura 4.20: Dados de entrada da linha de transmissão no ATPDraw

Model Data Nodes	
System type Name: test6 Overhead Line	Standard data Rho [ohm*m] 600 Freg. init [H2] 0.1 Length [km] 300 Set length in icon
Model Type Data Bergeron Decades Points/ PI 8 10	Dec
JMarti Freq. matrix [H2] Freq. 5 Semilyen Noda Use default fitting	
commone.	

Figura 4.21: Dados de entrada - Modelo JMartí

O modelo Jmarti e o de Clarke são relevantes para a análise da TRT. Em todos estes modelos leva em consideração a frequência do modelamento e o comprimento da linha de transmissão.

4.4.2 Transformadores

A Figura 4.22 mostra um transformador utilizado em sistemas de potência. Uma rotina utilizada para a representação do transformador no ATPDRAW é o BCTRAN. As entradas deste modelo consistem na potência, tensão, ligação das bobinas, impedâncias, perdas, frequência, ensaios de curto-circuito e de circuito aberto, entre outros. Estes parâmetros
podem ser obtidos com a placa de identificação e ensaios no transformador. Estas por sua vez são fornecidas para o cliente (concessionária, indústria, entre outros) no momento da compra. A rotina BCTRAN pode representar qualquer tipo de transformador, com dois e três enrolamentos, incluindo os autotransformadores. As entradas de dados deste modelo são mostradas na Figura 4.23.



Figura 4.22: Transformador de potência

BCTRAN: TF2	BCTRAN: TF2
Structure Ratings Number of phases 3 Number of windings 2 Type of core Other Test frequency [Hz] 50 VAR Dutput Phase shift [deg]	Structure Ratings Number of phases 3 • Number of windings 2 • Type of core Other • Test frequency [Hz] 60 AB Output Phase shift [deg]
Factory tests Open circuit Short circuit Performed at LV Connect at LV	Factory tests Open circuit Zero sequence data available
Volt (%) Curr (%) Loss (kW) 100 0.75 12	Imp. (%) Pow. (MVA) Loss (kW) HV-LV 3 12 60
Positive core magnetization View/Copy External Lm C External Lm Rm Rm C Lm-flux	

Figura 4.23: Dados de entrada - Modelo BCTRAN

A rotina BCTRAN fornece o modelo de transformador com bons resultados para diversas aplicações, incluindo os fenômenos de TRT. Nesta dissertação, este modelo é escolhido durante as simulações.

4.4.3 Banco de capacitores

Nas Figuras 4.24 e 4.25, mostra-se uma aplicação típica para banco de capacitores. Além de sua própria capacitância (C), os capacitores possuem uma indutância (L) e resistências (Rs, Rp) (Whitaker, 1999).

A capacitância C é determinada de acordo com as características nominais de potência reativa e tensão do banco. A indutância L representa o equivalente da indutância interna intrínseca do banco de capacitores e do reator limitador de corrente, onde os valores típicos são 5 μH e 100 μH, respectivamente (Meets, 2015). Os elementos Rs e Rp estão relacionados às resistências de perdas de contato e meio dielétrico, de acordo com a Figura 4.24 e exemplificada por uma foto real através da Figura 4.25. Para esta dissertação, considerando uma representação mais conservativa, somente a capacitância C é incluída nas análises de TRT.



Figura 4.24: Modelo de banco de capacitores



Figura 4.25: Banco de capacitores (IESA)

4.4.4 Cargas

As cargas em sistemas de energia são principalmente indutivas. Componentes reativos de motores e iluminação são principais contribuintes do sistema. As indústrias são os maiores consumidores dentro do perfil energético do sistema elétrico (ONS, 2014), portanto, estas que definem as características equivalentes das cargas em uma determinada região. As cargas têm um papel importante na análise de TRT. A sua representação é responsável pelo amortecimento das sobretensões. Em períodos de carga leve, a natureza capacitiva das linhas de transmissão prevalece em relação à natureza indutiva da carga. As tensões ficam bastante elevadas em função do acréscimo de reativos no sistema.

O ideal é que aferições sejam avaliadas entre os modelos e registros oscilográficos de campo a fim de analisar que tipo de representação produz maior confiabilidade ao perfil da carga de um ramal ou subestação. Contudo, tais informações nem sempre se mostram facilmente predispõe-se de modelos disponíveis е ao uso conservativos (Azevêdo et al., 2012). Na representação da carga, adotam-se modelos RL em série ou paralelo. A adoção do modelo RL série (Rs, Ls), ilustrado na Figura 4.26, provoca maior severidade aos níveis de TRT do que o modelo paralelo (Rp, Lp) conforme Figura 4.27(Azevêdo et al., 2012).



Figura 4.26: Representação de carga em circuito série



Figura 4.27: Representação de carga em circuito paralelo

Em alguns casos podem-se adotar metodologias conservadoras, desprezando a representação da carga na subestação sob a qual o transitório está sendo analisado

(Costa, 1999). Nesta dissertação, considerando-se resultados mais conservativos, é utilizado o modelo RL série para a representação de cargas no sistema elétrico.

4.4.5 Para-raios

No item 2.2, com a análise dos trabalhos de Azevêdo (Azevêdo *et al.*, 2012) e Caifa (Caifa, 2009), foi verificada a importância do efeito mitigador dos para-raios, principalmente nas soluções dos problemas de sobretensão. No instante em que as tensões excedem o seu limite, os para-raios funcionam como uma chave fechada, pois fornece um caminho entre a fase e a terra até que o sistema se restabeleça aos níveis normais de operação. A Figura 4.28 mostra um corte longitudinal de um para-raios.



Figura 4.28: Corte longitudinal de um para-raios (Mamede, 2013)

O ATP possui um modelo que simula a atuação dos para-raios. Isso se deve a inserção de uma curva V-I que caracteriza a não linearidade deste componente durante o fenômeno de TRT. Os seus parâmetros de entrada são conforme as Figuras 4.29 e 4.30.

Component: MOVN						
Attributes	Characteristic					
DATA	UNIT	VALUE		NODE	PHASE	NAME
Vref	Volts	10000		From	1	
Vflash	<0: No gap	-1		To	1	
Vzero	Volts	0				
#COL		1				
#SER		1				
ErrLim	pu	0.05				
Him	A	0.001				
Copy 🖺 Paste 🔻 📄 Reset Order: 0 Labet						
Comment:						
Output Hide						
						NumPh 1 🚔
E dit defini	tions		OK		Cancel	Help

Figura 4.29: Dados de entrada de para-raios no ATP

Component: MOV_3			×
Attributes Characteristic			
Arrester Data			
1 [A]	U [V]		Add
100	195300		
700	212800		Delete
100000	375500		
			Sort
			
			MOVE
			↓
External characteristic			
Data source:	Edit	. 📃 Include chara	acteristic
Save Copy	Paste View		
E dit definitions	OK	Cancel	Help

Figura 4.30: Dados de entrada da característica V-I do para-raios no ATP

Esta curva V-I presente na rotina do para-raios no ATP é evidenciada por regiões de atuação com características elétricas peculiares, como é visto na Figura 4.31. Estas regiões podem ser divididas em quatro regiões. A região "a" é uma área linear capacitiva com corrente inferior a 1 mA. Este nível de corrente não provoca nenhum dano ao equipamento; todavia, seu crescimento deve ser monitorado. A região "b" caracteriza-se pelo ponto do joelho da curva onde se tem a transição do isolamento à condição de condutor. A região "c" é uma área fortemente não linear e a região "d" tem natureza resistiva com elevada corrente.



Figura 4.31: Curva típica do para-raios (ABB)

A utilização desta rotina no ATP está relacionada principalmente ao levantamento correto da curva V-I do para-raios fornecida pelo fabricante. A título de exemplo, segue na Figura 4.32 uma curva típica de um para-raios com classe 2 (ABB). A tensão é normalizada para a tensão residual do para-raios.



Figura 4.32: Curva típica do para-raios com classe 2 (ABB)

A curva típica 8/20 μs caracterizam ondas de corrente de uma descarga atmosférica indireta. Para o entendimento da curva típica de para-raios existem três pontos importantes:

- a) U_c: É o valor de tensão RMS admissível que pode ser aplicada continuamente entre os terminais do para-raios.
- b) U_R: É o máximo valor de tensão RMS entre os terminais do para-raios para funcionar corretamente em condições de sobretensões temporárias;
- c) U_{REF} : Valor de pico da tensão de alimentação dividida por $\sqrt{2}$ onde é aplicada ao para-raios para obter a corrente de referência.

A partir destes pontos e o conhecimento das regiões fornecidas pela Figura 4.31, tem-se as informações necessárias para a correta interpretação da característica não linear do pararaios. Com a curva fornecida pelo fabricante e o valor da tensão de referência, tem-se os requisitos necessários para a modelagem do para-raios a serem utilizados durante as simulações de TRT.

4.4.6 Fontes e redes equivalentes

Em estudos transitórios a fonte e os geradores são modelados como uma onda senoidal. A rede equivalente é simplificada como uma porção resumida do sistema, conforme Figura 4.33. Para esta etapa, utiliza-se o equivalente de curto-circuito ou equivalente de Thévenin para a malha em questão.

No Sistema Integrado Nacional, têm-se os valores fornecidos de equivalentes do *software* ANAREDE, que fornece os parâmetros das linhas de transmissão, cabos, motores, transformadores, entre outros dados em regime permanente presentes no estudo de fluxo de potência. O *software* ANAFAS contempla os valores fornecidos no estudo de curto-circuito. Ambos são fornecidos pelo CEPEL e contêm todas as informações e parâmetros do sistema elétrico interligado.



Figura 4.33: Modelo equivalente de redes

4.4.7 Disjuntores

Na maioria das aplicações, o modelo do disjuntor pode ser negligenciado. No caso envolvendo fenômenos com alta frequência e estes por sua vez provocarem erros numéricos nas simulações, o modelamento de disjuntores pode ser necessário (Helmer *et al.*, 1996). A utilização deste modelo é importante também para a análise do efeito da corrente de corte.

A Figura 4.34 representa o modelamento do disjuntor. As constantes R_{sd} , L_{sd} e C_{sd} significam, respectivamente a resistência de amortecimento, a indutância e a capacitância relativa ao *gap* do disjuntor (Helmer *et al.*, 1996).



Figura 4.34: Modelo do disjuntor (Helmer et al., 1996)

A tabela 4.1 mostra os valores das constantes R_{sd} , $L_{sd} \in C_{sd}$.

Tabela 4.1: Valores das constantes Rs, Ls e Cs (Helmer et al., 1996)

Resistência (Ω)		Indutâ	incia (nH)	Capacitância (nF)		
Rsd	50	Lsd	50	Csd	0,2	

4.5 Conclusões

Neste capítulo primeiramente é apresentados os cálculos de TRT. Em seguida são vistos os tipos de interrupções e suas influências para este fenômeno. A velocidade de crescimento da TRT, ou seja, a TCTRT também é analisada e conclui que a sua manifestação pode

danificar a isolação dos componentes do sistema elétrico. Por fim, são apresentados os modelamentos dos componentes mais relevantes para a TRT.

Todas estas características estudadas são unificadas e simuladas dentro de contextos previamente escolhidos e que faz parte das simulações e resultados; tema para o próximo capítulo.

5 Simulações e Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a utilização dos métodos analisados neste trabalho. A partir de quatro simulações são abordadas algumas aplicações de TRT.

A primeira simulação trata da verificação da TRT e TCTRT em um sistema industrial típico de uma siderurgia na presença de um forno panela. Em acréscimo ao contexto industrial, na segunda simulação é verificado o comportamento da TRT em função do tipo de aterramento do sistema. Na terceira simulação tem-se a análise da TRT e TCTRT durante a abertura uma linha de transmissão, na presença de um curto-circuito, nas proximidades de uma usina de geração e a presença da corrente de corte na abertura do disjuntor. Na quarta simulação tem-se um ponto de falta inserido em regiões com linhas de transmissão, contendo elevados comprimentos em um sistema típico de transmissão de 345 kV.

Os aspectos mais relevantes durante o processo de simulação são as utilizações dos modelos e cálculos referenciados nos capítulos anteriores, assim como os tipos de interrupção, as suportabilidades dos disjuntores e o meio de mitigação para solucionar os problemas inerentes a TRT e TCTRT.

5.1 Análise do disjuntor alimentador de um forno panela em relação à TRT e a TCTRT

5.1.1 Introdução

O processo de transformar o ferro gusa em diferentes tipos de aço é realizado na indústria em uma unidade chamada Aciaria. Esta fase da produção é dividida em duas etapas: refino primário e secundário. O refino primário acontece no convertedor, onde o ferro-gusa geralmente adicionado à sucata é transformado em aço. No refino secundário são feitas as correções mais específicas e controladas, utilizando-se Forno-Panela ou *Ladle Furnace* (LF) para o acerto da composição química.

O LF é normalmente utilizado para aquecer, manter e finalizar todos os tipos de metais derretidos. O aquecimento pode ser feito por meio de eletrodos de grafite, plasma ou por bobinas de indução. Dependendo do metal, tamanho e velocidade de aquecimento, sua potência elétrica pode atingir vários megawatts (Sampaio, 2006).

Sistemas com alto-forno apresentam características indutivas e a abertura destas correntes demandam solicitações elevadas aos disjuntores. No primeiro exemplo, apresentado na simulação 1, há uma pequena aciaria. No segundo exemplo, com a simulação 2, tem-se uma aciaria grande, onde proporcionalmente, demanda solicitações mais severas aos disjuntores. A partir dos resultados máximos de TRT e TCTRT resultantes nas simulações, estes valores são verificados conforme as suportabilidades fornecidas pela norma vigente (IEC 62271-100:2008).

5.1.2 Simulação 01

Nesta simulação, tem-se um sistema elétrico visualizado na Figura 5.1 que representa uma conFiguração típica de um forno panela. Esta planta está sendo alimentada pela concessionária em 34,5 kV, com potência de curto-circuito de 400 MVA e X/R de 10. O transformador de entrada da subestação possui potência de 30 MVA e impedância de 10%.

O LF tem potência de 8 MW com FP de 0,7 e é alimentado por um transformador de 12 MVA com impedância de 3%, sendo que a tensão em seu secundário é de 400 V. O objetivo desta simulação é avaliar o disjuntor frente aos fenômenos de TRT e TCTRT.



Figura 5.1: Diagrama Unifilar da Simulação 01



Figura 5.2: Sistema no ATPDRAW

O disjuntor em análise é o 52-2 na Figura 5.2 com classe de tensão de 13,8 kV e suportabilidades em relação ao TRT e TCTRT de acordo com a norma (IEC 62271-100:2008). As características elétricas dos cabos foram extraídas do catálogo do fabricante (Prysmian, 2015) e visualizada na Figura 5.3. As dimensões dos cabos estão em conformidade com a tabela 5.1, sendo que para seu modelamento, foram utilizados parâmetros concentrados (Clarke), conforme a Figura 5.4.

seção nominal	R _{CC} máxima em CC à 20*C	Xc			• <u> </u>	s (uniş	oolar				<u>e</u>	tripo	lar
			s= R _{ca}	20 X _L	s=1 R _{ca}	3 cm XL	s= 2 R _{ca}	0 cm XL	trif R _{ca}	ólio XL	banco d R _{ca}	e dutos X _L	R _{ca}	×L
(mm²)	(Ω/km)	(Ω.km)	(Ω /km)	(Ω/km)	(Ω /km)	(Ω/km)	(Ω /km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)
EPI	ROTENAX C	OMPACT	105 - 8,	7/15 kV										
16	1,150	12.750	1,540	0,244	1,550	0,341	1,554	0,373	1,536	0,174	1,552	0,364	1,534	0,161
25	0,727	10.067	0,976	0,228	0,986	0,324	0,990	0,356	0,971	0,158	0,987	0,348	0,970	0,145
35	0,524	8.993	0,705	0,219	0,714	0,311	0,718	0,343	0,701	0,149	0,716	0,334	0,700	0,137
50	0,387	7.991	0,522	0,210	0,531	0,298	0,535	0,330	0,518	0,141	0,532	0,321	0,517	0,130
70	0,268	7.139	0,363	0,204	0,371	0,285	0,375	0,318	0,359	0,134	0,373	0,309	0,358	0,123
95	0,193	6.366	0,263	0,197	0,271	0,274	0,275	0,306	0,260	0,128	0,272	0,297	0,259	0,118
120	0,153	5.816	0,210	0,193	0,217	0,265	0,221	0,297	0,206	0,124	0,218	0,288	0,206	0,114
150	0,124	5.355	0,172	0,189	0,178	0,257	0,182	0,289	0,168	0,120	0,179	0,280	0,168	0,110
185	0,099	4.936	0,139	0,186	0,144	0,249	0,148	0,281	0,135	0,117	0,145	0,273	0,135	0,107
240	0,075	5.061	0,107	0,185	0,112	0,239	0,115	0,271	0,104	0,115	0,113	0,263	0,104	0,106
300	0,060	4.636	0,087	0,182	0,091	0,231	0,095	0,263	0,085	0,112	0,092	0,254	0,085	0,103
400	0,047	4.103	0,070	0,178	0,074	0,220	0,077	0,252	0,068	0,108	0,075	0,243	_	_
500	0,037	3.743	0,057	0,175	0,060	0,212	0,062	0,244	0,056	0,105	0,061	0,235	_	-

Figura 5.3: Dados elétricos do cabo de 240 mm²

Identificação	Seção (mm2)	Quantidade por fase	Distância (m)
CB1	240	2	40
CB2	240	1	40
CB3	240	1	10
CB4	240	5	20

Tabela 5.1: Características elétricas dos cabos

Auripules						
DATA	UNIT	VALUE		NODE	PHASE	NAME
R/I+	Ohm/m	0.000104		IN1	ABC	×0003
R/10	Ohm/m	0.000312		OUT1	ABC	×0012
L' +		0.000305				
L'0		0.000915				
C' +		0.000524				
C' 0		0.00157				
🖹 Сору	🖺 Paste 🔻 🗌	Reset	Order:	0	Label: CE	31
Copy	🖺 Paste 🔻 🗌	Reset	Order:	0	Label: CE	1
Copy Comment:	🖺 Paste 🔻 🗌	Reset	Order:	0	Label: CE	i1
Copy Comment: Lines Length	Paste 40	Reset	Order:	Conduct	Label: CE	11

Figura 5.4: Modelamento do cabo de 240 mm²

Na execução desta simulação, foram escolhidos modelos dentro dos vários oferecidos no ATPDRAW, a partir das conclusões estabelecidas no capítulo 4. Primeiramente tem-se a inserção da potência de curto-circuito de entrada. A mesma é representada como uma fonte senoidal com tensão nominal de 34,5 kV. A partir desta fonte é adicionada uma impedância, com um circuito RLC, de acordo com a Figura 5.5. Um mesmo circuito RLC foi utilizado para representar o LF e suas características conforme a Figura 5.6. Em sequência, são acrescentados os transformadores, utilizando-se do modelo BCTRAN. As perdas dos ensaios a vazio e de curto-circuito estão presentes na tabela 5.2, assim como suas representações nas Figuras 5.7 e 5.8. O banco de capacitor é modelado por uma capacitância no valor de 120 μ F e o LF em análise é representado por um circuito RLC, de acordo com os valores da Figura 5.6.

Component: RL	.C3					X	
	1	1			1		
DATA	UNIT	VALUE	<u> </u>	NODE	PHASE	NAME	
R_1	Ohms	0.296		IN1	ABC	X0022	
L_1	mH	7.85		OUT1	ABC	×0024	
C_1	μF	0					
R_2	Ohms	0.296					
L_2	mH	7.85					
C_2	μF	0					
R_3	Ohms	0.296					
L_3	mH	7.85					
~ ~	-	-	-				
🔄 Copy 🖺 Paste 🔻 📄 Reset Order: 0 Label:							
Comment							
co <u>m</u> ment.							
- Output							
output						🔲 Hide	
0 - No		•				SVintage,1	

Figura 5.5: Impedância representativa da potência de curto-circuito de entrada.

DATA UNIT VALUE NAME R_1 Ohms 0.11 INI ABC X0009 L_1 mH 0.28 INI ABC X0009 C_1 μF 0 INI ABC X009 L_2 mH 0.28 INI ABC INI INI </th
R_1 Ohms 0.11 N1 ABC ×0009 L_1 mH 0.28 0 0UT1 ABC ×0009 C_1 μF 0 0 0UT1 ABC ×0009 R_2 Ohms 0.11 0 0UT1 ABC ×0009 L_2 mH 0.28 0 0 0 0 0
L_1 mH 0.28 μF 0 C_1 μF 0 R_2 0hms 0.11 L_2 mH 0.28 C_2 μF 0 C_2 μF 0 C_2 0t μF 0.28
μF 0 R_2 0hms 0.11 L_2 mH 0.28 C_2 μF 0
R_2 Ohms 0.11 L_2 mH 0.28 C_2 μF 0
L_2 mH 0.28 C_2 μF 0
C_2 μF 0
H_3 Uhms U.11
L_3 mH 0.28

Figura 5.6: Dados elétricos do LF

Nome	Ten	são	Potência	Impedância	Corrente de	Tensão a Vazio	Perdas no	Perdas no
	Prim.	Sec.		(70)		(%)	TETTO (KW)	
TF1	34,5	13,8	30	10	0,75	100	30	180
TF2	13,8	0,4	12	3	0,75	100	12	60

5- SIMULAÇÕES E RESULTADOS

BCTRAN: TF1		BCTRAN: TF1	x
Structure Rating Number of phases 3 • Number of windings 2 • Type of core Other • Test frequency (Hz) 60 Ø AR Output Phase	ngs HV LV oktage [k/] 34.5 13.8 er [MVA] 30 30 er [MVA] 30 30 es shift [deg] 30 Ext. neutral connections	Structure Number of phases 3 ▼ Number of windings 2 ▼ Type of core Dther ▼ Test frequency [H2] 60 ♥ AR Dutput	Ratings HV LV L-L voltage [kV] 34,5 13,8 Power [MVA] 30 30 Connections D Y Phase shift [deg] 30 Connections
Factory tests Open circuit Performed at LV positive sequence Volt (%) Curr (%) Loss (kW) 100 0.75	Zero sequence data available	Factory tests Open circuit Short circuit positive sequence Imp. [2] Pow. (MVA) Loss (kW) HV-LV 10 30 180	Zero sequence data available
Positive core magnetization Control C	rnal Lm II Rm Rm ® Lm-rms © Lm-flux	Order: 0 Labet TF1	T Hide



BCTRAN: TF2		BCTRAN: TF2
Structure Number of phases Number of windings Type of core Test frequency [Hz] G AR Output	3 Netrogs HV LV 2 V 138 0.4 Power [MVA] 12 12 Connections Y Y V Phase shift [deg] 0 Ist. neutral	Structure Ratings Number of phases 3 • Number of windings 2 • Type of core Other • Test frequency [Hz] 60 AR Output Phase shit [deg]
Factory tests Open circuit Performed at LV Conr	nect at LV 🔹 🔲 Zero sequence data available	Factory tests Open circuit Short circuit Zero sequence data available
Volt (%) Curr (%) Lo 100 0.75 12	<u>SS</u> (kW) ∧ 2	Imp. (%) Pow. (MVA) Loss (kW) HV-LV 3 12 60
Positive core magnetization	alLm ⊚ External Lm ∥ Rm ◎ Rm	_mflux

Figura 5.8: Representação do transformador TF-2 no ATPDRAW

A partir dos parâmetros esboçados são verificadas as sobretensões de origem transitória e sua correspondente taxa de crescimento no disjuntor 52-2, em sua abertura com o forno em operação. Como a corrente resultante é indutiva e o sistema é solidamente aterrado, é utilizada a equação 32. Em um primeiro instante não é considerado amortecimento (D = 1) e o resultado pode ser visto na equação 36.

$$TRT_{Pico} = 2 \times [11,26 + 0,3]$$
(35)
$$TRT_{Pico} = 23,12kV$$
(36)

Na Figura 5.9, tem-se a forma de onda na abertura em 10 ciclos. O pico de tensão não ultrapassa o valor de suportabilidade do disjuntor conforme (IEC 62271-100:2008). Este pico resulta em aproximadamente 16,0 kV. Com isso observa-se que houve um amortecimento da tensão em D=0,7 em relação ao resultado calculado na equação 36. Apesar de haver este amortecimento no resultado, a equação 32 esboça a ordem de grandeza da resposta encontrada na simulação. Na tabela 5.3, estes valores são apresentados e comparados com as solicitações normalizadas do disjuntor. Na Figura 5.10, tem-se a representação gráfica com as envoltórias normalizadas (IEC 62271-100:2008). Para a análise transitória é considerado disjuntor de 13,8 kV , com capacidade nominal de 1600 A e capacidade de interrupção de 31,5 kA.



Figura 5.9: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 01



Figura 5.10: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 01 com envoltórias normalizadas

Para o TCTRT, considerando a reta B (taxa média de crescimento de zero ao primeiro pico da TRT) do item 4.3 e extraindo os valores do resultado no ATP tem-se:

$$TCTRT = \frac{TRT \ m\acute{a}xima \ (kV)}{tempo \ de \ duração \ da \ TRT \ m\acute{a}xima \ (\mu s)} = \frac{16}{340} = 0,05 \ kV/\mu s \tag{37}$$

Analisando a tabela 5.3, conclui-se que o TRT e o TCTRT simulados são inferiores aos valores máximos admissíveis no disjuntor, fazendo com que este disjuntor atenda com segurança a especificação.

Disjuntor	Resultado	s Simulados	Valores de Su em : (IEC 62271	iportabilidade 15 kV 100:2008)
Tensão Nominal (kV)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)
13,8	16,0	0,05	25,7	0,34

Tabela 5.3: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada

5.1.3 Simulação 02

Considere um sistema elétrico representado pela Figura 5.11 com configuração similar ao exposto no item 5.1.2. A simulação 2 apresenta uma aciaria de grande porte.



Figura 5.11: Diagrama Unifilar da Simulação 02

O modelamento dos componentes desta simulação seguem os mesmos parâmetros e modelos do item 5.1.2, com a adição de 4 fornos em operação e aumento da potência do transformador TF-1 para 70 MVA. Os parâmetros elétricos do transformador TF-1 estão representados na tabela 5.4.

Nome	Ten	são	Potência	Z (%)	Corrente de	Tensão a Vazio	Perdas no	Perdas no
	Prim.	Sec.		(%) excitação (%)	(%)			
TF1	34,5	13,8	70	10	0,75	100	70	350

Tabela 5.4: Características elétricas dos transformadores

São verificadas nesta simulação as sobretensões de origem transitória no disjuntor 52-2. Em acréscimo às análises da simulação 1, tem-se a verificação da TRT e TCTRT de acordo com o tipo de aterramento do sistema, sendo solidamente aterrado e não aterrado, conforme as Figuras 5.12 e 5.13, respectivamente.



5.1.3.1 Simulação com sistema não aterrado

A partir destes parâmetros esboçados são verificadas as sobretensões de origem transitória e sua correspondente taxa de crescimento no disjuntor 52-2, considerando o sistema não aterrado. Como a corrente resultante é indutiva e o sistema não é aterrado, é utilizada a equação 33. Em um primeiro instante não é considerado amortecimento (D = 1) e o resultado pode ser visto na equação 39.

$$TRT_{Pico} = 1,5 \times 2 \times [11,26 + 0,3]$$
(38)
$$TRT_{Pico} = 34,68 \ kV$$
(39)

Na Figura 5.14, mostra-se como resultado da simulação a forma de onda na abertura em 10 ciclos. O pico da tensão resulta em aproximadamente 29,4 kV. Com isso observa-se que

houve um amortecimento da tensão em D=0,85 em relação ao resultado calculado na equação 39. Apesar de haver este amortecimento no resultado, a equação 33 esboça a ordem de grandeza da resposta encontrada na simulação. Na Figura 5.15, têm-se as envoltórias normalizadas e na tabela 5.5 estes valores são apresentados e comparados com as solicitações normalizadas do disjuntor.



Figura 5.14: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C em sistema não aterrado



Figura 5.15: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com envoltórias normalizadas em um sistema não aterrado

Para o TCTRT, considerando a reta B do item 4.3 e extraindo os valores do resultado no ATP da simulação:

$$TCTRT = \frac{TRT \ maxima \ (kV)}{tempo \ de \ duração \ da \ TRT \ máxima \ (\mu s)} = \frac{29,4}{400} = 0,07 \ kV/\mu s \tag{40}$$

O valor do TCTRT é inferior ao máximo admissível no disjuntor. Com isso, em relação ao TCTRT, este disjuntor atende com segurança a especificação, mas, de acordo com os resultados apresentados pela tabela 5.5, este disjuntor não suporta o pico da TRT.

Disjuntor	Resultado	s Simulados	Valores de Su (15 kV) (I 100:	iportabilidade EC 62271- 2008)
Tensão Nominal (kV)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)
13,8	29,4	0,07	25,7	0,39

Tabela 5.5: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada

Com isso, são necessárias ações mitigadoras. Como primeira opção, recomenda-se a substituição do disjuntor em questão para a classe de 17,5 kV que apresenta suportabilidades conforme tabela 5.6.

Tabela 5.6: Recomendação Mitigatória – Disjuntor de 17,5 kV

Disjuntor	Resultado	s Simulados	Valores de Su 17, (IEC 62271	uportabilidade 5 kV 100:2008)
Tensão Nominal (kV)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)
17,5	29,4	0,07	30	0,42

Como segunda opção para efeito mitigatório tem-se a inserção de para-raios nos terminais dos disjuntores, conforme Figura 5.16. O para-raios, com características de atuação conforme Figura 5.17, ameniza o pico de tensão mantendo o TCTRT. O resultado pode ser visto na Figura 5.18 e tabela 5.6.



Figura 5.16: Sistema não aterrado no ATPDRAW com para-raios

Component: MOV_3	×
Attributes Characteristic	
Arrester Data	
1 [A]	U [V]
100	19500
700	21250 Delete
10000	37500
	Son
	
	Move
	MOVE
	•
Estemal abase to istic	
External characteristic	
Data source:	Edit Include characteristic
L	
Save Copy	Paste View
E da de Guàissa	

Figura 5.17: Curva característica do para-raios (15 kV – 10 kA)



Figura 5.18: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com sistema não aterrado na presença de pararaios nos terminais do disjuntor

Tabela 5.7: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada na presença de para-raios

Disjuntor	Resultado	s Simulados	Valores de Su 15 (IEC 62271	iportabilidade kV) 100:2008)
Tensão Nominal (kV)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)
13,8	18,4	0,07	25,7	0,39

5.1.3.2 Simulação com sistema solidamente aterrado

Nesta simulação tem-se a abertura do disjuntor 52.2, Figura 5.11, visando às solicitações de tensão impostas em seus contatos com os fornos em operação, considerando o sistema solidamente aterrado.

Como a corrente resultante é indutiva e o sistema é solidamente aterrado, é utilizada a equação 32. Em um primeiro instante não é considerado amortecimento (D = 1) e o resultado pode ser visto na equação 42.

$$TRT_{Pico} = 2 \times [11,26+0,3] \tag{41}$$

$$TRT_{Pico} = 23,12kV \tag{42}$$

Na Figura 5.19, tem-se a simulação da forma de onda do disjuntor na sua abertura em 10 ciclos. Na simulação, o valor do pico da tensão é de aproximadamente 19,5 kV. Com isso observa-se que houve um amortecimento da tensão em D=0,84 em relação ao resultado calculado na equação 42. Com isso, a equação 32 esboça a ordem de grandeza da resposta encontrada na simulação.

Na Figura 5.20, tem-se a representação gráfica com as envoltórias normalizadas (IEC 62271-100:2008). Para o valor de suportabilidade, de acordo com a tabela 5.8, tem-se que o valor de pico resultante não ultrapassa a capacidade do disjuntor de 13,8 kV.



Figura 5.19: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B em sistema aterrado



Figura 5.20: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com envoltórias normalizadas em um sistema aterrado

Para o TCTRT, considerando a reta B do item 4.3 e extraindo os valores do resultado no ATP da simulação:

$$TCTRT = \frac{TRT \ maxima \ (kV)}{tempo \ de \ duração \ da \ TRT \ máxima \ (\mu s)} = \frac{19,5}{330} = 0,06 \ kV/\mu s$$
(43)

Disjuntor	Resultado	s Simulados	Valores de Su 15 (IEC 62271	iportabilidade kV) 100:2008)
Tensão Nominal (kV)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)
13,8	19,5	0,06	25,7	0,39

Tabela 5.8: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada

Logo, a TRT e o TCTRT simulados são inferiores aos valores máximos admissíveis no disjuntor, fazendo com que este disjuntor atenda com segurança a especificação.

5.2 Análise do disjuntor de entrada de uma linha de transmissão de 138 kV

Para esta simulação tem-se um ponto de falta nas proximidades de uma fonte geradora. A geração em questão é a Usina Hidrelétrica Funil localizada entre Lavras-MG e Perdões-MG.

A UHE Funil vista pela Figura 5.21 é uma usina geradora de energia elétrica administrada pelo consórcio Vale/Cemig, que se localiza no Rio Grande, região sul do estado de Minas Gerais. Foi concluída no ano de 2002. Sua capacidade total de geração é de 180 MW com 3 unidades geradores de 60 MW cada.



Figura 5.21: UHE Funil

O sistema elétrico modelado neste item contempla a UHE Funil e as linhas de transmissão UHE Funil – Lavras e Lavras – Itutinga ambas no nível de 138 kV. As informações foram extraídas do *software* ANAFAS, conforme Figura 5.22.



Figura 5.22: Sistema Elétrico da simulação 3

O disjuntor em análise está localizado em Lavras com classe de tensão de 138 kV e suportabilidades de acordo com a norma (IEC 62271-100:2008), considerando um curtocircuito trifásico em seus terminais. São verificadas nesta simulação a suportabilidade do disjuntor em relação a TRT e TCTRT. É analisado também o comportamento da corrente de corte a partir do acréscimo do modelamento do disjuntor.

A UHE Funil é modelada como uma fonte com tensão nominal e uma impedância equivalente de acordo com as Figuras 5.23 e 5.24. O equivalente da rede, ou seja, a região de Itutinga é modelada a partir de uma fonte com tensão nominal e um equivalente mostrado na Figura 5.25. Os equivalentes desta simulação foram extraídos do *software* ANAFAS. Estes equivalentes são impedâncias de curto-circuito que caracterizam o equivalente de Thévenin do sistema.

As linhas de transmissão Lavras-Funil e Lavras-Itutinga são modeladas através do modelo Jmarti visualizadas nas Figuras 5.26 e 5.27 e com comprimentos de 44 e 38 km, respectivamente. Os resultados desta simulação são confrontados com os valores calculados pelas equações 32 e 33. Também são verificados, no anexo 1, os resultados obtidos na simulação do item 5.2.1 com os valores calculados com o método de injeção de corrente.



Figura 5.23: Representação da simulação 3 no ATP

Component:	RLC3					×
Attributes						
DATA	UNIT	VALUE	*	NODE	PHASE	NAME
R_1	Ohms	0		IN1	ABC	×0005
L_1	mH	110		OUT1	ABC	×0006
C_1	μF	0				
R_2	Ohms	0				
L_2	mH	110				
C_2	μF	0				
R_3	Ohms	0				
L_3	mH	110	-			
눸 Сору	🖺 Paste 🔻 📗	🗋 Reset	Order:	0	Label:	
Comment:						
Output						
_						Hide
1 -	Current	-				🔲 \$Vintage,1

Figura 5.24: Dados da impedância equivalente da UTE Funil

Attributes	1					
DATA	UNIT	VALUE	*	NODE	PHASE	NAME
R_1	Ohms	10.03		IN1	ABC	×0008
L_1	mH	85.41		OUT1	ABC	×0007
C_1	μF	0				
R_2	Ohms	10.03				
L_2	mH	85.41				
C_2	μF	0				
R_3	Ohms	10.03				
L_3	mH	85.41				
~ ~	-					
눱 Сору	🖺 Paste 🔻 🛛	🗋 Reset	Order:	0	Label:	
Comment:						
Output						
						📃 Hide
		_				🔲 🕅 Gertage 1

Figura 5.25: Dados da impedância equivalente de UTE Itutinga

Line/Cable Data: LINHA	Line/	/Cabl	e Data: LINI	HA					
Model Data Nodes	Ma	lodel	Data	Nodes					
System type Name: LINHA Template Standard data Rbo [ohm*m] 600 Frequencies 0.1		Ph	no. Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	
Overhead Line	- 1	1	0	0.742	0.2032	-17.5	27.9	13	
Transposed	2	2	0	0.742	0.2032	0	27.9	13	
Auto bundling	3	3	0	0.742	0.2032	17.5	27.9	13	
Segmented ground Real transf: matrix Model									
Type Data									
Bergeron Decades Points/Dec									
JMarti Freq. matrix [Hz] Freq. <u>S</u> [Hz] Semlyen 60									
○ Noda Use default fitting									

Figura 5.26: Dados elétricos da linha de transmissão Lavras-Funil

Model Data Nodes	Мо	del	Data N	odes					
Model Data System type System type Template Name: LINHZ Template Overhead Line #Ph: 3 Image: Transposed Auto bundling Image: Segmented ground Image: Set length in icon Standard data Pibe (ohnitm) Skin effect Units Image: Real transf. matrix English Model Data Image: Type Data Image: Bergeron Becades Image: Pit 3 Image: Transposed 10 Image: Type Transposed	Mo # 1 2 3	Ph.no.	Data N. Rin [cm] 0 0	Rout [cm] 0.742 0.742 0.742	Resis [ohm/km DC] 0.2032 0.2032 0.2032	Horiz [m] -17.5 0 17.5	Vtower [m] 27.9 27.9 27.9	Vmid [m] 13 13 13	

Figura 5.27: Dados elétricos da linha de transmissão Lavras-Itutinga

Considerando que o sistema está solidamente aterrado, é utilizada a equação 32 para o cálculo do valor do pico de tensão. Em um primeiro instante não é considerado amortecimento (D = 1) e o resultado pode ser visto na equação 45.

$$TRT_{Pico} = 2 \times [112,7+0,3] \tag{44}$$

$$TRT_{Pico} = 226 \, kV \tag{45}$$

Este resultado de TRT subsidiará as análises dos itens 5.2.1.

5.2.1 Simulação 3

Na Figura 5.28, tem-se a simulação da forma de onda da abertura de um disjuntor na presença de um curto-circuito trifásico de 5200 A. Observa-se que o pico da tensão resulta em 230 kV. Ao comparar com o valor resultante, de acordo com o pico resultante da simulação, observa-se que não há amortecimento em relação ao resultado calculado na equação 45. Com isso, a equação 32 esboça a ordem de grandeza da resposta encontrada na simulação.

Em comparação com o valor de suportabilidade para a classe de 145 kV tem-se que o valor de pico não ultrapassa a capacidade do disjuntor como é mostrado na Figura 5.29.



Figura 5.28: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com o modelamento do disjuntor



Figura 5.29: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C com o modelamento do disjuntor e envoltória normalizada

Para o TCTRT, considerando a reta B do item 4.3 e extraindo os valores do resultado no ATP da simulação:

$$TCTRT = \frac{TRT \ maxima \ (kV)}{tempo \ de \ duração \ da \ TRT \ maxima \ (\mu s)} = \frac{230}{710} = 0,32 \ kV/\mu s$$
(46)

Estes valores são apresentados na tabela 5.9 e comparados com as solicitações normalizadas do disjuntor. O valor do TCTRT é inferior ao máximo admissível no disjuntor. Com isso, em relação ao TCTRT, este disjuntor atende com segurança a especificação.

Disjuntor	Resultado	s Simulados	Valores de Suportabilidao 145 k V (IEC 62271-100:2008)			
Tensão Nominal (kV)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)		
145	230	0,32	237	5		

Tabela 5.9: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada

5.2.2 Linha de transmissão de 138 kV com o efeito da corrente de corte

O efeito da corrente de corte, como visto no item 4.2.4, é modelado conforme Figura 5.23 e seus resultados são apresentados na Figura 5.30. Esta corrente foi medida no ramo que contém o modelo do disjuntor.

Esta corrente tem seu valor máximo de 0,16 A e houve reignições durante a abertura do disjuntor. Devido às características dielétricas deste disjuntor, a tensão transitória de recuperação não teve sua continuidade e a corrente elétrica foi interrompida.



Figura 5.30: Resultado gráfico da corrente de corte

5.3 Análise do disjuntor de entrada de uma linha de transmissão de 345 kV

Nesta simulação tem-se um ponto de falta inserido em regiões com linhas de transmissão com elevados comprimentos. A região em questão é a de Três Marias – MG. Este sistema elétrico contempla as linhas de transmissão no nível de 345 kV e extraídas do *software* ANAFAS, mostradas nas Figuras 5.31 e 5.32.



Figura 5.31: Sistema Elétrico da simulação 4



Figura 5.32: Representação da simulação 4 no ATP

O disjuntor em análise está localizado em Três Marias (MG) com classe de tensão de 345 kV e suportabilidades de acordo com a norma (IEC 62271-100:2008), considerando um curtocircuito trifásico em seus terminais. Para a simulação da rede do sistema, são modelados os equivalentes de Pirapora, São Gotardo, Pimenta e Taquaril. Os equivalentes desta simulação foram extraídos do *software* ANAFAS e são modelados como impedâncias de curto-circuito que caracterizam o equivalente de Thévenin do sistema. As Figuras 5.33 a 5.36 apresentam as características elétricas destas impedâncias.

ASE NAME C ×0023 C ×0024							
ASE NAME C X0023 C X0024							
C ×0023 C ×0024							
C ×0024							
abel:							
Comment:							
Hide							
SVintage,1							
-							

Figura 5.33: Parâmetros elétricos do equivalente de Pirapora

Attributes						
DATA	UNIT	VALUE	*	NODE	PHASE	NAME
R_1	Ohms	10.39		IN1	ABC	×0032
L_1	mH	286.28		OUT1	ABC	×0031
C_1	μF	0				
R_2	Ohms	10.39				
L_2	mH	286.28				
C_2	μF	0				
R_3	Ohms	10.39				
L_3	mH	286.28	_			
		-				
눰 Сору	🖺 Paste 🔻 📗	🗋 Reset	Order:	0	Label:	
Comment:						
Output						
						Hide
_						

Figura 5.34: Parâmetros elétricos do equivalente de Pimenta

Component: RLC3								
Attributes								
DATA	UNIT	VALUE	*	NODE	PHASE	NAME		
R_1	Ohms	2.74		IN1	ABC	×0030		
L_1	mH	84.93		OUT1	ABC	×0033		
C_1	μF	0						
R_2	Ohms	2.74						
L_2	mH	84.93						
C_2	μF	0						
R_3	Ohms	2.74						
L_3	mH	84.93	-					
🖹 Copy 🖺 Paste 🔻 🗋 Reset Order: 0 Label:								
Comment								
- Output	Output							
0 - N								
						tin at in a de 'n		



Component: RLC3						X	
Attributes							
DATA	UNIT	VALUE	*	NODE	PHASE	NAME	
R_1	Ohms	7.3786		IN1	ABC	×0046	
L_1	mH	238.05		OUT1	ABC	×0034	
C_1	μF	0					
R_2	Ohms	7.3786					
L_2	mH	238.05					
C_2	μF	0					
R_3	Ohms	7.3786					
L_3	mH	238.05	-				
	-	-					
🖹 Copy 🖺 Paste 🔻 📄 Reset 🛛 Order: 🛛 🔹 Label:							
Comment							
Output		☐ Hide ☐ \$Vintage,1					

Figura 5.36: Parâmetros elétricos do equivalente de São Gotardo

As linhas de transmissão são modeladas, utilizando o LCC configurado no modelo de Jmarti. Os parâmetros elétricos são mostrados nas Figuras 5.37 e 5.38.



Figura 5.37: Extensões das linhas de transmissão

Line/Cable Data: linha3		Line/0	Cable D	ata: linha	3	1			/	X
Model Data Nodes		Mo	del	Data	Nodes					
System type Stand	dard data		Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	
Name: test1 Template Freque	init (Hz) 0.1	#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	
Overhead Line #Ph: 3 I engli	th [km] 151	1	1	0	0.742	0.2032	-17.5	27.9	13	
Transposed	et length in icon	2	2	0	0.742	0.2032	0	27.9	13	
Auto bundling	errengen meon	3	3	0	0.742	0.2032	17.5	27.9	13	
Skin effect Units Segmented ground Metric Real transf. matrix English Model Data Type Data Bergeron Pereq.matrix(Hz) Freq. matrix (Hz) Freq. SS [Hz] Semiyen 000000 Noda Vuse default fitting										

Figura 5.38: Parâmetros elétricos das linhas de transmissão

Considerando que o sistema está solidamente aterrado, é utilizada a equação 32 para o cálculo do valor do pico de tensão. Em um primeiro instante não é considerado amortecimento (D = 1) e o resultado pode ser visto na equação 48.

$$TRT_{Pico} = 2 \times [281,7+0,3]$$

$$TRT_{Pico} = 564 \, kV$$
(47)
(48)

Na Figura 5.39, tem-se a forma de onda da simulação do fechamento do disjuntor em 0,4s e sua abertura em 0,8s na presença de um curto-circuito trifásico de 5200A. Na simulação, o valor do pico da tensão é de aproximadamente 507 kV. Ao comparar com o valor resultante, de acordo com a equação 48, observa-se que houve um amortecimento de D=0,9. Apesar de haver este amortecimento no resultado, a equação 32 esboça a ordem de grandeza da resposta encontrada na simulação.

Na tabela 5.10 e na Figura 5.40, estes valores são apresentados e comparados com as solicitações normalizadas do disjuntor. Para o valor de suportabilidade, tem-se que o valor de pico resultante não ultrapassa a capacidade do disjuntor de 345 kV.


Figura 5.39: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 4



Figura 5.40: Resultado gráfico das tensões nas Fases A, B e C na simulação 04 com envoltórias normalizadas

Para o TCTRT, considerando a reta B do item 4.3 e extraindo os valores do resultado no ATP da simulação:

$$TCTRT = \frac{TRT \ maxima \ (kV)}{tempo \ de \ duração \ da \ TRT \ máxima \ (\mu s)} = \frac{507,8}{1410,5} = 0,36 \ kV/\mu s$$
(49)

			Valores de Suportabilidade			
Disjuntor	Resultado	s Simulados	345 kV			
			(IEC 62271-100:2008)			
Tensão Nominal (kV)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)	TRT Máxima (kV)	TCTRT (kV/μs)		
345	507,8	0,36	592	5		

Tabela 5.10: Comparação com os valores de suportabilidade normalizada

Logo, o TRT e o TCTRT simulados são inferiores aos valores máximos admissíveis no disjuntor fazendo com que este disjuntor atenda com segurança a especificação.

5.4 Conclusão

No decorrer deste capítulo fica evidente a importância das simulações no processo de entendimento dos conceitos que envolvem a TRT. Dentro deste contexto é analisado um evento com interrupção de uma corrente indutiva presente na primeira simulação. Esta simulação é relevante, pois os LF são exemplos de aplicações comuns no âmbito industrial.

Uma etapa fundamental é a abordagem do tipo de aterramento e seus efeitos nos resultados da TRT. Esta abordagem foi concretizada na segunda simulação. Na terceira simulação, é mostrado um sistema próximo a geração e a corrente de corte e suas reignições no disjuntor. Na quarta simulação, é apresentado um sistema com elevadas distâncias. No próximo capítulo, tem-se uma associação entre os temas abordados e sua relevância no processo de modelamento e simulação da TRT.

6 Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1 Conclusões

Ao longo do trabalho são apresentados os conceitos dos fenômenos envolvidos para o entendimento TRT e TCTRT, suas características peculiares e sua manifestação da comutação de um sistema elétrico. Uma primeira abordagem é em relação ao estudo de curto-circuito que é parte integrante dos estudos que compõem as características elétricas em um sistema de energia. Esta análise é importante, pois as suas informações vão identificar os casos de suportabilidade nos disjuntores e fornecer subsídios para os cálculos da TRT e TCTRT. Com os valores de curto-circuito e X/R, calculados para todas as barras do SIN, é possível o modelamento das fontes resultantes das regiões limítrofes do disjuntor a ser analisado.

Uma importante abordagem é sobre a superação de disjuntores. É visto que os mesmos devem ser especificados para operar de acordo com as solicitações transitórias, e entre estas solicitações estão inseridos os estudos de TRT. No momento da abertura, os disjuntores devem suportar os estresses na isolação ocasionados pela TRT e TCTRT. Como efeito secundário sobre a análise dos disjuntores, é abordado um entendimento sobre tipos de interrupções de corrente. É visto que a superação de disjuntores é padronizada de acordo com normas. A IEC com a norma (IEC 62271-100:2008) adota referências para os parâmetros de suportabilidade de TRT.

Em sequência são apresentados os conceitos que envolvem a TRT. É concluído que este fenômeno depende tanto da impedância vista do ponto de manobra, quanto da magnitude da corrente a ser interrompida (ONS, 2013). Dentro da abordagem da TRT, é visto que seus estudos visam uma correta especificação e dimensionamento dos disjuntores. Isso é necessário para que não haja o restabelecimento da corrente de curto-circuito após a abertura do disjuntor.

Para um melhor entendimento e tendo como base um ponto de referência para os resultados, são abordadas nesta dissertação equações básicas para o cálculo de TRT. Estes cálculos são consolidados com o modelamento do sistema a partir do *software* ATP.

A partir deste modelamento são simulados casos e as respostas mostram que as soluções teóricas e as obtidas nas simulações apresenta coerência. À medida que os modelos são aperfeiçoados, as simulações aproximam-se dos resultados reais.

A simulação 1 apresenta um disjuntor de um primário de um transformador de um forno panela. Para as tensões de restabelecimento transitórias, a componente resistiva dos eletrodos de grafite amortece a TCTRT. Por outro lado, há uma energia maior armazenada que por sua vez, acarreta em elevados picos de tensão. Nesta simulação, os valores susceptíveis, envolvendo a TRT, estão dentro da suportabilidade do disjuntor de acordo com a especificação da norma.

Durante as simulações 2, foram apresentadas diferenças entre os valores de TRT com transformador não aterrado e aterrado solidamente. Para a especificação de disjuntores é necessário uma atenção em relação ao fator de polo de acordo com as características de aterramento do sistema. Geralmente os disjuntores estão disponíveis com fatores de 1,0, 1,3 e 1,5. Valores de 1,3 são mais comuns em sistemas de distribuição e valores de 1,5 são mais característicos em sistemas de transmissão. Na simulação 2, os resultados dos picos de TRT ultrapassaram o valor suportável do disjuntor. Foram propostas medidas mitigatórias com substituição do disjuntor por outro com classe de 17,5 kV ou a inserção de para-raios nos terminais do disjuntor.

Na simulação 3, tem-se um ponto de falta nas proximidades de uma fonte geradora. Nesta simulação, o valor de pico resultante não ultrapassa a suportabilidade do disjuntor. É analisado o efeito da corrente de corte, sendo que a mesma não tem continuidade e a corrente elétrica é interrompida.

Para a simulação 4 tem-se um ponto de falta inserido em regiões com linhas de transmissão com elevados comprimentos. Nesta simulação, o valor de pico resultante não ultrapassa a suportabilidade do disjuntor. Isso é devido ao amortecimento da resposta transitória provocado pelo elevado comprimento da linha de transmissão.

Em resumo, a análise do TRT e TCTRT se torna essencial para aumentar a confiabilidade de operação das redes de transmissão e distribuição. Hoje existem inúmeros modelos eletromagnéticos que tentam representar este fenômeno. A análise destes modelos, além de possibilitar a representação mais fiel do fenômeno, promove a adoção de medidas mitigadoras para amenizar os prejuízos desencadeados pelas falhas e perdas de disjuntores devidos a este fenômeno.

Por fim, este estudo constituiu uma contribuição para o conhecimento da TRT face às suas características e seus modelamentos. Dada a importância do tema, considera-se que há ainda muito que percorrer em seu campo de investigação, sendo esta área, portanto, um campo fértil para o trabalho de futuros pesquisadores.

6.2 Propostas de continuidade

De forma a aperfeiçoar a metodologia proposta, aumentando a sua confiabilidade e abrangência de aplicação, propõe-se algumas sugestões de trabalhos a serem realizadas no futuro:

- Aperfeiçoamento dos modelos que envolvem fenômenos não lineares com base em medições de componentes de redes reais;
- Estudo de outros modelos para os componentes da rede elétrica que possibilitem a melhoria dos resultados obtidos;
- Estudo do efeito da variação dos parâmetros do modelamento de acordo com a resposta em frequência.

Anexo 1

A.1 Exemplo de cálculo de TRT

A.1.1 Método das tensões

De forma a aperfeiçoar a metodologia proposta, tem-se um exemplo de cálculo de TRT utilizando as equações desenvolvidas no item 5.2 e o caso simulado no item 5.2.1.



Figura A.1: Representação equivalente do caso 5.3.3

Os dados deste sistema estão de acordo com a tabela 0.1.

Tabela A.1: Dados do sistema da Figura 0.1

Em	122670 V				
Leq	119 mH				
Req	2,0196 Ω				
Ceq	0,002 μF				

Sendo:

Em: Tensão fase-terra de pico;

Leq: Indutância equivalente;

Req: Resistência equivalente.

Utilizando estes valores tem-se:

$$\frac{R}{2L} = \frac{2,0196}{2x0,119} = 8,48$$
(50)

$$\omega_0 \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0.119x(2x10^{-9})}} = 64820.37 \tag{51}$$

Quando $\frac{R}{2L} < \frac{1}{\sqrt{LC}}$ o circuito subamortecido e raízes complexas.

Desprezando o amortecimento, como $\omega_0 > \omega$ e utilizando a equação 18, resulta:

$$v_c = 122670[1 - \cos(64820,37t)]. \tag{52}$$

O resultado gráfico está de acordo com a Figura 0.2:



Figura A.2: Gráfico comparativo entre o resultado do ATP e o método calculado

A.1.2 Método de injeção de corrente

Considerando o sistema da Figura 0.3, o seu circuito equivalente para o método de injeção de corrente está de acordo com a Figura 0.1.



Figura A.3: Gráfico comparativo entre o resultado do ATP e o método calculado.

Onde obtém-se:

$$V_e(s) = \frac{k}{sC} \frac{1}{(s^2 + \omega_0^2)}$$
(53)

Fazendo a antitransformada no domínio do tempo, e considerando $k = \frac{E_0}{L}$:

$$v_c(t) = E_m[1 - \cos(\omega_0 t)]. \tag{54}$$

Esta equação é equivalente à equação 18 levando a mesma resposta do anexo A.1.1.

A.2 Tabelas de suportabilidade

Tensão nominal Ur kV (eficaz)	Tensão supo curta duraç inc kV	rtável nominal de ão à frequência dustrial Ud (eficaz)	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico Up kV (crista)			
	Valor Comum	Entre a distância de Seccionamento	Valor Comum	Entre a distância de Seccionamento		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		
2.6	10	10	20	23		
5,0	10	12	40	46		
7 2	20	23	40	46		
7,2	20	25	60	70		
12	28	32	60	70		
	20	52	75	85		
17 5	38	45	75	85		
	30	15	95	110		
24	50	60	95	110		
			125	145		
36	70	80	145	165		
			170	195		
52	95	110	250	290		
72,5	140	160	325	375		
100	150	175	380	440		
	185	210	450	520		
123	185	210	450	520		
	230	265	550	630		
145	230	265	550	630		
145	275	315	650	750		
170	275	315	650	750		
1.0	325	375	750	860		
	360	415	850	950		
245	395	460	950	1050		
	460 530		1050	1200		

Tabela A.2 Tensão suportável de acordo com o nível de tensão do disjuntor

Esta tabela faz referência a tensões de classe I, ou seja, para níveis de tensões até 245 kV.

Tensão nominal Ur	Tipo da	Fator de primeiro polo	Fator de amplitude	Primeira tensão de referência	Tempo	Valor de pico da TRT	Tempo	Tempo de retardo	Tensão	Tempo	TCTRT
(kV)	menapşao	kpp pu	kaf pu	U1 kV	t1 μs	Uc kV	t2 μs	to µs	u' kV	ť μs	U1/t1 kV/us
245	Falta terminal	1.3	1.4	195	98	364	392	2	98	51	2
	Falta quilométrica	1.0	1.4	150	75	280	300	2	75	40	2
	Discordância de fases	2.0	1.25	300	196	500	392-784	2-20	150	117	1.54
300	Falta terminal	1.3	1.4	239	119	446	476	2	119	62	2
	Falta quilométrica	1.0	1.4	184	92	343	368	2	92	48	2
	Discordância de fases	2.0	1.25	367	238	612	476-952	2-24	184	143	1.54
	Falta terminal	1.3	1.4	288	144	538	576	2	144	74	2
362	Falta quilométrica	1.0	1.4	222	111	414	444	2	111	57	2
	Discordância de fases	2.0	1.25	443	288	739	576-1152	2-29	222	173	1.54
	Falta terminal	1.3	1.4	334	167	624	668	2	167	86	2
420	Falta quilométrica	1.0	1.4	257	129	480	516	2	129	66	2
	Discordância de fases	2.0	1.25	514	334	857	658-1336	2-33	257	202	1.54
550	Falta terminal	1.3	1.4	438	219	817	876	2	219	111	2
	Falta quilométrica	1.0	1.4	337	168	629	672	2	168	86	2
	Discordância de fases	2.0	1.25	674	438	1123	876-1752	2-44	337	263	1.54
600	Falta terminal	1.3	1.4	637	318	1189	1272	2	318	161	2
	Falta quilométrica	1.0	1.4	490	245	914	980	2	245	124	2
	Discordância de fases	2.0	1.25	980	635	1633	1272-2544	2-64	490	382	1.54

Tabela A.3 Valores normalizados de tensão de restabelecimento transitórios

Referências Bibliográficas

- [1]. D'Ajuz, A. *et al.*, Equipamentos Elétricos especificação e aplicação em subestações de alta tensão Furnas, 1985.
- [2]. Operador Nacional do Sistema Elétrico Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão.
- [3]. Submódulo 18.2 Relação dos sistemas e modelos computacionais ONS.
- [4]. Cheng-Chien Kuo, Yu-Hung Shih, "Analysis of Transient Energy Impaction under Reactive Power Switching", Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation, July 2012, p. 226-229.
- [5]. Azevêdo, W.V.S., "Device to limit Transient Recovery Voltage", Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), IEEE/PES, 2010, p. 1-6.
- [6]. Todeschini, G., EnerNex, Knoxville, "Analysis of the effect of distance on the TRV waveform for a short-line fault", Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), IEEE PES, 2012, pp. 1-6.
- [7]. Liao Minfu, Cheng Xian, Zou Jiyan, "Dynamic dielectric recovery property for vacuum circuit-breakers with double breaks", 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), IEEE, 2010, p. 225-228.
- [8]. Koshizuka, T.; Kawano, H.; Haginomori, E, "Analytic method using laplace transform for a modified TRV of a circuit breaker", Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, 2010, pp. 1-6.
- [9]. Halim, Hana A., Noorpi, Nur Sabrina , Mukhtar Nurhakimah M.; "Simulation Study of the Transient Recovery Voltage (TRV) on Circuit Breaker", Fifth International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation, Perlis, Malaysia, 2010.
- [10]. Tasdighi, Mohammad; "Inductive FCL's Impact on Circuit Breaker's Interruption Condition During Short-Line Faults', Electrical and Computer Engineering, Texas A&M University, College Station, USA, 2013.
- [11]. He Baina, Zhao Yunwei, Simulation and Research of Transient Recovery Voltage, IEEE, 2012.
- [12]. Rifaat, Rasheek; "Circuit Breaker Transient Recovery Voltage Requirements for Medium-Voltage Systems With NRG", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 50, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 2014.
- [13]. Portela, Carlos Medeiros *et al.*, Disjuntores e Chaves Aplicação em Sistemas de Potência, 1^a ed., vol. único. Eduff, 1995.
- [14]. Operador Nacional do Sistema Elétrico Submódulo 11.3 Estudos de Curto-circuito.
- [15]. Cahier technique no. 158 Calculation of short-circuits currents Schneider Electric.
- [16]. IEC 60909-0 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems Calculation of currents;
- [17]. Stewart, S., Distribution Switchgear, Power and Energy Series 46, vol. 1, Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 1995.
- [18]. Cassie, A. M., 'A new series of rupture and circuit severity'. CIGRE 1939. Paper 102;
- [19]. de Sá, Alessandra e Benevides Câmara Modelagem de Arco Elétrico no ar. Aplicações em Sistemas de Potência – Tese de Doutorado- COPPE – UFRJ – RJ.
- [20]. Siemens. Princípio da autocompressão. Disponível em <http://www.energy.siemens.com/br/pt/transmissao-de-energia/produtos-de-altatensao/disjuntor/#content=Tecnologia>. Acesso em: 02 Out. 2015.
- [21]. IEC 62271-100:2008 High-voltage switchgear and controlgear Part 100: Alternating-current circuit-breakers.

- [22]. Dufournet, D.; Alexander, R.W., "Transient Recovery Voltage (TRT) for High Voltage Circuit Breakers", 2008.
- [23]. J. Zanetta Cera Luizl, Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, 1ª ed., vol. único. Edusp, 2003.
- [24]. Naidu M. S., High Voltage Engineering, 2ª ed., vol. único. McGraw-Hill, 1995.
- [25]. Slepian, J., 'Extinction of an AC arc', Transactions of the American IEE, 1928, 47, p. 1398;
- [26]. P60076-16. Wind Turbine Generator Transformers Working Group. Disponível em <http://grouper.ieee.org/groups/transformers/subcommittees/performance/ 16_Wind/S12-WG-Wind-SwInducedTransients.pdf> Acesso em: 02 Out. 2015.
- [27]. Meets, René; "Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems", John Wiley & Sons, Ltd, 1^a ed., 2015.
- [28]. Flurscheim, C. H; Power Circuit Breaker Theory and Design. IEE Monograph Series 17. Peter Peregrinus Ltd, England, 1975.
- [29]. Garzon, Ruben D.; High Voltage Circuit Breakers, Marcel Dekker, Inc, 2^a ed. ,New York, EUA.
- [30]. GUSTAVSEN, B.; MARTINEZ, J. A.; DURBAK, D.. "Parameter Determination for Modeling System Transients - Part II: Insulated Cables". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, July 2005.
- [31]. Oramus, Piotr; "Influence Of Various Transmission Line Models On Lightning Overvoltages In Insulation Coordination Studies", XXIV Seminarium Zastosowanie Komputerów W Nauce I Technice 2014.
- [32]. NODA, T., NAGAOKA, N., AMETANI, A. "Phase domain modeling of frequencydependent transmission lines by means of an ARMA model", Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 11, n. 1, pp. 401 - 411, 1996.
- [33]. GOMEZ, P. "Validation of ATP Transmission Line Models for a Monte Carlo Study of Switching Transients". In: Power Symposium, 2007. NAPS 184 '07. 39th North American, pp. 124 –129, 30 2007-oct. 2 2007. doi:10.1109/NAPS.2007.4402298.
- [34]. WHITAKER, J. C., AC Power Systems Handbook. 2nd Ed., Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 1999.
- [35]. Azevêdo, Wilker Victor da Silva; "Representação da Rede Elétrica para Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória e Estudos de Sensibilidade quanto à Modelagem de Cargas", Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas, Tocantins,2012.
- [36]. COSTA, E. G. Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco. Tese de Doutorado, UFPB, Campina Grande, Brasil, abril, p. 177, 1999.
- [37]. ABB Application guidelines: Overvoltage protection Metal oxide surge arrestersin medium voltage systems.
- [38]. Helmer, J., Lindmayer, M., "Mathematical Modeling of the High Frequency Behavior of Vacuum Interrupters and Comparision with Measured Transients in Power Systems", XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, 1996.
- [39]. Sampaio, P. T.; Modelagem Térmica de um Forno Panela utilizando Redes Neurais Artificiais. Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2006.
- [40]. Prysmian. Guia de dimensionamento em média tensão. Disponível em <http://br.prysmiangroup.com/br/files/dimensionamento_mt.pdf> Acesso em: 02 Out. 2015.
- [41]. Schlabbach, J.; Short-circuit Currents Power and Energy Series 5, IET, 2005.
- [42]. ABB. Application guidelines: Overvoltage protection Metal oxide surge arrestersin medium voltage systems. Disponível em https://library.e.abb.com/public/70 e9fd6933c8c644c12578d200333cb5/ 952_abb_awr_mittelspannung_E_low.pdf>. Acesso em: 02 Out. 2015.