

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA PERNAMBUCO

Campus Garanhuns

Bacharelado em Engenharia Elétrica

ANDRÉ TEIXEIRA DE OLIVEIRA

REQUISITOS DE PROTEÇÃO QUANTO À TENSÃO DE RESTABELECIMENTO
TRANSITÓRIA PARA DISJUNTORES E RELIGADORES EM UMA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Garanhuns

2022

ANDRÉ TEIXEIRA DE OLIVEIRA

REQUISITOS DE PROTEÇÃO QUANTO À TENSÃO DE RESTABELECIMENTO
TRANSITÓRIA PARA DISJUNTORES E RELIGADORES EM UMA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Bacharelado em Engenharia
Elétrica do IFPE *campus* Garanhuns como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Wilker Victor da
Silva Azevêdo

Coorientadora: Professora Me. Suelen Holder
de Moraes e Silva Rodrigues

Garanhuns

2022

O48r

Oliveira, André Teixeira de.

Requisitos de proteção quanto à tensão de restabelecimento transitória para disjuntores e religadores em uma rede de distribuição de energia / André Teixeira de Oliveira ; orientador Wilker Victor da Silva Azevêdo ; Coorientadora Suelen Holder de Moraes e Silva Rodrigues, 2022.

63 f. : il.

Orientador: Wilker Victor da Silva Azevêdo.

Coorientadora: Suelen Holder de Moraes e Silva Rodrigues.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2022.

1. Transitórios (Eletricidade) . 2. Sistemas de energia elétrica – Proteção. 3. Energia elétrica - Distribuição. I. Título.

CDD 621.3191

Riane Melo de Freitas Alves –CRB4/1897

REQUISITOS DE PROTEÇÃO QUANTO À TENSÃO DE RESTABELECIMENTO
TRANSITÓRIA PARA DISJUNTORES E RELIGADORES EM UMA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Bacharelado em Engenharia
Elétrica do IFPE *campus* Garanhuns como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Garanhuns, dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Wilker Victor da Silva Azevêdo – Doutor (IFPE)

Prof. Diego Soares Lopes – Doutor (IFPE)

Prof^a. Michelle Ferreira Leite – Mestre (IFPB)

Prof. Francisco das Chagas Souza Júnior – Doutor (IFRN)

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus queridos avós Antônio Zacarias (*in memoriam*) e Maria de Jesus, cujas presenças foram essenciais na minha vida.

Dedico também à minha mãe Maria Lucia, ao meu pai Cícero Teixeira e à minha irmã Aline. Obrigado por sempre me apoiarem.

Agradeço a todo o corpo docente do IFPE *Campus* Garanhuns, singularmente ao meu orientador, Prof. Dr. Wilker Azevêdo e à minha coorientadora Prof^a Me. Suelen Rodrigues pela oportunidade e por toda dedicação e assistência na elaboração do trabalho.

Agradeço a todos os amigos que cultivei ao longo do curso, especialmente aos camaradas Adônis França, Eduardo Magalhães, Gleydson Soares, João Henrique, Josias Junior e Pedro Elias.

“Il faut cultiver notre jardin”

(VOLTAIRE, 1759)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre requisitos de proteção quanto à Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) para disjuntores e religadores em uma rede de distribuição de energia. Tendo em vista o crescimento de mudanças no Sistema Elétrico, a demanda por novas operações e esquemas de chaveamento, além de mudanças de topologia nas redes, que impõe desafios às concessionárias, surge a necessidade de compreender o fenômeno da TRT e analisar meios para mitigação do valor de pico e da taxa de crescimento. A metodologia proposta consiste na avaliação da normatização técnica associada com equipamentos de média tensão, construção das envoltórias de norma, modelagem e simulação do fenômeno em plataforma EMTP (*Electromagnetic Transient Program*), seguida por explanação das envoltórias de suportabilidade à TRT comparando-se, em seguida, a TRT presumida com aquela especificada por norma. A modelagem de equipamentos e a simulação do evento transitório foi realizada no software *Alternative Transient Program* (ATP) considerando a aplicação de faltas monofásicas a alguns quilômetros da subestação, a qual impõe estresses térmicos aos dispositivos de chaveamento, além de falta trifásica terminal não aterrada, a qual determina as condições dielétricas mais severas ao meio na câmara de extinção do arco. Os resultados apontaram que, em cenário de falta monofásica aterrada, todos os religadores encontram-se superados por pico e, em cenário de falta trifásica terminal não aterrada, apenas um religador e o disjuntor estão em inconformidade com a normativa. Em linhas gerais, a inserção de células de surto capacitivas e troca de equipamentos por outro de classe de tensão maior mostraram-se medidas efetivas no que tange aos problemas associados à TRT.

Palavras-chave: Disjuntor, Distribuição da Energia, Transitórios Eletromagnéticos, TRT.

ABSTRACT

This work presents a study on protection requirements regarding the Transient Recovery Voltage (TRV) for circuit breakers and reclosers on a power system distribution network. In view of the growth of changes in the Electric Power System (EPS), the demand for new operations and switching schemes, in addition to change in the topology of the networks, which pose challenges to the concessionaires, the need arises to understand the phenomenon of TRV and analyze means for mitigating the value and the growth rate. The proposed methodology consists of the evaluation of the technical standardization associated with medium voltage equipment, construction of standard envelopes, modeling and simulation of the phenomenon on an Electromagnetic Transient Program (EMTP) platform, followed by an explanation of the TRV supportability envelopes, then comparing, the presumed TRV with the specified by the standard. The equipment modeling and the simulation of the transient event was carried out in the Alternative Transient Program (ATP) software, considering the application of single-phase faults a few kilometers from the substation, which imposes thermal stresses on the switching devices, in addition to the ungrounded terminal three-phase fault, which determines the most severe dielectric conditions to the medium in the arc quenching chamber. The results showed that, in a single-phase ground fault scenario, all reclosers are exceeded by peak and, in a three-phase terminal ungrounded fault scenario, only one recloser and the circuit breaker were in non-compliance with the standard requirements. Summarizing the results, the insertion of capacitive surge cells and the exchange of equipment for another with a higher voltage class proved to be effective alternatives regarding the problems associated with the TRV.

Keywords: Circuit Breaker, Power Distribution, Electromagnetic Transients, TRV.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Disjuntor GVO.....	18
Figura 2.2. Disjuntor PVO.....	18
Figura 2.3. Elementos do disjuntor a ar comprimido.	20
Figura 2.4. Molécula de SF ₆	20
Figura 2.5. Disjuntor a SF ₆ de pressão única.....	22
Figura 2.6. Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a vácuo 15 kV (ABB).	23
Figura 2.7. Esquema de funcionamento - disjuntor a sopro magnético.	24
Figura 2.8. Esquemático ilustrativo da formação da TRT.....	25
Figura 2.9. TRT em um disjuntor de classe de tensão 72.5 kV após a eliminação de falta trifásica não aterrada.....	26
Figura 2.10. Envoltória a dois parâmetros.....	27
Figura 2.11. Envoltória a quatro parâmetros.	27
Figura 2.12. Representação de um circuito trifásico com abertura do primeiro pólo.	28
Figura 2.13. Topologia comum – Falta trifásica não aterrada.....	31
Figura 2.14. Forma de onda característica.....	31
Figura 2.15. Forma de onda característica.....	32
Figura 2.16. TRT presumida para $u_x = 31,5$ kV e $t_x = 21\mu s$	33
Figura 2.17. Topologia comum – Falta monofásica quilométrica.....	33
Figura 2.18. Forma de onda característica.....	33
Figura 2.19. TRT presumida para $u_x = 18,8$ kV e $t_x = 31\mu s$	34
Figura 2.20. TRT antes e depois da instalação de capacitores.	35
Figura 3.1. Representação da rede externa, fronteira e rede interna do SEP.....	38
Figura 3.2. Delimitação de redes sugerida pelo ONS.	38
Figura 3.3. Representação para cabos curtos (< 100m).....	39
Figura 3.4. Modelo da linha no ATP	39
Figura 3.5. Modelo RL série aplicado na representação das cargas.....	40
Figura 3.6. Modelagem da carga	40
Figura 3.7. Modelo completo da representação de um capacitor.	40
Figura 3.8. Modelagem de um capacitor no ATP.	40
Figura 3.9. Modelo de representação de um transformador no estudo da TRT.	41
Figura 3.10. Modelagem das capacitâncias de um transformador no ATP.....	41
Figura 3.11. Modelagem do TAP dos transformadores no ATP.....	42

Figura 3.12. Modelagem da resistência e da indutância dos transformadores no ATP.....	42
Figura 3.13. Modelagem de um disjuntor no ATP.....	43
Figura 3.14. Instrução USE para obtenção da envoltória presumida.	44
Figura 4.1. Unifilar simplificado - Regional.	45
Figura 4.2. Unifilar da SE UBT - trecho 69kV.	46
Figura 4.3. Unifilar da SE UBT- trecho 13.8kV com equipamentos sob estudo em destaque.	47
Figura 4.4. Regional - SE UBT em destaque.	48
Figura 4.5. Sobreposição das curvas presumida e especificada - Disjuntor 11B1 em cenário de falta trifásica não aterrada.....	50
Figura 4.6. Sobreposição das curvas presumida e especificada - Religadores.....	51
Figura 4.7. Sobreposição das curvas presumida e especificada religador 21L2 superado por pico.	51
Figura 4.8. Sobreposição das curvas presumida e especificada - Religador 21L3.....	52
Figura 4.9. Envoltória não superada após troca do equipamento por outro de classe de tensão de 17,5kV (falta quilométrica).....	53
Figura 4.10. Envoltória não superada após troca do equipamento por outro de classe de tensão de 24 kV (falta quilométrica).....	53
Figura 4.11. Envoltória referente a equipamento classe 17,5 superada em cenário sem carga nos religadores 21L2, 21L3 e 21L4.....	54
Figura 4.12. Envoltória não superada após troca do religador 21L2 por outro de classe de tensão maior (falta trifásica não aterrada).	55
Figura 4.13. Envoltória não superada após troca do disjuntor 11B1 por outro de classe de tensão maior (falta trifásica não aterrada).	55
Figura 4.14. Inserção de células capacitivas à montante do religador 21L3.	56
Figura 4.15. Inserção de células capacitivas à jusante do religador 21L3.....	56

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas para equipamentos classe de 15 kV.	30
Tabela 2.2. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas para equipamentos classe de 17,5 kV.	31
Tabela 2.3. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas para equipamentos classe de 24 kV.	31
Tabela 4.1. Diagnóstico dos religadores: Falta monofásica quilométrica.	49
Tabela 4.2. Diagnóstico do disjuntor: Falta trifásica não aterrada.	50
Tabela 4.3. Diagnóstico dos religadores: Falta trifásica não aterrada.	50
Tabela 4.4. Comparação de margem de segurança para religador classe de tensão 17,5 e 24kV.	54
Tabela 4.5. Resultado da análise do posicionamento e do número de células capacitivas para redução da TCTRT no religador 21L3.	57

Lista de abreviaturas e siglas

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CNI	Capacidade Nominal de Interrupção
EMTP	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
GVO	Grande Volume
PVO	Pequeno Volume
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SE	Subestação
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
TCTRT	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1.	Motivação	14
1.2	Objetivos.....	14
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos Específicos.....	14
1.3	Estrutura do Trabalho	15
2	Fundamentação Teórica.....	16
2.1	Sobre Disjuntores e Religadores.....	16
2.1.1	Características Gerais.....	16
2.1.2	Dielétricos e Tecnologias para Supressão de Curto-Circuitos.....	17
2.1.2.1	Disjuntores a Óleo	17
2.1.2.2	Disjuntores a Ar Comprimido	19
2.1.2.3	Disjuntores a SF ₆	20
2.1.2.4	Disjuntores a Vácuo	22
2.1.2.5	Disjuntores a Sopro Magnético	24
2.2	Tensão de Restabelecimento Transitória	25
2.2.1	Explicando o Fenômeno	25
2.2.2	Normatização técnica	27
2.2.3	Medidas Típicas de Mitigação.....	34
2.3	Subestações e Equipamentos	35
3	Metodologia de Estudo e Simulação da TRT.....	37
3.1	Alternative Transient Program (ATP)	37
3.2	Modelagem dos Ativos do Sistema	37
3.3	Rotina Complementar	43
4	Estudo de Caso e Resultados	45
4.1	Descrição do Sistema Elétrico	45

4.2	Requisitos Normativos aos Equipamentos Avaliados	49
4.3	Comparação entre TRT Simulada e TRT Presumida	49
4.4	Soluções aos Equipamentos Superados	52
4.4.1	Mitigação ao Pico da TRT.....	53
4.4.2	Mitigação da TCTRT	56
5	Considerações Finais	58
6	Trabalhos Futuros	59
7	Referências	60

1 INTRODUÇÃO

1.1. *Motivação*

Observa-se uma maior celeridade, nos últimos anos, da implementação de mudanças no Sistema Elétrico de Potência (SEP) como, por exemplo, a inserção da geração distribuída, a expansão das redes de distribuição, reestruturação da operação, novos esquemas de chaveamento, havendo mudanças de topologia nas redes, impondo desafios às concessionárias. Com isso, disjuntores devem ser reavaliados ciclicamente quanto aos requisitos de proteção.

Uma preocupação no planejamento e operação é que os equipamentos responsáveis pelo chaveamento possam atuar com segurança durante eventos críticos como curto-circuitos. Isto, a fim de efetivar correto dimensionamento com foco na prevenção de acidentes em subestações e nas redes de distribuição, danos aos ativos (transformadores de força, transformadores para instrumentos, linhas de transmissão, sistemas de medição, dentre outros), evitando-se, assim, prejuízos financeiros. Como, geralmente, esses equipamentos possuem elevado custo quando há necessidade de substituição, tendo em vista importância de apreciar o funcionamento dos equipamentos seccionadores diante condições de regime transitório, faz-se necessário um aprofundamento na análise das formas de adequabilidade quanto aos efeitos da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) nos terminais destes equipamentos.

1.2 *Objetivos*

O trabalho apresenta o desenvolvimento de estudos associados com o planejamento e a operação de equipamentos responsáveis pelo chaveamento e sua atuação segura em resposta a eventos críticos. Neste contexto, são estabelecidos como objetivos geral e específicos.

1.2.1 *Objetivo Geral*

- Compreender os requisitos de proteção de disjuntores e religadores quanto à TRT e analisar meios para mitigação do valor de pico e da taxa de crescimento.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Especificar principais tipos e características de disjuntores e religadores;
- Explicar o fenômeno da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT);
- Compreender normatização técnica relacionada a envoltórias de suportabilidade à TRT;

- Realizar a modelagem de equipamentos e a simulação do evento transitório em programa dedicado (EMTP - *Electromagnetic Transient Program*);
- Analisar medidas de mitigação do fenômeno.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho é subdividido em 5 seções. Na primeira, é feita uma introdução ao texto e as quatro últimas são organizadas de acordo com a seguinte ordem:

- A análise de equipamentos que atuam diretamente na eliminação de faltas, tais como disjuntores e religadores, e apreciação teórica sobre o fenômeno de TRT estão presentes no Capítulo 2;
- O estudo de norma que rege a aplicação de técnicas para dimensionar os equipamentos quanto à TRT, a análise bibliográfica quanto a medidas de mitigação e os procedimentos para simulação através do software *Alternative Transient Program* (ATP), incluindo a comparação entre as formas de onda presumida e simulada, estão no Capítulo 3.
- A descrição do Sistema Elétrico sob estudo, critérios de avaliação e análise da TRT em cenário de falta trifásica não aterrada e falta monofásica quilométrica serão abordados no Capítulo 4. Ainda neste capítulo serão avaliadas alternativas de mitigação da TRT.
- As considerações finais são apresentadas no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Sobre Disjuntores e Religadores*

As perturbações no SEP, as quais ocorrem em decorrência da ruptura da isolação entre as fases ou entre a fase e terra, como os curtos-circuitos, trazem situações de sobrecarga em equipamentos, que são causadas pela passagem de uma corrente acima do valor nominal. A proteção de qualquer sistema é feita com o objetivo de diminuir ou evitar risco de vida e danos materiais quando ocorrem situações anormais durante a operação do mesmo. Outra preocupação surge quando o isolamento do equipamento de proteção falha devido a sobretensões, contaminação do isolamento ou outras causas mecânicas (GLOVER, OVERBYE, SARMA, 2017).

A proteção deve atuar para eliminar faltas o mais rápido possível e de modo a deixar o menor número de consumidores sem energia elétrica. Sob estas condições, dentre os equipamentos que compõem o sistema de proteção em redes de distribuição de energia, vale destacar os religadores e disjuntores, os quais devem ser capazes de abrir por instruções de dispositivos de monitoramento como relés, usados nos circuitos de controle de abertura e interrupção, para evitar o fechamento ou para desarmar o equipamento em condições de curto-circuito, bem como para alguns outros intertravamentos (HEWITSON, BROWN, BALAKRISHNAN, 2004).

2.1.1 *Características Gerais*

Os religadores são equipamentos responsáveis por detectar e interromper as correntes de fuga e restaurar automaticamente o serviço após uma interrupção momentânea. O religador de circuito automático é essencialmente um dispositivo autônomo com a inteligência necessária para detectar sobrecorrentes em tempo e interromper correntes de fuga, além de reenergizar a linha ao ser religado automaticamente. De acordo com a sua configuração de operação, se uma falha for permanente, o religador trava aberto após um número predefinido de operações que, geralmente, oscila entre três e quatro, isolando a seção com falha da parte principal do sistema. (ROMAGNOLE, 2022).

Os religadores economizam tempo e despesas consideráveis às empresas de distribuição da energia elétrica por meio dessa automação de restauração de energia em

cenário de faltas temporárias como: condutores deslocados pelo vento tocando uns aos outros, raios caindo sobre um isolador, aves, répteis ou pequenos animais transitando entre uma linha energizada e superfície aterrada ou em ramificações de árvores tocando linhas energizadas. Para interrupções que exigem uma equipe de reparo, os religadores minimizam a área de interrupção e ajudam as equipes a localizar rapidamente o problema para restaurar a energia (EATON, 2022).

Disjuntores são equipamentos essenciais para proteção e isolamento de sistemas elétricos. Segundo a NBR IEC 60947(1998, p.4), o disjuntor pode ser visto como “dispositivo de manobra e proteção capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições anormais específicas do circuito, tais como as de curto-circuito”. Dessa forma, percebemos que são equipamentos que estão frequentemente sujeitos a condições extremas de funcionamento, as quais podem se acentuar devido a ampliações no sistema.

Apesar do amortecimento das ondas refletidas nas solicitações transitórias provocadas por manobras devido a expansão do sistema elétrico, há elevação nos níveis da corrente de surto e conseqüente intensificação da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) nos disjuntores (SINDER, 2007).

Esta tensão expõe certo caráter destrutivo após a passagem da corrente por zero (momento de separação dos contatos), aparece nos equipamentos quando da tentativa de abertura de seus terminais na câmara de extinção do arco elétrico, sendo preocupação dos setores de planejamento de distribuidoras, transmissoras e empresas de consultoria que atuam com Transitórios Eletromagnéticos. A análise deste fenômeno se caracteriza como um dos principais problemas avaliados ciclicamente pelas equipes de engenharia de proteção (CAVALCANTI; MOURA, 2009; SALGE *et al.*, 2019).

2.1.2 *Dielétricos e Tecnologias para Supressão de Curto-Circuitos*

Há diversas tecnologias e formas de supressão de faltas em sistemas elétricos. Desse ponto de vista, será abordado nas próximas sessões cinco tipos de equipamento distintos, descrevendo como estes atuam e, fazendo um breve resumo de como as inovações foram se dando na área de isolamento.

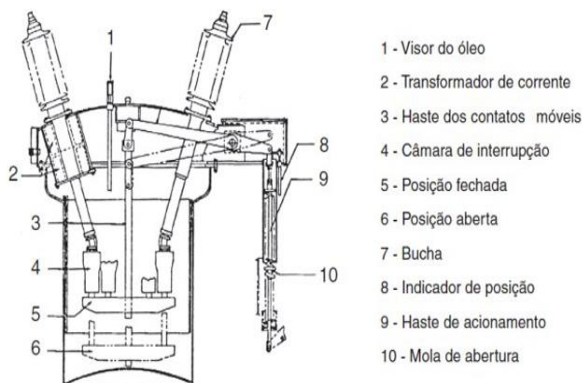
2.1.2.1 *Disjuntores a Óleo*

Inicialmente, para executar a extinção de arcos elétricos eram utilizados disjuntores a óleo. Neste equipamento, durante a interrupção de corrente, o arco elétrico é extinto por meio

da geração de gases, principalmente hidrogênio, que surge exatamente da decomposição das moléculas de óleo. A produção de gases na câmara de extinção contribui positivamente para extinção do arco uma vez que esta ajuda no resfriamento do sistema.

Ainda para este tipo de disjuntor, temos os disjuntores a óleo de Grande Volume (GVO), que tinha como principal característica o uso do óleo tanto para isolar os contatos internos como também o isolava da terra. Uma representação do disjuntor GVO está disposta na Figura 2.1. Já nos disjuntores a óleo de Pequeno Volume (PVO), indicado na Figura 2.2, o óleo não tinha necessariamente esta segunda funcionalidade.

Figura 2.1. Disjuntor GVO



Fonte: Colombo (1988).

Figura 2.2. Disjuntor PVO



Fonte: Mamede (2005).

Como os disjuntores PVO eram, no início, quase que insensíveis à TRT, estes foram largamente utilizados. No entanto, a capacidade de extinção desse equipamento passou a não ser suficiente de modo que alguns equipamentos apresentavam defeitos ou, até mesmo, explodiam durante sua atuação em situações críticas. Para contornar esse problema, de que quando a corrente de interrupção era pequena, não se gerava H_2 suficiente para a refrigeração e extinção do arco, fez-se necessário o uso de câmaras pressurizadas no disjuntor a partir da injeção de nitrogênio ou ar nas cabeças das unidades (CARVALHO, *et al*, 1995). O fluxo de óleo reduz a ionização do dielétrico, além de permitir estender o arco elétrico, refrigerando-o.

De acordo com a quantidade de operações, restos de materiais carbonizados pela elevada temperatura do arco começavam a se depositar no fundo do compartimento do óleo. Essas impurezas causavam considerável redução na rigidez dielétrica do óleo e tornava necessária a utilização de filtros para remoção desses depósitos. Esses filtros influenciaram negativamente no preço deste equipamento (CARVALHO *et al.*, 1995). Já foram realizados

estudos que indicam falhas graves quando mal dimensionados em redes de distribuição (15 kV), devido ao restabelecimento térmico e dielétrico na eliminação de curtos (HEINMILLER *et al.*, 1983).

Durante a atuação na interrupção de faltas, altos valores de corrente e frequência do evento transitório criam uma onda de choque hidrodinâmica, que representa uma restrição mecânica especialmente para os disjuntores a óleo. Ainda, o alto valor de correntes em alguns cenários é resultante da combinação da fonte que alimenta a falta e da frequência de descarregamento das fases devido a bancos de capacitores (ALAWIE, FILION, COUTU, 2011).

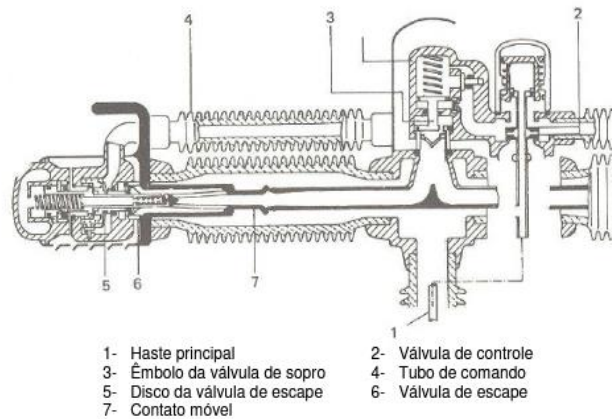
Já no que concerne à alta frequência, é explicada pela frequência de ressonância entre bancos de capacitores *shunt* e reatores, sobretudo em configurações de alta tensão, além das reflexões nas linhas de transmissão. Sua estrutura, assim, requer um olhar dedicado do engenheiro quanto à manutenção e aos requisitos de proteção.

2.1.2.2 Disjuntores a Ar Comprimido

Neste equipamento, o ar comprimido entra nas câmaras de interrupção e, ao ser soprado sobre a região entre os contatos, resfria o arco e o comprime. Ele pode ser encontrado em uma faixa ampla de classes de tensão (15 kV, 72,5 kV, 245 kV). Para ele, características como intensidade e rapidez no sopro são indispensáveis para garantir a extinção do arco. Um grande problema associado à utilização desse equipamento é o elevado nível de ruído que este produz.

Esse tipo de disjuntor também possui subcategorias distintas. Disjuntores a ar comprimido podem ser dos tipos *Monoblast* ou *Duoblast*. A principal característica do primeiro, é que o ar é soprado em uma única direção, fator que dificultava o dimensionamento do *gap* por onde o ar passava para extinguir o arco e o tornava mais suscetível a ser superado pela tensão dos contatos após a tentativa de eliminar uma corrente de curto (LIMA, 2010), sobretudo uma superação de caráter térmico. Isto implica a necessidade, muitas vezes, da utilização de resistores de abertura (solução comum para disjuntores de alta e extra alta tensão). Já no que se refere ao segundo, com sopro duplo, foi possível melhor dimensionamento e maior intensidade do sopro. Na Figura 2.3 é exposta a representação de disjuntores a ar comprimido.

Figura 2.3. Elementos do disjuntor a ar comprimido.



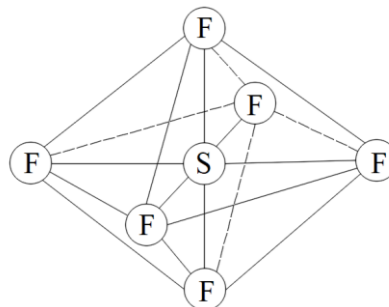
Fonte: Sampaio (2012).

Em muitos casos, o disjuntor *Duoblast* dispensa o uso de resistores de abertura e opera com mais segurança na eliminação de faltas a alguns quilômetros de distância do equipamento de manobra (FRONTIN, *et al.*, 2013).

2.1.2.3 Disjuntores a SF_6

No que se refere aos disjuntores a SF_6 , vale destacar algumas características da molécula de hexafluoreto de enxofre, mostrada na Figura 2.4. A molécula é cerca de cinco vezes mais pesada que o ar e possui elevada rigidez dielétrica que aumenta com a pressão. Estes são alguns dos motivos pelos quais esse tipo de disjuntor monopolizou o mercado dos disjuntores de alta tensão uma vez que este tornou as opções supracitadas quase que obsoletas.

Figura 2.4. Molécula de SF_6 .



Fonte: Autoria própria.

A molécula SF_6 apresenta capacidade dielétrica 2,5 vezes superior que a do ar. Outra característica fundamental para aplicação como meio isolante, é a sua rigidez dielétrica que

aumenta com o incremento da pressão, podendo até ser comparada a rigidez dielétrica de um óleo de qualidade quando sob pressão equivalente a dois bars (FRONTIN *et al.*, 2013).

Outrossim, para instauração deste componente no mercado, é o fato de que o gás SF₆ possui uma elevada capacidade de refrigeração e uma baixa temperatura de ionização, ou seja, o componente dispõe de um sistema de resfriamento ainda mais satisfatório, além de se tratar de uma molécula auto regenerável.

Ele tem sido aplicado com frequência a cenários em alta tensão (> 138 kV) e a representação do arco elétrico em estudos de simulação computacional, neste tipo de equipamento, indica que pode afetar a tensão nos contatos do equipamento nos primeiros instantes que sucedem a abertura durante a eliminação de faltas monofásicas a alguns quilômetros de onde está instalado (FILIPOVIÜ-GRPIÜ. UGLEŠIÜ; FILIPOVIÜ-GRPIÜ, 2011).

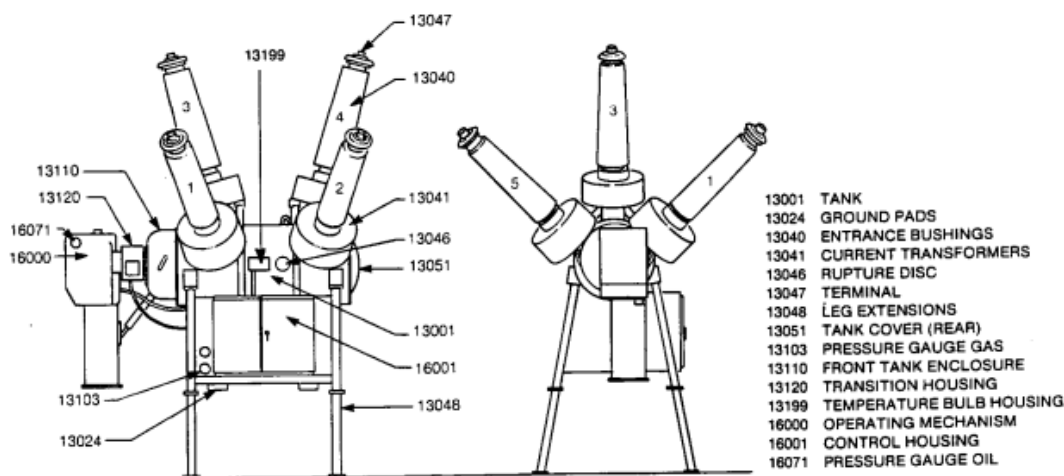
Apesar das preocupações ambientais relacionadas à exposição deste tipo de molécula na atmosfera, vale ressaltar que a molécula não possui o Cloro (Cl) em sua composição, que é um dos principais causadores da decomposição da camada de ozônio. Apesar de a molécula de SF₆ ser considerada um gás de efeito estufa, possui baixíssimos níveis de liberação para a atmosfera uma vez que nos dois tipos de disjuntores a SF₆: disjuntores de dupla pressão e disjuntores de única pressão (ou *puffer type*) há um selo que os isola da atmosfera.

Nos disjuntores de dupla pressão, a principal característica é a atuação em sistemas de alta potência em intervalos de tempo muito pequenos. A composição desse tipo de disjuntor é complexa por este possuir mais partes móveis em seu interior que um disjuntor de simples pressão.

Um compressor de gás, interno ao equipamento, é responsável pela manutenção do volume de SF₆ a alta pressão em um reservatório. Em um cenário de atuação do disjuntor, enquanto os contatos se separam, e o arco elétrico é formado, o gás a alta pressão que estava armazenado é soprado diretamente entre os contatos. Em seguida, o gás agora armazenado no sistema de baixa pressão, tem sua pressão restabelecida através de um compressor de gás.

Já nos disjuntores tipo *puffer* (Figura 2.5), reporta-se que surgiram como simplificadores dos disjuntores a SF₆ de dupla pressão, principalmente pelo fato de que um pistão ligado à haste do contato móvel proporciona a compressão do gás na câmara de extinção a partir do movimento dos contatos e, portanto, dispensam a necessidade de um compressor de gás.

Figura 2.5. Disjuntor a SF₆ de pressão única.



Fonte: ABB (<https://www.manualslib.com/manual/1323664/Abb-Sf6.html>)

Por fim, na análise de transitório de abertura para um disjuntor a SF₆ de classe 110 kV, Rahimov *et al.* (2019) apontaram para a observância da representação da capacitância dos equipamentos da subestação quando da seleção de células de surto, sobretudo quando partes da subestação são desconectadas, afetando soluções para adequabilidade.

2.1.2.4 Disjuntores a Vácuo

A técnica da interrupção da corrente no vácuo consiste na separação de um contato móvel de um contato fixo, dentro de um recipiente com vácuo. Apesar de os contatos que serão separados estarem dispostos no vácuo, há a formação de arco elétrico. Este provém da formação de íons do material metálico que é vaporizado durante a separação dos contatos, ou seja, a eficiência desse equipamento na extinção do arco elétrico pode ser determinada pela agilidade em condensar o vapor metálico presente nas superfícies dos contatos e nas barreiras de proteção. Estudos da *Westinghouse Science & Technology Center* mostraram que estes disjuntores expõem excelente desempenho em condições de transitórios rápidos quando da eliminação de curto-circuitos cuja falta é alimentada por transformador, podendo ser aplicados tanto em novas instalações como em outras já existentes (SMITH, 1995). Mais recentemente, testes conduzidos no laboratório *KEMA High-Power* (Holanda) indicaram que o processo de interrupção para disjuntores a vácuo pode ser caracterizado por uma continuação suave da corrente após a primeira passagem por zero, com um novo modo com corrente da ordem de dezenas de ampères, sendo interrompida apenas após o *gap* entre os eletrodos estar livre de elétrons (SMEETS; VAN DER LINDEN, 2003). Na Figura 2.6 temos

a representação do esquema interno de um disjuntor a vácuo com as seguintes partes indicadas: Em 1, o mecanismo de operação manual tipo EL; em 2, o sinalizador mecânico de molas de fechamento; em 3, o sinalizador mecânico de disjuntor aberto/fechado; em 4, o botão de fechamento; em 5, o botão de abertura; em 6 o contador de manobras; em 7, o conjunto de dez contatos auxiliares de disjuntor aberto/fechado e, finalmente, em 8 tem-se indicado a alavanca para carregamento manual das molas de fechamento.

Figura 2.6. Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a vácuo 15 kV (ABB).



Fonte: ABB ([https://library.e.abb.com/public/64a3b59e00d9de5cc1257c98005546ff/MA_VMAX-ANSI\(EN-Hres%20A4\)B_1VCD600929-1101B.pdf](https://library.e.abb.com/public/64a3b59e00d9de5cc1257c98005546ff/MA_VMAX-ANSI(EN-Hres%20A4)B_1VCD600929-1101B.pdf))

Este é um equipamento que vem sendo muito utilizado pelas distribuidoras de energia, aplicados em média tensão, sendo encontrados com certa facilidade na faixa de 12 a 24 kV (classe de tensão), no entanto, como valores mais baixos tendem a aumentar custos e complexidade das estruturas, disjuntores a vácuo da classe de 40,5 kV são amplamente mais aplicados em alguns sistemas (YU *et al.*, 2019).

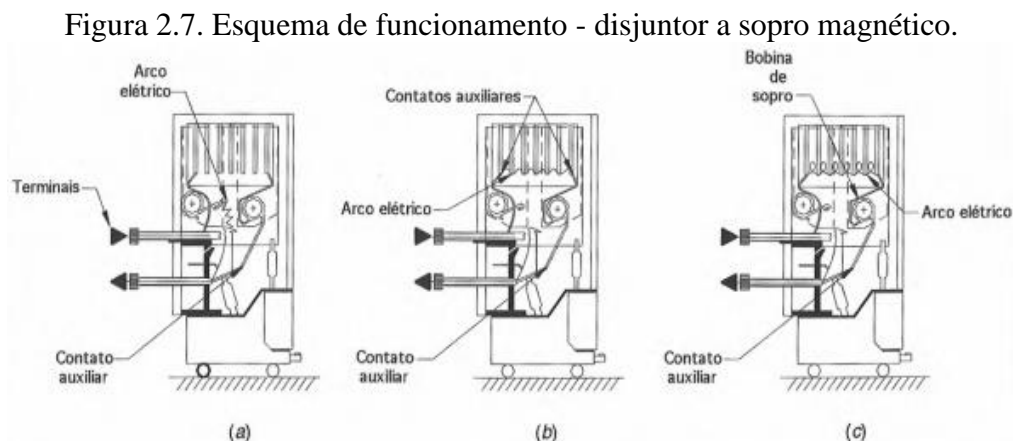
2.1.2.5 Disjuntores a Sopro Magnético

Mamede (2005) aborda sobre disjuntores a sopro magnético, os quais são um tipo de disjuntor muito utilizado em indústrias. Este equipamento opera em média tensão e em níveis de tensão de até 24 kV. Trata-se de um tipo de disjuntor de baixa manutenção. Seu funcionamento consiste na extinção do arco elétrico, que é feita no ar e transferido para a câmara de extinção, que é composta por fendas que têm a função de eliminar o arco.

No processo de extinção do arco elétrico por sopro magnético, são utilizadas duas bobinas, que são excitadas pela corrente do circuito a ser interrompido. O campo magnético, gerado por essas correntes induz o deslocamento do arco para o interior da câmara deionizante, dessa forma, o arco é fracionado, resfriado e, finalmente, extinto na primeira passagem da corrente pelo zero natural (MAMEDE, 2005).

A interrupção é obtida devido ao aumento da resistência do arco no alongamento, de acordo com a Lei de Ohm. Dessa forma, se a resistência aumenta com uma corrente constante, conseqüentemente ocorrerá o aumento da tensão. Esse aumento da resistência é obtido através do seguinte processo: primeiramente ocorre o alongamento do arco, em seguida o arco é fragmentado em menores arcos nas fendas da câmara, e logo após é resfriado nas paredes da mesma que são construídas de material isolante, aço, ou uma combinação de ambos (PORTO, 2009).

Na Figura 2.7 está diposto um exemplo de disjuntor a sopro magnético. Quando os terminais do disjuntor se separam, surge um arco entre o contato fixo e o móvel, que se afasta numa velocidade extremamente elevada, conforme posição em 2.7(a). Daí o arco, por efeito pneumático, é conduzido dos contatos principais para os contatos auxiliares, atingindo a entrada da câmara de extinção como em 2.7(b). Então, movido pelo efeito magnético e térmico, o arco penetra no interior da câmara onde é fracionado, alongado e finalmente extinto como em 2.7(c) (MAMEDE, 2005).



Fonte: Mamede (2005).

Uma vez apresentadas as tecnologias de dispositivos para supressão de faltas em sistemas elétricos, os quais permitem interrupção de faltas, isolamento e proteção a partir da sua operação quando corretamente dimensionados, será abordado na próxima sessão um aprofundamento sobre uma forma específica de transitório: Tensão de Restabelecimento Transitória.

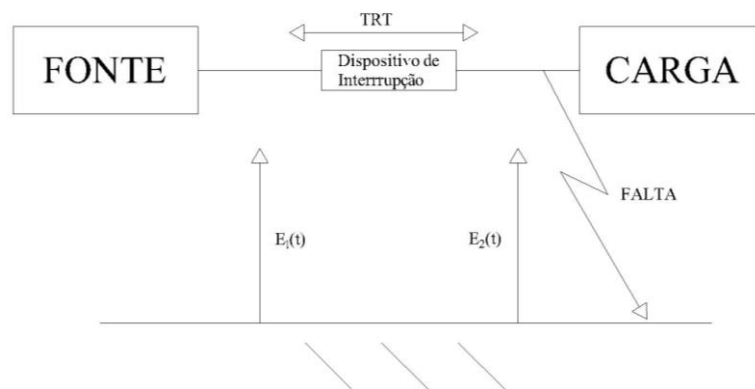
2.2 Tensão de Restabelecimento Transitória

Sobretensões no SEP podem ocorrer de diversas formas e com distintos intervalos de duração: Atmosféricas, que como o nome sugere, ocorrem por descargas atmosféricas e duram, em média, da ordem de microssegundos e, manobras que, por sua vez, ocorrem devido a chaveamentos no sistema e duram em média dezenas de microssegundos até alguns milissegundos. Um relevante problema para o dimensionamento da proteção do sistema é a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

2.2.1 Explicando o Fenômeno

A TRT é a diferença de potencial que surge entre os terminais dos disjuntores e também em religadores quando estes estão em atuação durante condições críticas de funcionamento como, por exemplo, em casos de isolamento de equipamentos em cenários imediatamente após curtos-circuitos (Figura 2.8). A TRT resulta da diferença entre os sinais $E_1(t)$ e $E_2(t)$.

Figura 2.8. Esquemático ilustrativo da formação da TRT.



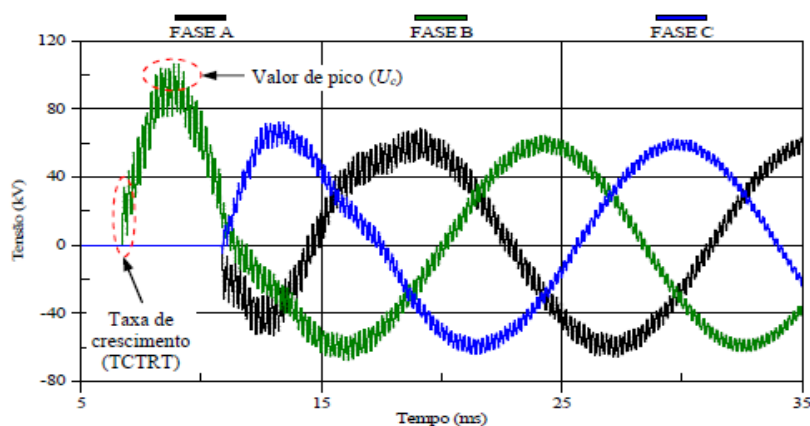
Fonte: Autoria própria.

Logo após a separação mecânica dos contatos, um caminho ionizado surge no instante em que a corrente passa por zero. Com isso, é requisitado do equipamento que suporte a energia térmica liberada pelo arco elétrico que flui pela câmara de extinção. A taxa de crescimento da TRT (TCTRT), em $\text{kV}/\mu\text{s}$, logo após o zero da corrente, eleva a temperatura e a pressão do meio, o qual tem potencial de superação térmica do dispositivo seccionador ainda durante a fase de resfriamento do arco (AZEVEDO *et al.*, 2010).

Uma implicação direta da TRT no sistema é a problemática de que, se a capacidade de retenção do arco elétrico dos equipamentos de proteção não superar a TRT, a corrente de falta continuará estabelecida pelo circuito, podendo não apenas comprometer os equipamentos, como também causar elevados riscos na manutenção destes. Isto porque, se a corrente de falta não for devidamente cessada, o sistema continua energizado.

Para determinar o sucesso ou fracasso desse processo, é necessária uma análise da TCTRT (Figura 2.9), ou seja, se a variação de TRT no tempo, $\frac{dv}{dt}$, sobrepõe os contornos da curva envoltória presente na norma que rege o equipamento (IEC 62271-100 ou outra norma ANSI/IEEE ou IEC especificada pelo fabricante), se faz necessária a otimização do funcionamento do SEP através de medidas como métodos para atenuar a TCTRT ou reduzir o pico da sobretensão, ou mesmo substituir o equipamento.

Figura 2.9. TRT em um disjuntor de classe de tensão 72.5 kV após a eliminação de falta trifásica não aterrada.



Fonte: AZEVEDO *et al.* (2010).

A condutância residual tende a zero logo após a extinção do arco. Enquanto isso, os mecanismos internos do equipamento de seccionamento tentam recuperar suas características dielétricas ao mesmo tempo em que a tensão entre os contatos atua no sentido contrário,

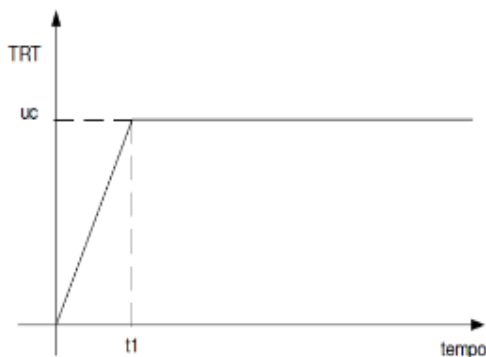
podendo acarretar na reignição da TRT caso o valor de pico (U_c) supere a tensão disruptiva do meio isolante. A disrupção ocorre pela superação dielétrica do meio e pode acontecer a qualquer momento no ciclo de TRT, embora seja usualmente mais frequente nas dezenas a centenas de microssegundos do ciclo, quando a TRT apresenta uma amplitude suficientemente alta (SWINDLER *et al.*, 1997). No cenário em que os equipamentos de proteção são superados, os danos a este podem ser irreversíveis (AZEVEDO *et al.*, 2010).

2.2.2 Normatização técnica

Nas análises de parâmetros da TRT, tanto os valores de classe de tensão de disjuntores, quanto parâmetros de circuitos para ensaio de faltas são especificados por normas técnicas. Neste trabalho serão analisados dois cenários específicos previstos por norma: falta trifásica não aterrada e falta quilométrica.

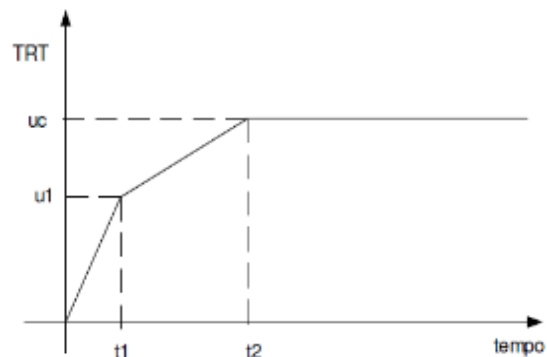
A superação por TRT é caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade dielétrica e térmica do meio de extinção do arco elétrico. O disjuntor pode ser considerado superado por amplitude ou por taxa de crescimento da TRT, ou seja, para que a corrente estabelecida no sistema seja definitivamente interrompida, a recomposição dielétrica entre os contatos do disjuntor deve superar $\frac{du}{dt}$. Nas Figuras 2.10 e 2.11, temos o exemplo de envoltórias a dois e quatro parâmetros respectivamente, especificados de acordo com a classe de tensão e corrente nominal de interrupção do equipamento.

Figura 2.10. Envoltória a dois parâmetros.
($V \leq 100$ kV).



Fonte: IEC 62271-100.

Figura 2.11. Envoltória a quatro parâmetros.
($V > 100$ kV).



Fonte: IEC 62271-100.

Vale ressaltar que a envoltória a dois parâmetros, segundo a norma NBR IEC 62271-100, é aplicável a disjuntores com tensão nominal de classe de tensão até 100kV, enquanto para disjuntores com tensões acima deste patamar deve ser considerada a envoltória a quatro

parâmetros (a depender da intensidade da corrente de falta em relação à capacidade do disjuntor). Ainda em consonância com a norma, os contornos da envoltória a dois parâmetros são dados por:

$$u_1 = 0.75 * K_{pp} * U_r * \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.1)$$

$$u_c = K_{af} * K_{pp} * U_r * \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.2)$$

Sendo:

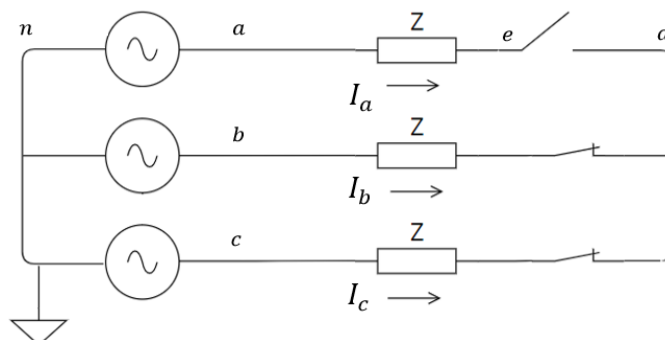
- u_c o valor de pico de tensão a ser estimado para envoltória a dois parâmetros;
- u_1 o valor de tensão anterior ao valor pico a ser estimado para envoltória a quatro parâmetros;
- U_r a classe de tensão do disjuntor;
- K_{af} o fator de amplitude, que é a relação entre o valor máximo fase-terra da TRT e da sua componente na frequência industrial;
- K_{pp} o fator de primeiro pólo, que é o que expressa a elevação da componente de frequência industrial (60 Hz) da tensão de restabelecimento do primeiro pólo a interromper.

Considerando, por exemplo, um circuito trifásico equilibrado como o mostrado na Figura 2.11, para a determinação da tensão sobre o primeiro pólo a eliminar a corrente de uma falta trifásica não aterrada, temos que a equação 2.3 é válida:

$$V_{TRT} = V_a - V_d = V_{ad} \quad (2.3)$$

sendo: I_a , I_b e I_c as correntes respectivas das fases a, b e c. Z é admitida como sendo a impedância total equivalente vista do terminal do disjuntor.

Figura 2.12. Representação de um circuito trifásico com abertura do primeiro pólo.



Fonte: Autoria própria.

Com base no circuito da Figura 2.12, aplicando a Lei de Kirchhoff para tensões, temos:

$$V_{ed} = V_{bd} + V_{nb} + V_{an} + V_{ea} \quad (2.4)$$

Já no que se refere às correntes, nota-se para esta situação que:

$$I_b = -I_c \quad (2.5)$$

mas,

$$V_{bd} = I_b * Z \quad (2.6)$$

sendo

$$I_b = \frac{V_{bc}}{2Z} \quad (2.7)$$

Substituindo (2.7) em (2.6), temos:

$$V_{bd} = \frac{V_{bc}}{2} \quad (2.8)$$

Note que V_{ea} é nula uma vez que, após a abertura do disjuntor, a corrente na fase “a” é zero, e admitindo os resultados obtidos pelas análises anteriores, a equação (2.4) pode ser reescrita como:

$$V_{ed} = \frac{V_{bc}}{2} + V_{nb} + V_{an} \quad (2.9)$$

Como a tensão V_{bc} pode ser expressa por:

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (2.10)$$

então:

$$V_{ed} = \frac{V_{bn} - V_{cn}}{2} + V_{nb} + V_{an} \quad (2.11)$$

Uma vez que o sistema é supostamente equilibrado, ou seja,

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2.12)$$

$$\rightarrow V_{bn} + V_{cn} = -V_{an} \quad (2.13)$$

reescrevendo (2.11), temos:

$$V_{ed} = \frac{V_{bn}}{2} - \frac{V_{cn}}{2} - V_{bn} + V_{an} \quad (2.14)$$

$$\rightarrow V_{ed} = V_{an} - \frac{V_{bn}}{2} - \frac{V_{cn}}{2} \quad (2.15)$$

Logo, substituindo (2.13) na equação (2.15), a tensão V_{ed} será:

$$V_{ed} = V_{an} - \left(-\frac{V_{an}}{2}\right) \quad (2.16)$$

$$\rightarrow V_{ed} = 1,5V_{an} \quad (2.17)$$

Em que “1,5” se refere ao fator de primeiro pólo para uma falta trifásica não aterrada. Para uma falta monofásica sem pólo preso, o fator de primeiro pólo é igual a 1,0.

Por sua vez, o fator de amplitude K_{af} é definido como a relação entre o maior valor de pico que atinge a TRT em seu regime transitório e seu valor em regime estacionário. Ele depende do tipo de falta a qual está submetido o disjuntor assim como da razão entre a corrente de curto-circuito no ponto de falta e a máxima capacidade de interrupção (%CNI) do equipamento sob chaveamento.

Os valores sugeridos para o K_{af} de acordo com o tipo de falta e %CNI para disjuntores de classe 15, 17,5 e 24 kV são apresentados nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3, respectivamente, sendo válida apenas para sistemas cujos cabos que conectam disjuntores e equipamentos adjacentes apresentem um comprimento inferior a 100 m (típico de subestações aéreas de distribuição). Para maiores comprimentos, a TCTRT é aproximadamente o dobro dos valores expostos (DUFOURNET & MONTILLET, 2005). A classe de tensão representa a tensão para a qual o equipamento foi projetado e fabricado para efetivar a atuação que se destina sem sofrer danos precoces.

Tabela 2.1. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas para equipamentos classe de 15 kV.

Classe de tensão u_r	%CNI	Fator de primeiro pólo - K_{pp}	Fator de amplitude - K_{af}	Valor de pico - u_c (kV)	Tempo - t_1 (μs)	TCTRT (kV/ μs)
15	100	1,5	1,54	28,3	31	0,91
	60	1,5	1,65	30,3	21	1,44
	30	1,5	1,74	32,0	12,5	2,56
	10	1,5	1,80	33,1	12,5	2,67

Fonte: IEC 62271-100.

Tabela 2.2. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas para equipamentos classe de 17,5 kV.

Classe de tensão u_r	%CNI	Fator de primeiro pólo - K_{pp}	Fator de amplitude - K_{af}	Valor de pico - u_c (kV)	Tempo - t_1 (μs)	TCTRT (kV/ μs)
17,5	100	1,5	1,54	33,0	34,0	0,97
	60	1,5	1,65	35,3	23,0	1,53
	30	1,5	1,74	37,3	14,0	2,66
	10	1,5	1,80	38,6	14,0	2,76

Fonte: IEC 62271-100.

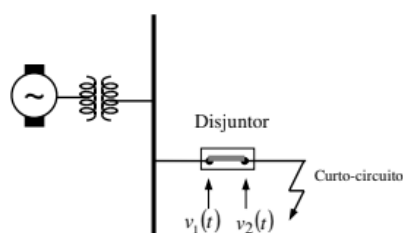
Tabela 2.3. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas para equipamentos classe de 24 kV.

Classe de tensão u_r	%CNI	Fator de primeiro pólo - K_{pp}	Fator de amplitude - K_{af}	Valor de pico - u_c (kV)	Tempo - t_1 (μs)	TCTRT (kV/ μs)
24	100	1,5	1,54	45,3	43,0	1,67
	60	1,5	1,65	48,4	29,0	3,01
	30	1,5	1,74	51,2	17,0	3,11
	10	1,5	1,80	52,9	17,0	1,08

Fonte: IEC 62271-100.

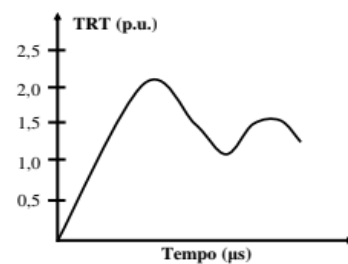
Faltas trifásicas não aterradas têm baixa probabilidade de ocorrência, mas ainda assim merecem análise uma vez que implicam em severas solicitações dielétricas ao meio de extinção do arco. Nas Figuras 2.13 e 2.14 temos, respectivamente, a representação da topologia comum desse tipo de falta e a forma de onda característica.

Figura 2.13. Topologia comum – Falta trifásica não aterrada.



Fonte: AZEVÊDO (2010).

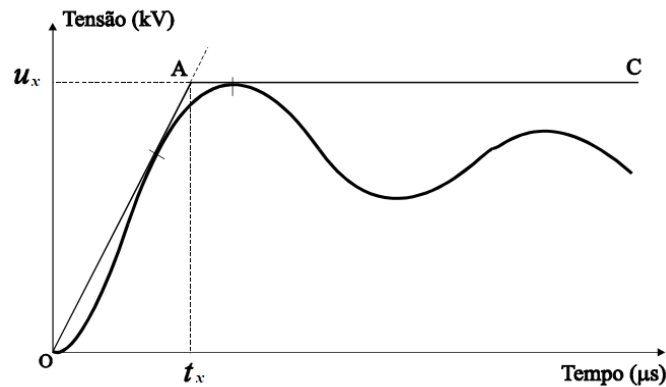
Figura 2.14. Forma de onda característica



Fonte: AZEVÊDO (2010).

Faltas trifásicas não aterradas e faltas quilométricas são recomendadas por norma para verificação da suportabilidade de equipamentos quanto à TRT. A representação da TRT dita “presumida” são as coordenadas dos pontos de interseção dos segmentos de reta da envoltória a dois parâmetros. Havendo segmentos de reta, os dois parâmetros u_x e t_x caracterizam-se como coordenadas do ponto de interseção **A** (Figura 2.15) da forma de onda da TRT obtida da análise por simulação, medição ou teste.

Figura 2.15. Forma de onda característica.



Fonte: AZEVÊDO (2010).

O procedimento mais adotado para a análise de superação consiste em comparar, em um mesmo gráfico, o oscilograma da TRT propriamente dita (TRT presumida) com a envoltória prevista nas principais normas ou especificada pelo fabricante (TRT especificada).

Por exemplo, consideremos o caso de um disjuntor Classe 15 kV ALSTOM com Capacidade Nominal de Interrupção (CNI) 25 kA. Caso se detecte uma corrente de falta, em cenário de eliminação de curto trifásico não aterrado, com corrente de intensidade 10 kA, temos:

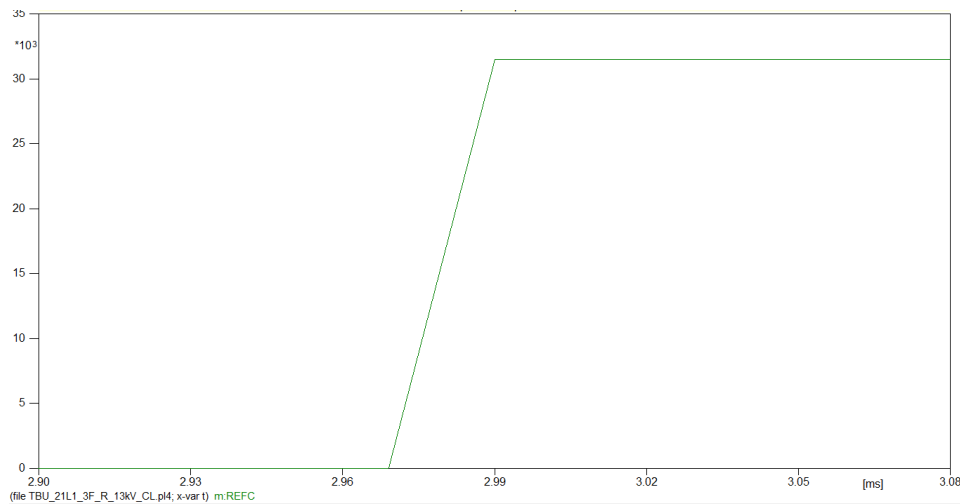
$$\%CNI = 10k/25k \quad (2.18)$$

Isso resulta em $\%CNI = 40\%$ (T40). Pela Tabela 2.1, deve-se observar o valor imediatamente superior, em que admitimos o fator de amplitude T60, o qual resulta $K_{af} = 1,65$. O fator de primeiro pólo para este tipo de falta é 1,5. A classe de tensão do equipamento é 15 kV. Assim, utilizando a Equação (2.2):

$$u_c = 1,65 * 1,50 * 15k * \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.19)$$

O resultado da Equação (2.19) é $u_c = 31,5$ kV. Observando, ainda a Tabela 2.1, constata-se um tempo $t_x = 21\mu s$. Isto indica uma taxa máxima de crescimento de $1,5$ kV/ μs . O resultado disto é a TRT especificada, sendo indicado no gráfico da Figura 2.16.

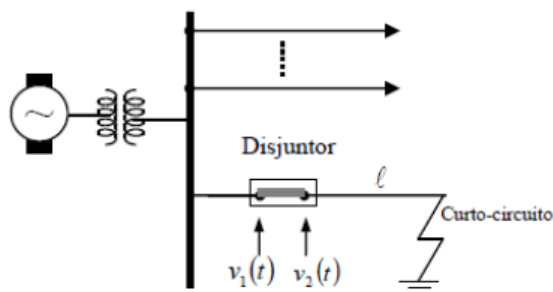
Figura 2.16. TRT presumida para $u_x = 31,5 \text{ kV}$ e $t_x = 21 \mu\text{s}$.



Fonte: Autoria própria.

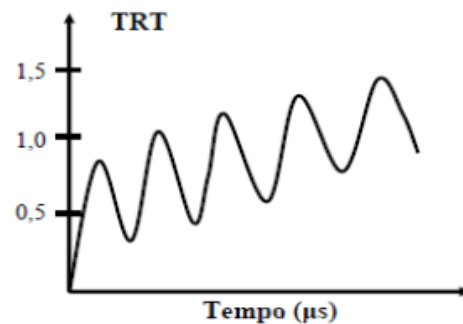
No caso de uma falta quilométrica, que tem sua representação da topologia e forma de onda característica mostradas na Figuras 2.17 e 2.18, respectivamente, admitamos um religador ALSTOM, modelo 22017/1/16, classe 15kV com capacidade de interrupção de 16kA.

Figura 2.17. Topologia comum – Falta monofásica quilométrica.



Fonte: AZEVÊDO (2010).

Figura 2.18. Forma de onda característica.



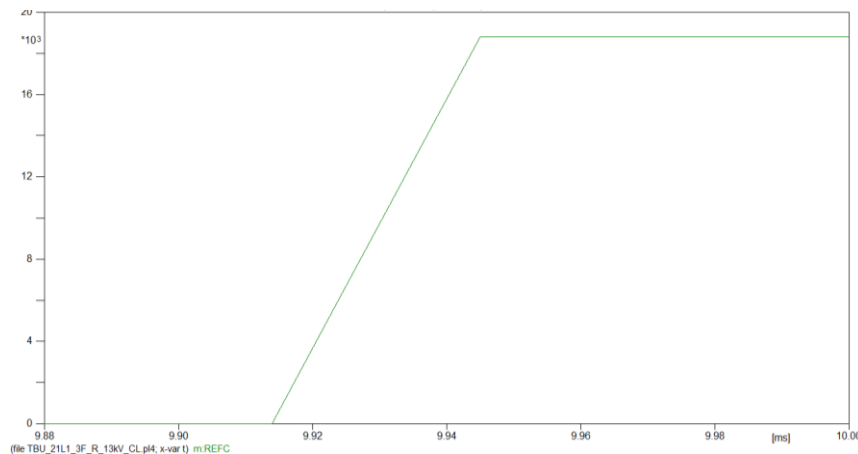
Fonte: AZEVÊDO (2010).

De acordo com a norma, em cenário de eliminação de falta quilométrica, $K_{af} = 1,54$. O fator de primeiro pólo para este tipo de falta é 1,0. A classe de tensão do equipamento é 15 kV. Assim, utilizando a Equação (2.2):

$$u_c = 1,0 * 1,54 * 15k * \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.19)$$

O resultado da Equação (2.19) é $u_c \approx 18,8 \text{ kV}$. Observando, ainda a Tabela 2.1, constata-se um tempo $t_x = 31 \mu\text{s}$. Isto indica uma taxa máxima de crescimento de, aproximadamente $0,606 \text{ kV}/\mu\text{s}$. O resultado disto é a TRT especificada, sendo indicado no gráfico da Figura 2.19.

Figura 2.19. TRT presumida para $u_x = 18,8 \text{ kV}$ e $t_x = 31 \mu\text{s}$.



Fonte: Autoria própria.

Com a TRT presumida e admitindo a simulação do cenário em plataforma EMTP, é possível comparar e verificar o *status* do equipamento (superado/não superado) através de tabelas ou pela superposição da TRT presumida (simulada) com aquela cujos parâmetros são definidos por norma.

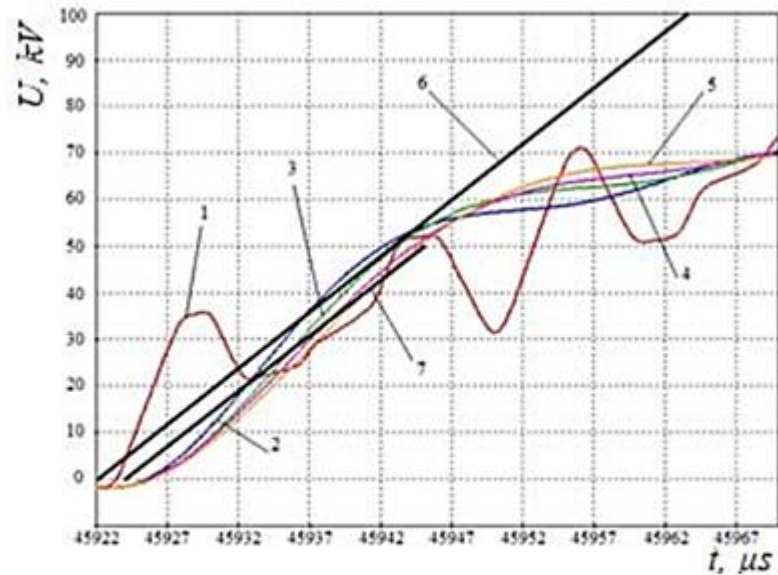
2.2.3 Medidas Típicas de Mitigação

A atenção aos limites de tensão em um sistema de potência busca, em grande parte, evitar que níveis de tensão excedam patamares especificados e, conseqüentemente, haja danos aos equipamentos responsáveis pela proteção. Desta forma, medidas corretivas buscam mitigar a intensidade das faltas para que a ação de correção seja efetivada de maneira eficiente com o menor custo possível. Limites de TCTRT e valor de pico são de extrema importância para manutenção da efetividade na mitigação.

No que diz respeito à TCTRT, como podemos observar na Figura 2.20, quando não há instalação de capacitores específicos para controle da taxa de crescimento da TRT (curva 1), o limite da referência (curva 6) é ultrapassado. Quando é adicionada uma capacitância de 30nF (curva 2) já é perceptível a redução da oscilação na frequência. Nas curvas 3, 4, 5 e 7, onde foram instaladas células de surto capacitivas de 40, 50, 60 e 70nF respectivamente, já fica claro que o limite da curva 1 não foi superado, ou seja, desta forma fica claro que a instalação de capacitâncias adicionais através da inserção de células de surto capacitivas ao sistema reduz oscilações de alta frequência nos componentes da TRT e, portanto, pode-se assumir

que, quanto maior o valor da capacitância adicional, mais lenta se torna a TCTRT (RAHIMOV *et al.*, 2019).

Figura 2.20. TRT antes e depois da instalação de capacitores.



LEGENDA:

Curva 6: Referência

Curva 1: Cenário base.

Curvas 2, 3, 4, 5 e 7: Cenários com inserção de células de 30, 40, 50, 60 e 70nF respectivamente.

Fonte: Rahimov *et al.*, (2019).

Já no que se refere ao valor de pico, são medidas eficazes não apenas a transferência de comando de abertura (*trip*) e substituição do equipamento por outro de classe de tensão superior como também a utilização de varistores de óxido de zinco (ZnO) (Nobre *et al.* 2001).

2.3 Subestações e Equipamentos

Uma Subestação Elétrica (SE) trata-se de um conjunto de equipamentos de manobra e/ou transformação. Há casos também em que estas atuam na compensação de reativos para dirigir o fluxo de energia no SEP e tornar possível sua diversificação através de rotas alternativas. Dispositivos de proteção capazes de detectar e atuar na eliminação de diferentes tipos de faltas são, também, parte essencial de uma subestação (DUAILIBE, 1999).

As subestações possuem classificações de acordo com a instalação e função. Quanto à instalação, há subestações externas (*outdoor*), nas quais seus equipamentos são instalados

sujeitos às intempéries e, há subestações internas/abrigadas (*indoor*), nas quais seus equipamentos são instalados abrigados das condições atmosféricas.

Quanto à função, vale destacar as subestações transformadoras (que convertem níveis de tensão) e as subestações seccionadoras, de manobra ou de chaveamento que, atuam na interconexão entre circuitos sob o mesmo nível de tensão (possibilitam manobras de seccionamento e energização em trechos sucessivos).

No contexto dos sistemas elétricos, subestações abaixadoras normalmente coexistem de modo que as distribuidoras de energia recebem alimentação proveniente do SEP para, daí, suprir seus consumidores. Níveis de tensão típicos neste contexto são 138 e 69kV (subtransmissão) e 34,5 e 13,8 kV (distribuição).

Tendo em vista o nível de distribuição, será abordada no capítulo seguinte a exposição da modelagem do estudo de caso sob análise em uma ferramenta de software específica para análise de transitórios eletromagnéticos.

3 METODOLOGIA DE ESTUDO E SIMULAÇÃO DA TRT

No processo de modelagem e representação da rede elétrica sob estudo, foi aplicado um *software* da plataforma EMTP: O ATP (*Alternative Transient Program*). Nele foi utilizada a rotina Models, que pode ser utilizada para cálculo dos principais parâmetros da TRT. No entanto, para implementar a rotina, se fez necessário a compreensão da modelagem do sistema, para posterior análise entre resultados simulados e presumidos.

3.1 *Alternative Transient Program (ATP)*

O ATP é um *software* especializado em estudos eletromagnéticos com uma vasta série de aplicações e vantagens. O *software* possibilita a modelagem de equipamentos do sistema elétrico através da capacidade de configuração elétrica das redes, desde que se obedeça a faixa de frequência necessária para avaliação dos fenômenos.

Recursos para modelagem de sistemas de transmissão e de distribuição em uma mesma plataforma são outros destaques da ferramenta no quesito de análises de transitórios eletromagnéticos para diferentes configurações operacionais. Simulações de redes polifásicas, utilizando a matriz de admitância de barras também são passíveis de serem realizadas no programa.

Quanto à formulação matemática utilizada pelo ATP, esta é baseada, para elementos com parâmetros distribuídos, no método de Bergeron e, para parâmetros concentrados, na regra de integração trapezoidal, onde são aplicadas técnicas de esparsidade e de fatoração triangular otimizada de matrizes durante a solução (AMON FILHO; PEREIRA, 2001).

O programa ATP lida com um arquivo de dados em formato texto, que pode ser editado com o EDIT do MS-DOS e NOTEPAD. A única restrição é que o arquivo de dados seja armazenado em formato ASC II. Uma vez aberto o arquivo ASC II no ATP, este realiza sua leitura (entrada de dados) e, após efetuar o processamento desse arquivo, cria outro arquivo geral com todo o estudo efetuado, com extensão em *.LIS*.

O programa também possibilita a geração de um outro arquivo com a extensão *.PLA*, em que apresenta os resultados de tensão, corrente, potência e energia, obtidos na simulação em forma de vetores coluna.

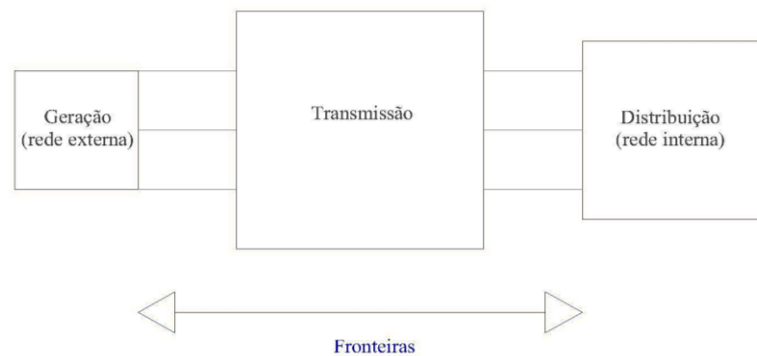
3.2 *Modelagem dos Ativos do Sistema*

Em relação aos equivalentes de rede, necessários para restringir o escopo dos dados e da modelagem, tendo em vista a relevância da influência das dimensões do sistema sob análise nos resultados, deve ser observado que não pode estar muito próximo da subestação a

ser estudada, a fim de evitar discrepâncias e erros na análise da suportabilidade dos equipamentos (AZEVEDO *et al.*, 2009).

Assim, para efetivação de estudos de fenômenos transitórios via ferramentas de simulação, se faz necessária a limitação do sistema em rede externa, fronteira e rede interna (Figura 3.1), em que estas duas últimas são detalhadas com mais robustez.

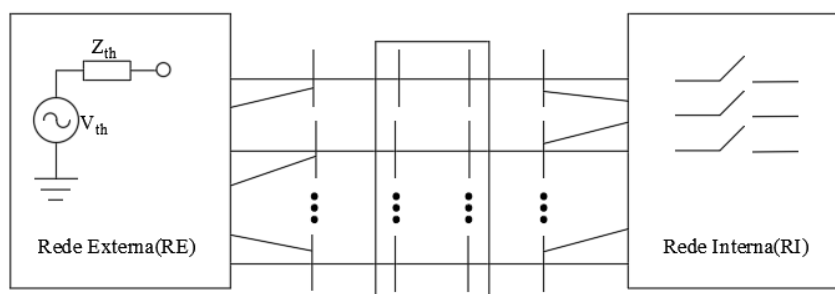
Figura 3.1. Representação da rede externa, fronteira e rede interna do SEP.



Fonte: Autoria própria.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018), a delimitação para a rede de estudo é tal que deve haver, no mínimo, duas barras entre as barras de estudo e as barras de fronteira (Figura 3.2). Mas esta condição só é válida para a rede básica (igual ou acima de 230 kV). Como as redes de distribuição estão conectadas a estas no sistema elétrico brasileiro, deve-se considerar a experiência de operadores ou engenheiros de planejamento a fim de definir comprimento mínimo da rede modelada uma vez que, normalmente, mesmo em estudos de transitórios eletromagnéticos, são comumente utilizados equivalente Thèvenin a 60 Hz obtidos de plataformas de curto-circuito como o ANAFAS¹.

Figura 3.2. Delimitação de redes sugerida pelo ONS.



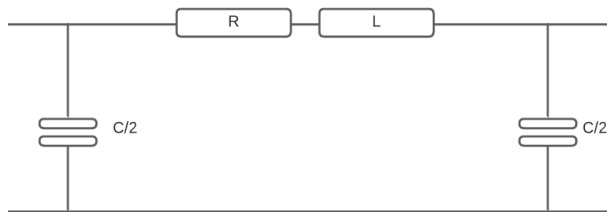
Fonte: Autoria própria.

¹ Programa de análise de faltas desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica “CEPEL”.

No caso dos cabos aéreos em subestações de redes de distribuição, estes comumente apresentam comprimento menor que 100m. Deste modo, é suficiente a representação a parâmetros concentrados por meio do modelo π , como mostrado na Figura 3.3.

Na Figura 3.4 temos um exemplo de modelagem de uma linha de distribuição. Para a simulação foi considerado como tendo um comprimento de 3km e a carga foi concentrada neste ponto. Os nós que pertencem à linha em análise estão dispostos na coluna 1 do código (Bus 1) e se repetem para os demais pontos (Bus2, Bus3 e Bus4). Os dados que caracterizam a linha: resistência, indutância e capacitância estão dispostos em Ω , mH e μF , respectivamente.

Figura 3.3. Representação para cabos curtos (< 100m).



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.4. Modelo da linha no ATP

```

C
C /////////////////////////////////////////////////// SETOR DE 13.8 kV ////////////////////////////////////////
C LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO: SUPONDO COMPRIMENTO DE 3km ATÉ AS CARGAS
C ///////////////////////////////////////////////////
C
C --- SUBESTAÇÃO UBT -----
C
C
C -----
C INCLUSÃO DE DISJUNTOR DE REFERÊNCIA NA LINHA PARA ANÁLISE DE FALTA QUILOMÉTRICA
C LD RELIGADOR Z1L1 (D1L12) ATÉ A CARGA EQUIVALENTE
C -----
C
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<---Rk---Lk---CkCOMPR<L<P
-1D1L12ADAUX1A .439 2.165 1.785 2.00
-2D1L12BDAUX1B .262 .398 4.253 2.00
-3D1L12CDAUX1C
C
-1DAUX2ATBUL1A .439 2.165 1.785 1.00
-2DAUX2BTBUL1B .262 .398 4.253 1.00
-3DAUX2CTBUL1C
C

```

Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

Em linhas de transmissão, o modelo a parâmetros distribuídos de Bergeron apresenta precisão satisfatória no espectro da TRT representando circuitos que não se conectam diretamente ao ramal de alimentação da subestação que está sujeita a estudos (Durbak *et al*, 2009, *apud* MELO, 2010, p.14).

Já no que concerne às cargas, o modelo RL série é adotado, pois este provoca um nível mais elevado de severidade de TRT comparado ao modelo RL paralelo, sendo assim, se trata de um modelo mais conservador. Essa característica do modelo decorre da filtragem de sinais de alta frequência realizada pela reatância do elemento série, que faz o circuito se comportar como se estivesse em aberto para essas componentes.

O modelo para as cargas está disposto na Figura 3.5, enquanto a modelagem está disposta na Figura 3.6. Os dados inseridos referentes à resistência e indutância foram fornecidos pela concessionária. No caso da capacitância, a coluna em branco deixa o valor *default* para este parâmetro.

Figura 3.5. Modelo RL série aplicado na representação das cargas.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.6. Modelagem da carga no ATP.

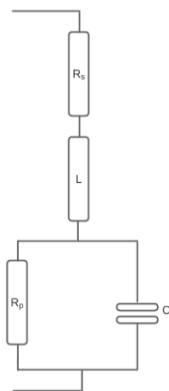
```

C ----- SUBESTAÇÃO UBT - INÍCIO
C SUBESTAÇÃO UBT
C
C RELIGADORES ALIMENTADOS PELO TRAF0 02T1 TOSHIBA
C
C ----- RELIGADOR 21L1
C
C ----- CARGA LEVE - MODELO SÉRIE
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<---R<---L<---C
TBUL1A          79.75 40.932
TBUL1B          79.75 40.932
TBUL1C          79.75 40.932
    
```

Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

Quanto aos bancos de capacitores pertencentes às subestações, são representadas a capacitância própria (C), duas resistências: uma referente à resistividade do meio dielétrico e suas perdas (R_p) e a parte correspondente aos cabos conectados em série (R_s) e, finalmente, a indutância intrínseca do capacitor (L), devido aos seus cabos e eletrodos (WHITAKER, 1999). Na Figura 3.7, temos a ilustração do modelo completo que é mais requisitado no estudo de manobra de banco de capacitores, no entanto, para fins de estudos de análise de TRT foram desprezadas as resistências e a indutância.

Figura 3.7. Modelo completo da representação de um capacitor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.8. Modelagem de um capacitor no ATP.

```

~
C SE UBT-----
C
C CAPACITOR: 01H1(TBA13)
C Q = 2.40 ; 1.80 (MVAR) RESPECTIVAMENTE
C V = 13.8 KV
C YC = Q / V^2 (MHOS) ; (EM MICROMHOS)
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C
C 01H1
C
TB0H1A          12.6E3
TB0H1B          12.6E3
TB0H1C          12.6E3
C
    
```

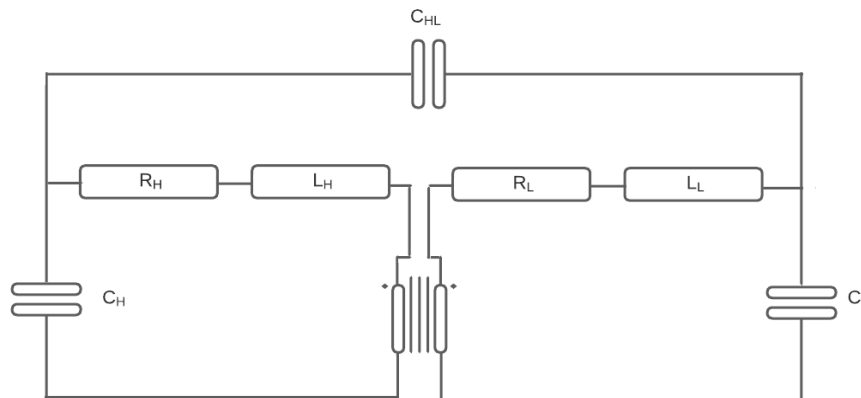
Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

A partir da potência reativa Q nominal do banco e do nível de tensão V entre as fases do barramento onde o banco de capacitores está instalado, obtêm-se a capacitância C . No caso

da indutância L , esta é intrínseca ao banco e ao reator limitador de corrente. Segundo Zanetta Jr. (2003), seus valores típicos são, respectivamente, 5 a $100\mu\text{H}$. Na Figura 3.8, percebe-se que a partir das características de potência reativa (Q) e tensão de operação, foi estimada a sua impedância em $\mu\Omega$.

Os transformadores são modelados a partir das indutâncias e resistências no lado de baixa tensão (R_L e L_L), e no lado de alta tensão (R_H e L_H), desconsiderando o acoplamento entre fases. São consideradas também as capacitâncias que são intrínsecas das buchas (C_L e C_H), a capacitância entre as buchas de primário e secundário (C_{HL}) e, dos enrolamentos. Na Figura 3.9, temos a ilustração do modelo utilizado. Na Figura 3.10, temos o trecho referente à modelagem das capacitâncias, na Figura 3.11 o trecho referente à modelagem das chaves de TAP e, finalmente, na Figura 3.12 está descrita a modelagem das resistências e indutâncias deste equipamento no *software* de simulação utilizado.

Figura 3.9. Modelo de representação de um transformador no estudo da TRT.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.10. Modelagem das capacitâncias de um transformador no ATP.

```

C
C TRANSFORMADOR 02T1 TOSHIBA -
C CH = 7180 pF   CL = 12190 pF   CHL = 28720 pF
C
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
TBA13A                4.5956
TBA13B                4.5956
TBA13C                4.5956
TBA69A                2.7069
TBA69B                2.7069
TBA69C                2.7069
TBA13ATBA69A         10.827
TBA13BTBA69B         10.827
TBA13CTBA69C         10.827
r

```

Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

Figura 3.11. Modelagem do TAP dos transformadores no ATP.

```

C
C
TAPDRM = 0.950*132.79 {Tap dos transformadores de DRM 230/69kV
TAPUBT = 0.950*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPBBT = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPBGM = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPSPJ = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPXPC = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPASB = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPDBC = 0.950*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPTSB = 1.000*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPBLI = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPRTS = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV
TAPNCL = 0.975*69.0 {Tap dos transformadores 69/13.8kV

```

Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

Figura 3.12. Modelagem da resistência e da indutância dos transformadores no ATP.

```

C
TRANSFORMER TUBT1A
9999
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
1TBA69ATBA69B 0.952228.566TAPTBA
2TBA13A .01270.38088 7.967
TRANSFORMER TUBT1A TUBT1B
1TBA69BTBA69C
2TBA13B
TRANSFORMER TUBT1A TUBT1C
1TBA69CTBA69A
2TBA13C

```

Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

Perceba que para a modelagem deste equipamento, deve-se observar que para a inserção dos dados das capacitâncias da bucha de alta tensão CH, da de baixa tensão CL e da bucha de alta em relação à bucha de baixa CHL, foi necessária a conversão para a susceptância. Em um capacitor, a reatância é dada por:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (3.1)$$

Onde ω é a frequência em rad/s e C é o valor efetivo da capacitância. De (3.1) pode-se concluir que a susceptância (B) é:

$$\rightarrow B = \omega C \quad (3.2)$$

Como para a representação do valor das capacitâncias do transformador é necessário que o dado seja inserido em mS temos, a título de exemplo, que para inserir os dados referentes à capacitância de baixa efetivar o seguinte passo, a partir de (3.2):

$$B = 2\pi * 60 * 12.190x10^{-12} \quad (3.3)$$

$$\rightarrow B = 4,5956x10^{-6}S \quad (3.3)$$

Onde $12.190x10^{-12}$ corresponde ao valor da capacitância entre a bucha de baixa tensão e o solo (CL). Temos, desta forma, o valor da capacitância para o equipamento descrito inserido no cartão do ATP a partir da susceptância. Cálculos análogos foram desenvolvidos para a inserção dos valores de CH e CHL no ATP para as três fases.

Disjuntores e chaves são itens modelados como chaves controladas no tempo, desconsiderando a representação do arco elétrico (CAVALCANTI, 2010). Como características dessas chaves e disjuntores, ambos são dispostos como elementos ideais, ou seja, impedância infinita a partir do primeiro instante de abertura de seus contatos e nula quando em estado de condução. Na Figura 3.13, note que o equipamento é declarado como inicialmente estando fechado e, portanto, recebe o parâmetro (-1). Na segunda coluna, tem-se o tempo ao qual a chave tentará efetivar seu fechamento, o qual ocorre, na realidade, após a passagem da corrente por zero no primeiro pólo do equipamento a abrir após a indicação da falta.

Figura 3.13. Modelagem de um disjuntor no ATP.

```
C >----SETOR DE 13.8 kV-----<
C
D1B11AD1B12A-1.      1.
D1B11BD1B12B-1.      1.
D1B11CD1B12C-1.      1.
```

Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

3.3 Rotina Complementar

No *software* escolhido (ATP), a rotina MODELS é usada para descrever o controle de componentes e a operação destes em um circuito, gerar sinais e analisar medições, permitindo comparar a TRT presumida com aquela especificada.

No quesito de dados de entrada, esta Rotina Models depende de dados de entrada de um circuito representado no ATP tais como tensão, corrente e status de uma chave. Uma vez em posse dessas variáveis, o usuário as insere no *deck* do ATP.

As declarações de dados de entrada que armazenam as variáveis a serem utilizadas para cálculos da TRT seguem, basicamente, o seguinte padrão: no primeiro cartão de INPUT:

M00nX onde, ‘n’ representa o número do circuito (1, 2, 3...) e ‘x’ refere-se às fases (A, B e C) do nó do circuito que está sendo modelado: no segundo cartão de INPUT, são definidas variáveis, através de letras que, a partir da utilização da instrução “USE”, recebe os valores das fases das tensões de nó fornecidas anteriormente e o status das chaves (disjuntores).

Com a Rotina Models é factível plotar a envoltória de norma da TRT de modo que os valores de referência para o traçado das envoltórias da norma sejam fornecidos pelo usuário. No cartão DATA, as variáveis, geralmente UA e TA, receberão os valores do primeiro pico, E1, e do instante em que este ocorre, T1. As variáveis UC e TC, recebem os valores de referência do pico máximo E2 e seu instante de ocorrência T2 respectivamente.

A título de exemplo, para a obtenção da curva da Figura 2.15, tem-se a instrução USE sendo utilizada como mostrado na Figura 3.14. Por se tratar de uma envoltória a dois parâmetros, às variáveis UA e TA, destacadas em vermelho, é atribuído o valor zero ao passo que UC e TC, destacadas em verde, recebem, respectivamente, os valores da tensão de pico e o instante em que este ocorre que foram estimados(apresentados na seção 2.3.2).

Figura 3.14. Instrução USE para obtenção da envoltória presumida.

```

USE TRV AS TRVc
INPUT
  X:= M0001C
  Y:= M0002C
  Z:= M0003C
DATA
  UA:= 00000.0
  TA:= 00.E-0
  UC:= 31500.
  TC:= 21.0E-6
ENDUSE

```

Fonte: Arquivo de simulação (Relatório P&D concessionária).

No ATP, para o caso de análise da curva por fase, deve ser observado onde houve maior solicitação e a envoltória da norma é, então, inserida naquela fase. No caso de uma análise por fase, o primeiro pico e pico máximo são dados em Volts e, seus instantes de ocorrência dado em segundos. A taxa de crescimento é dada em Volt/segundo. Para obtenção da taxa de crescimento, S, em kV/ μ s, basta multiplicar o valor obtido no gráfico do ATP por 10^{-9} .

Desta forma, tendo modelado o sistema, é possível partir para a análise dos resultados obtidos via simulação do sistema sob estudo. No próximo capítulo estão dispostos estes resultados e propostas de mitigação para um sistema de distribuição de energia.

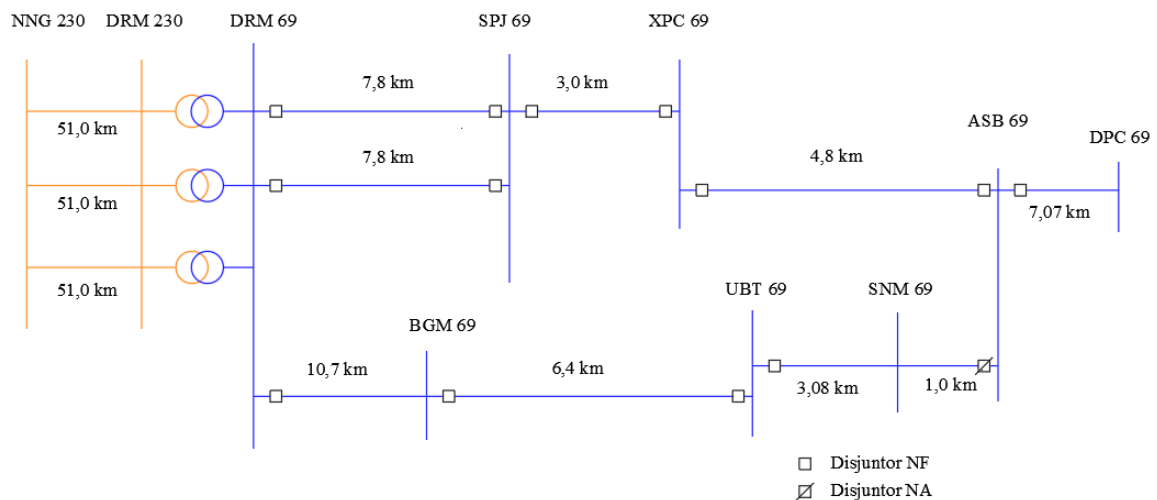
4 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Com base no sistema piloto escolhido para o estudo de caso serão analisados, neste capítulo, os requisitos normativos quanto aos equipamentos avaliados e critérios para simulação. Serão apreciadas também a análise da TRT com síntese dos casos estudados e, finalmente, serão apontadas soluções aos equipamentos superados.

4.1 Descrição do Sistema Elétrico

O sistema elétrico sob estudo é baseado em um trecho de uma rede de distribuição de energia de uma concessionária que opera no Brasil. A subestação sob estudo deriva da regional DRM 69kV, conectada em uma rede de 230 kV através de três transformadores (DRM230 / DRM 69), apresentado três ramais principais. De modo geral, o sistema é alimentado pela seccional BGM e SPJ, como é possível notar a partir da Figura 4.1.

Figura 4.1. Unifilar simplificado - Regional.

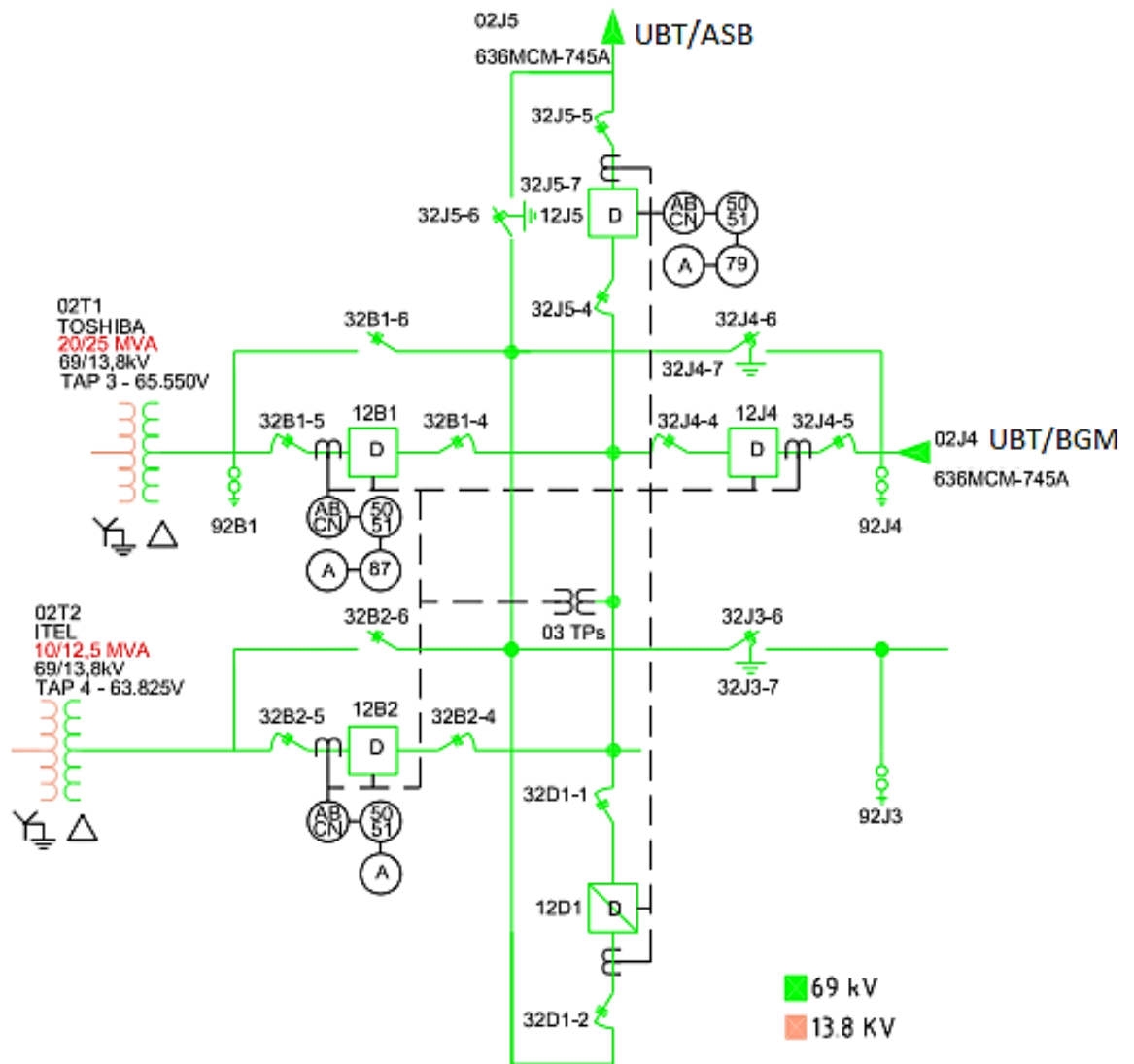


Fonte: Autoria própria.

Na SE UBT, os disjuntores serão avaliados quanto ao seu desempenho diante de faltas terminais trifásicas não aterradas, assim como os religadores. No entanto, estes últimos serão investigados também sob a ótica de cenário de falta monofásica quilométrica.

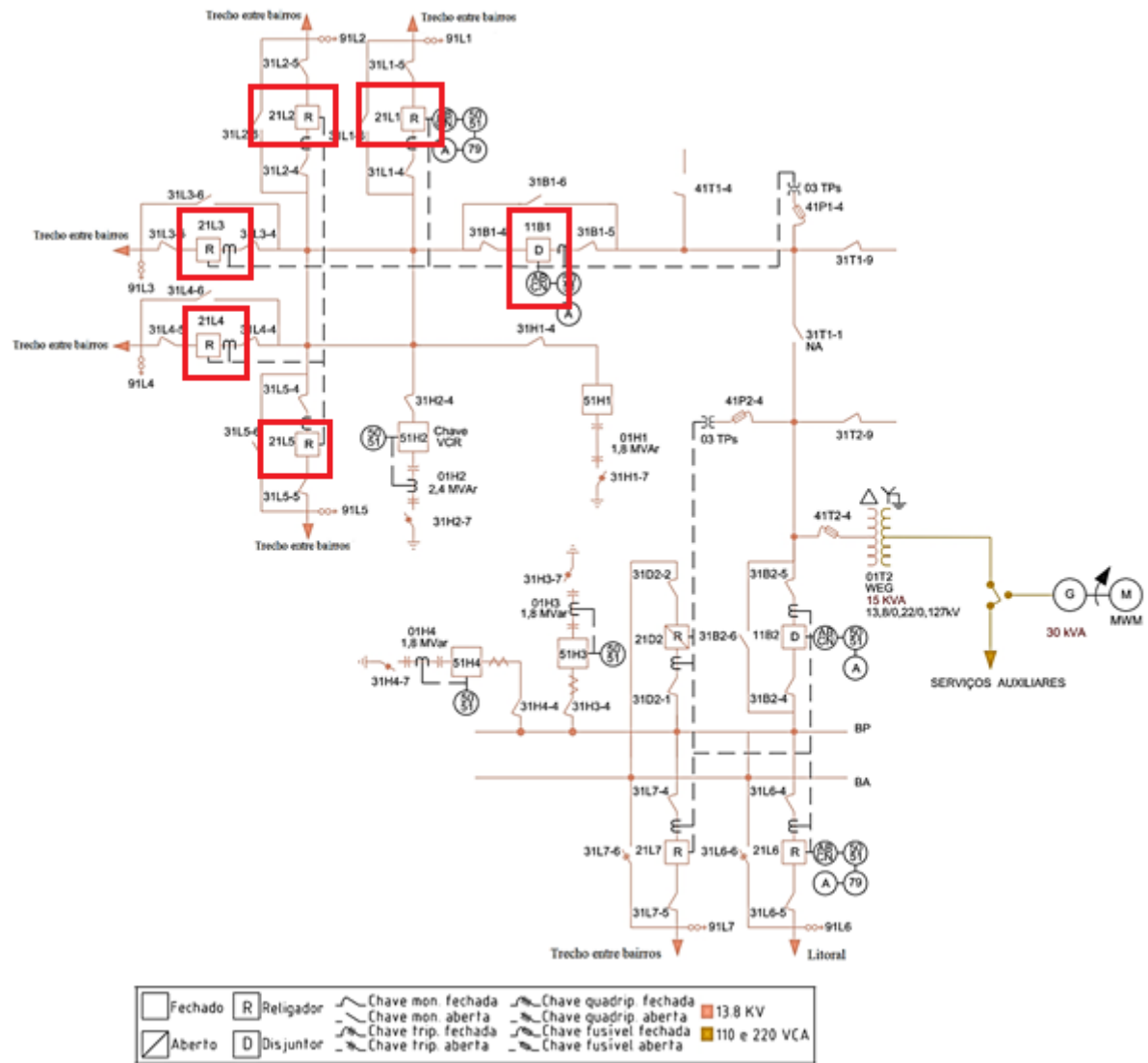
Dentro do sistema da Regional (Figura 4.4), a subestação a ser analisada como estudo de caso é a SE UBT, em destaque em verde. Nas Figuras 4.2 e 4.3 estão dispostos, respectivamente, os diagramas unifilares para os trechos de 69 e 13.8kV

Figura 4.2. Unifilar da SE UBT - trecho 69kV.



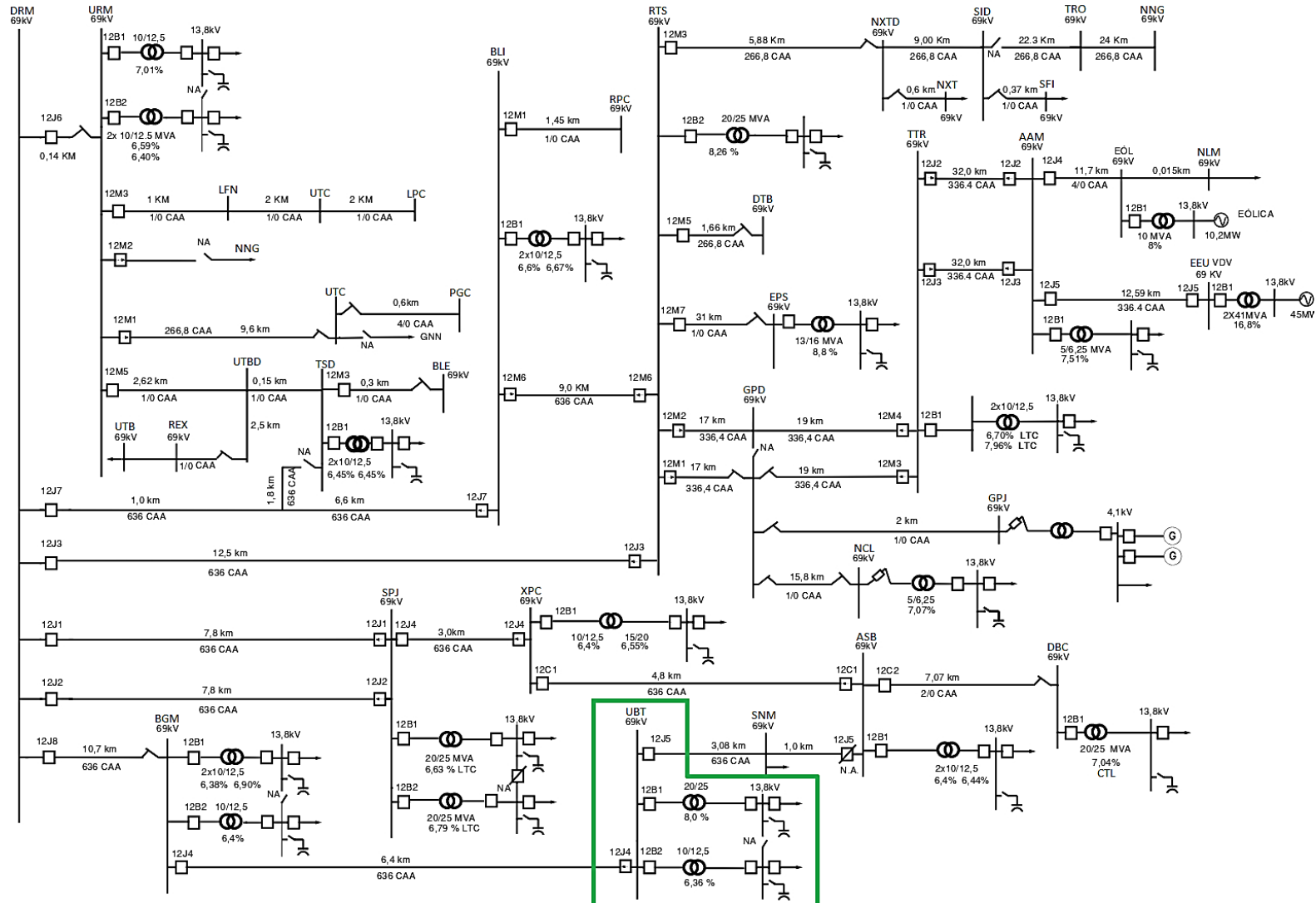
Fonte: Relatório P&D concessionária.

Figura 4.3. Unifilar da SE UBT- trecho 13.8kV com equipamentos sob estudo em destaque.



Fonte: Relatório P&D concessionária.

Figura 4.4. Regional - SE UBT em destaque.



Fonte: Relatório P&D concessionária.

4.2 Requisitos Normativos aos Equipamentos Avaliados

Para os equipamentos classe 15 kV, segundo observado na Tabela 2.1, os parâmetros são especificados de acordo com o percentual de Corrente Nominal de Interrupção (%CNI) que é dividido em 4 patamares: 10, 30, 60 e 100%. Para estes patamares, no cenário de falta trifásica não aterrada o fator de primeiro pólo (K_{pp}) é 1,54 enquanto o fator de amplitude (K_{af}) pode ser 1,54; 1,65; 1,74 ou 1,80 para cada respectivo %CNI. O valor de pico (u_c), em kV, pode ser tomado como sendo 28,3; 30,3; 32,0 ou 33,1 variando, analogamente ao caso anterior, de acordo com o %CNI. No caso de análise de falta quilométrica, K_{pp} é igual a 1,54 e K_{af} é unitário.

4.3 Comparação entre TRT Simulada e TRT Presumida

Como sugerido na norma de referência IEC 6271-100, 2008, pelas características de solicitação, serão apreciados cenários de faltas trifásicas não aterradas e faltas monofásicas quilométricas.

Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 estão expostos de forma sintética os resultados obtidos via simulação quanto à suportabilidade de TRT dos equipamentos analisados na SE UBT. Percebe-se que é possível também a apreciação de forma gráfica sobre os resultados de curvas da envoltória presumida e especificada por norma.

Tabela 4.1. Diagnóstico dos religadores: Falta monofásica quilométrica.

Equipamento	Simulação		Referência		Equipamento Superado?
	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	
21L1	21,3	1.28	18,90	0,61	Sim
21L2	22,2	1.19	18,90	0,61	Sim
21L3	21,6	1.19	18,90	0,61	Sim
21L4	21,6	1,38	18,90	0,61	Sim
21L5	22,1	0,80	18,90	0,61	Sim

Tabela 4.2. Diagnóstico do disjuntor: Falta trifásica não aterrada.

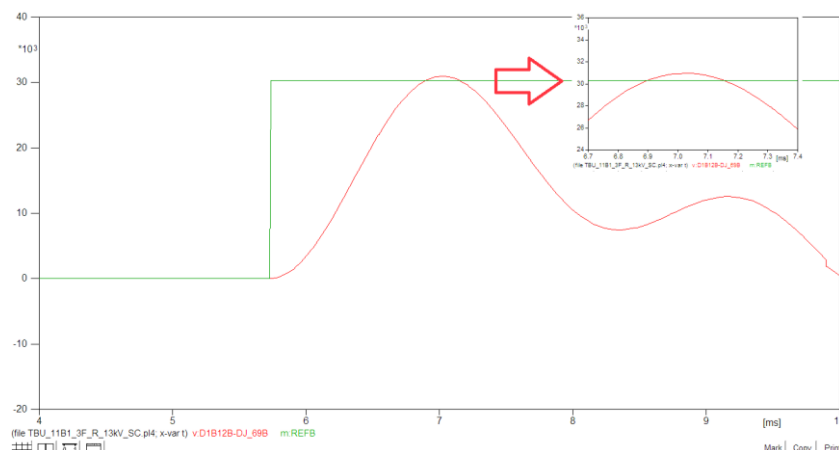
Equipamento	Simulação		Referência		Equipamento Superado?
	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	
11B1	30,97	0,31	30,30	1,44	Sim

Tabela 4.3. Diagnóstico dos religadores: Falta trifásica não aterrada.

Equipamento	Simulação		Referência		Equipamento Superado?
	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	
21L1	27,61	0,64	28,30	0,91	Não
21L2	28,73	0,60	28,30	0,91	Sim
21L3	27,46	0,58	28,30	0,91	Não
21L4	27,38	0,56	28,30	0,91	Não
21L5	27,36	0,62	28,30	0,91	Não

Na Figura 4.5 está disposto o resultado da simulação do cenário de falta trifásica não aterrada no disjuntor 11B1. Para ser traçada a envoltória especificada por norma (em verde) foi desenvolvido código com os parâmetros especificados na Figura 3.12. A curva em vermelho representa a TRT presumida. Note que o equipamento foi superado por pico de TRT.

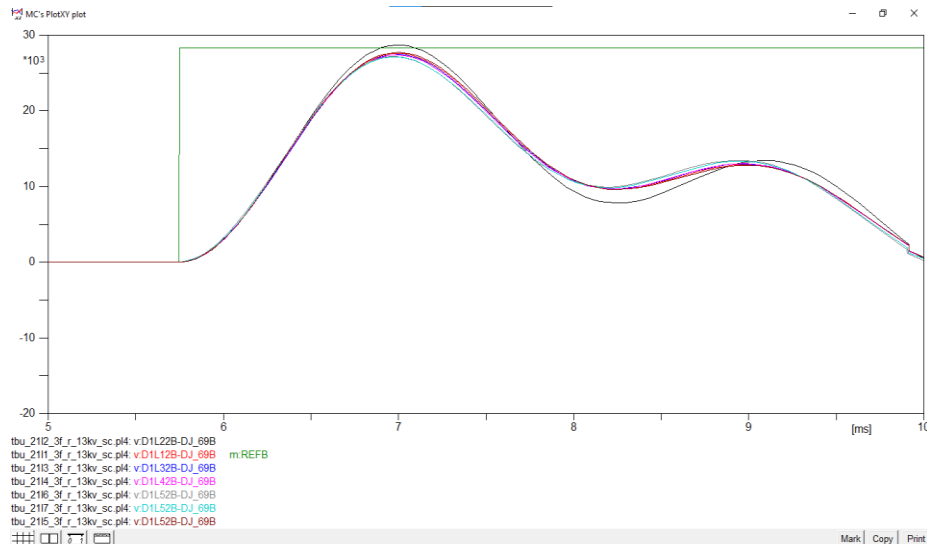
Figura 4.5. Sobreposição das curvas presumida e especificada - Disjuntor 11B1 em cenário de falta trifásica não aterrada.



Fonte: Autoria Própria.

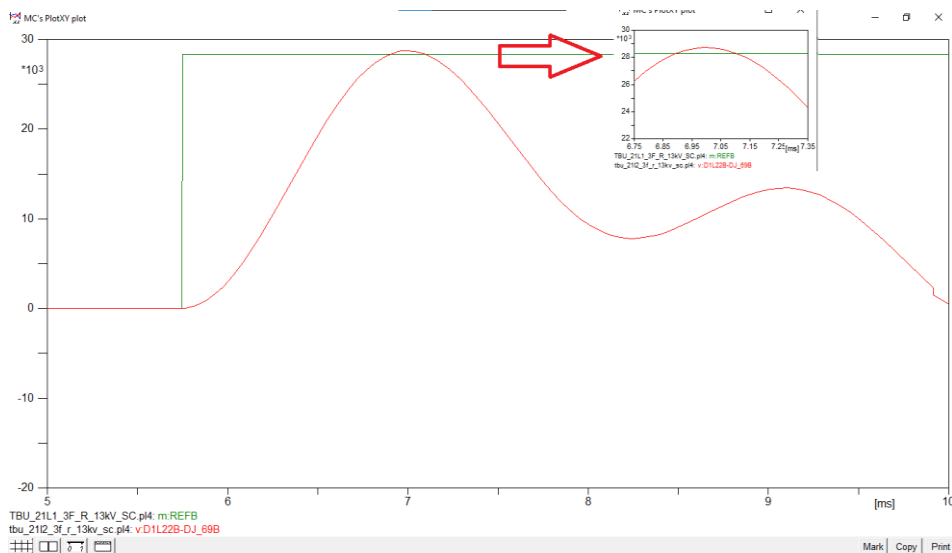
Percebe-se que, como mostrado na Figura 4.6 dentre os religadores em cenário de falta trifásica não aterrada, os equipamentos não se mostraram superados por taxa de crescimento ou valor de pico, com exceção do religador 21L2, em destaque na Figura 4.7, que foi superado por pico.

Figura 4.6. Sobreposição das curvas presumida e especificada - Religadores



Fonte: Autoria Própria.

Figura 4.7. Sobreposição das curvas presumida e especificada religador 21L2 superado por pico.

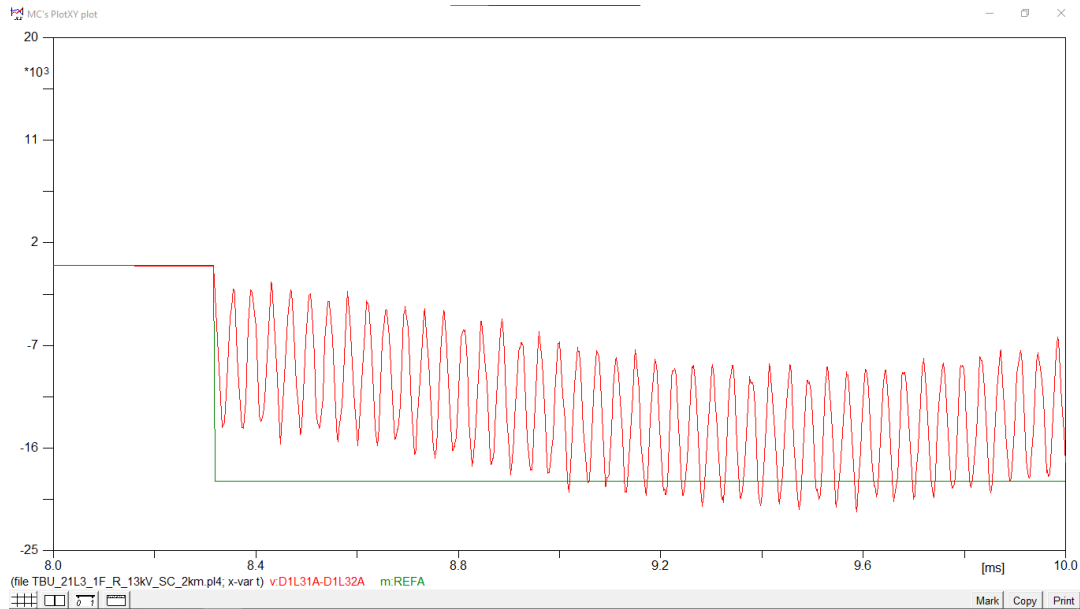


Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 4.8 está disposto o resultado da simulação do cenário de falta monofásica quilométrica no religador 21L3 que foi atingido de maneira análoga aos casos anteriores:

estabelecimento da envoltória especificada por norma com base na corrente de falta e classe de tensão do equipamento seguido de sobreposição com a curva de TRT presumida.

Figura 4.8. Sobreposição das curvas presumida e especificada - Religador 21L3.



Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se, a partir da Figura 4.8 que o equipamento superado por pico (relacionado à tensão disruptiva do meio de extinção do arco elétrico). A partir da Tabela 4.1 ficou claro que foi também superado por taxa de crescimento (relacionado a estresses térmicos na câmara). Na próxima seção será abordado de forma sucinta os resultados obtidos.

4.4 Soluções aos Equipamentos Superados

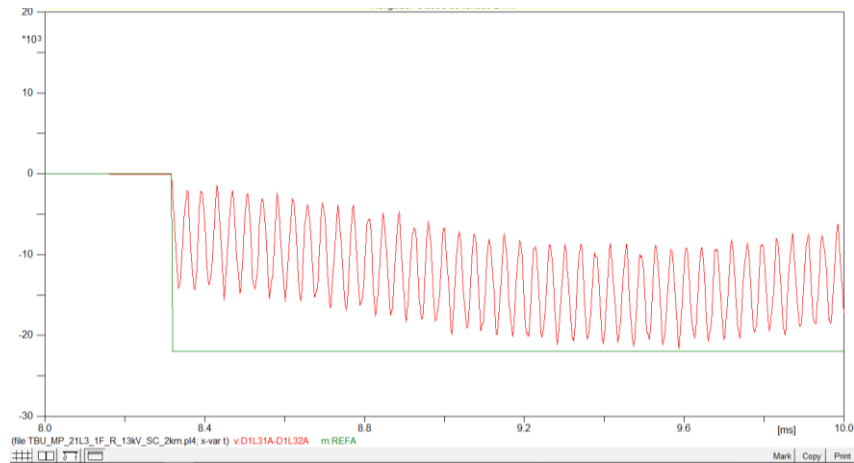
No que se refere ao disjuntor e religadores analisados, os níveis de segurança voltados para a capacidade dielétrica foram ultrapassados no caso de falta monofásica quilométrica em todos os religadores e, no cenário de falta trifásica não aterrada, o disjuntor 11B1 e o religador 21L2 também se mostraram superados.

Apesar de medidas de mitigação como restrições a patamares de carga e transferência de comando de abertura serem soluções potenciais no que se refere à superação dos equipamentos, nesta seção, serão abordadas outras duas opções que se mostraram eficazes: Inserção de células de surto capacitivas e troca do equipamento de proteção por um de classe de tensão superior.

4.4.1 Mitigação ao Pico da TRT

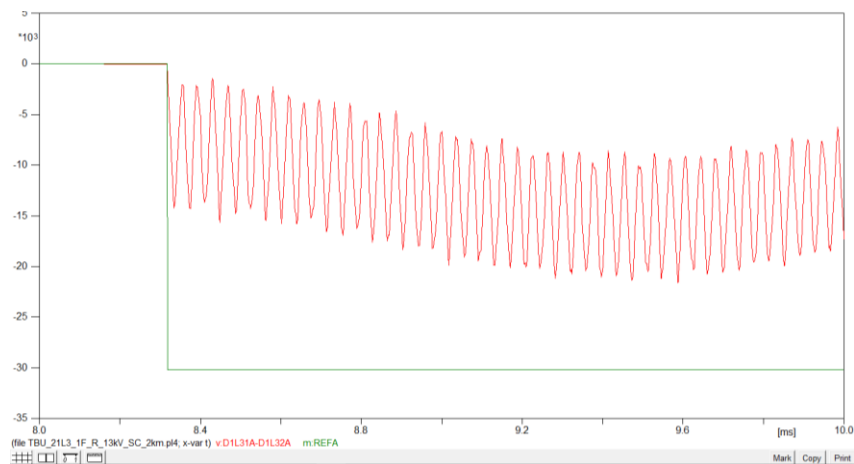
Para o cenário de falta monofásica quilométrica, os religadores se mostraram superados por pico, portanto, com vistas a tornar o sistema seguro, a troca do equipamento por um de classe de tensão maior foi simulada. Como está disposto na figura 4.9, com a classe de 17,5kV, para o religador 21L3, fica claro que a medida corretiva torna o equipamento compatível com os padrões de segurança estabelecidos por norma. Como solução adicional, foi analisado também o cenário de substituição do equipamento por outro de classe de tensão de 24kV, o resultado está disposto na Figura 4.10.

Figura 4.9. Envoltória não superada após troca do equipamento por outro de classe de tensão de 17,5kV (falta quilométrica).



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.10. Envoltória não superada após troca do equipamento por outro de classe de tensão de 24 kV (falta quilométrica).



Fonte: Autoria própria.

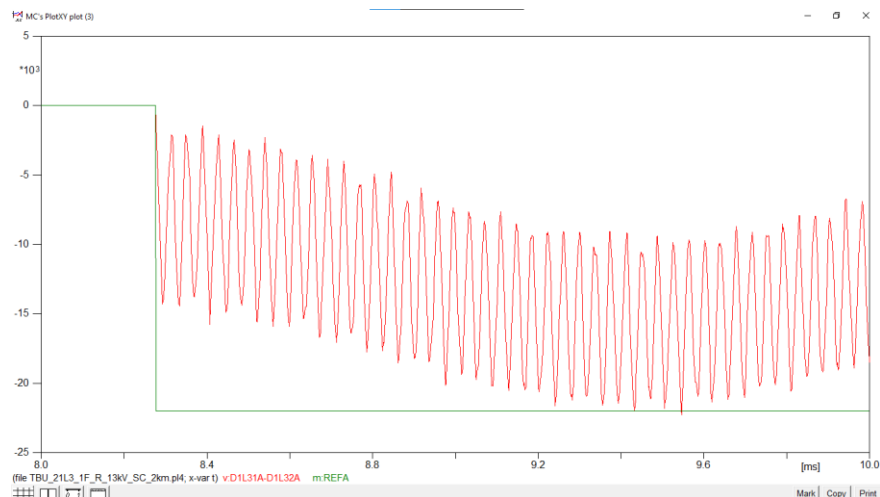
Para fins comparativos, na Tabela 4.4 estão dispostos de forma sintetizada os resultados para comparação entre o valor de pico detectado na TRT do religador 21L3 e o valor de segurança estabelecido pela envoltória normativa. Pode-se observar que, quanto maior a classe de tensão do equipamento, maior será a sua margem de segurança para atuação diante o cenário de falta.

Tabela 4.4. Comparação de margem de segurança para religador classe de tensão 17,5 e 24kV.

Classe de tensão (kV)	Valor de pico presumido (kV)	Valor de pico especificado (kV)	Margem de segurança (%)
17,5	21,6	22,0	1,8
24,0	21,6	30,2	28,4

A substituição do equipamento por outro de classe de tensão imediatamente superior (17,5kV) permite suportabilidade ao fenômeno, contudo há uma margem de segurança de apenas 1,8%. Este tipo de margem, apesar da modelagem conservadora de alguns equipamentos, pode, em cenário crítico com carga leve, por exemplo, implicar na superação (Figura 4.11). Tendo isso em vista, o equipamento de classe de tensão 24kV é o mais indicado.

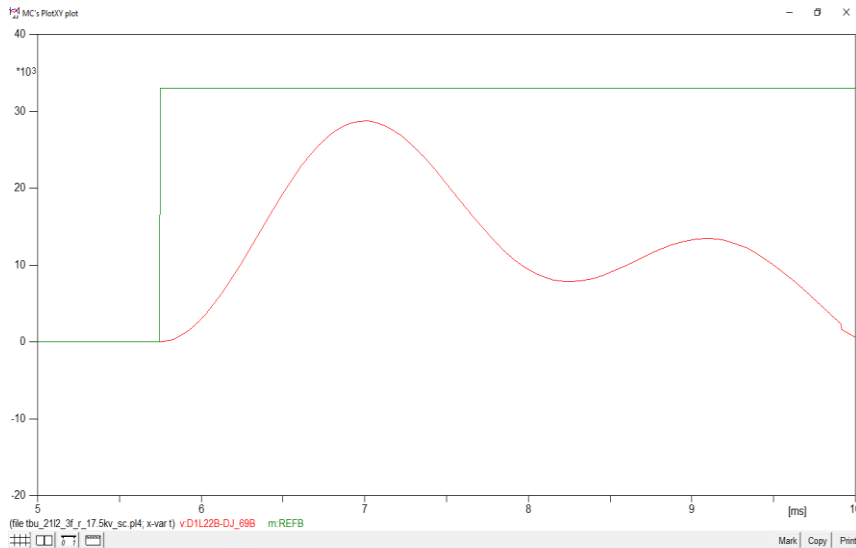
Figura 4.11. Envoltória referente a equipamento classe 17,5 superada em cenário sem carga nos religadores 21L2, 21L3 e 21L4.



Fonte: Autoria própria.

Em cenário de falta trifásica não aterrada, no religador 21L2, a substituição do equipamento existente por outro de classe de tensão superior (24kV), este se mostrou adequado aos níveis de segurança exigidos por norma (Figura 4.12).

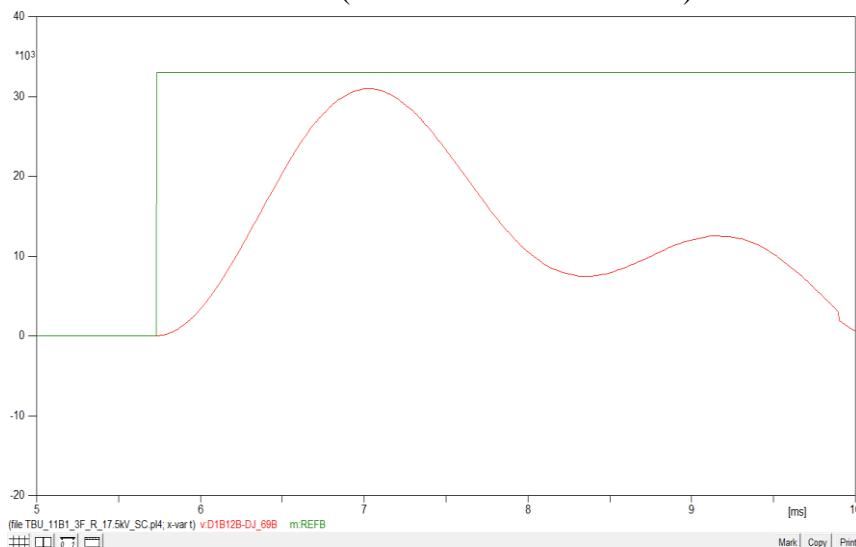
Figura 4.12. Envoltória não superada após troca do religador 21L2 por outro de classe de tensão maior (falta trifásica não aterrada).



Fonte: Autoria própria.

Ainda sob este cenário, se faz necessária a mitigação do pico do disjuntor 11B1. Simulando a troca do equipamento por um de classe de tensão de 24kV foi obtido o resultado mostrado na Figura 4.13.

Figura 4.13. Envoltória não superada após troca do disjuntor 11B1 por outro de classe de tensão maior (falta trifásica não aterrada).

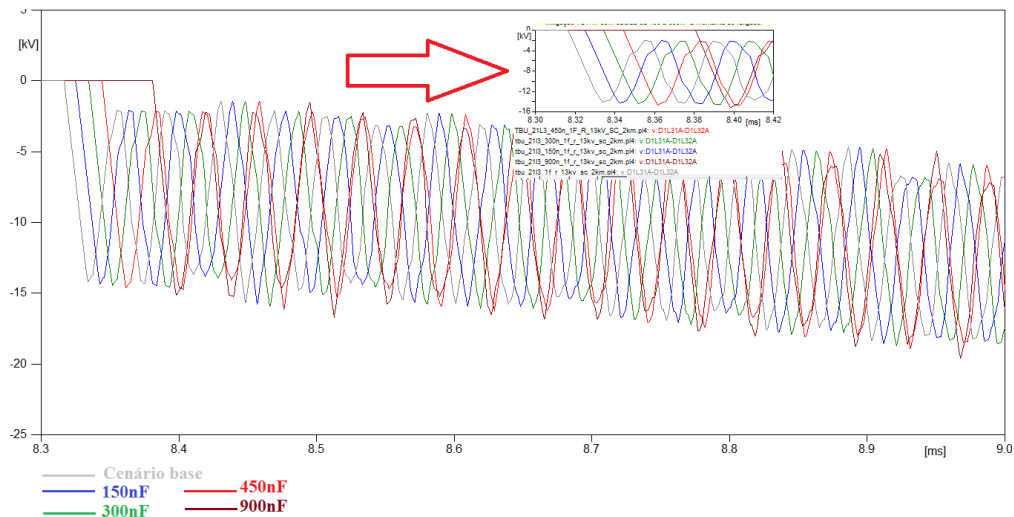


Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Mitigação da TCRT

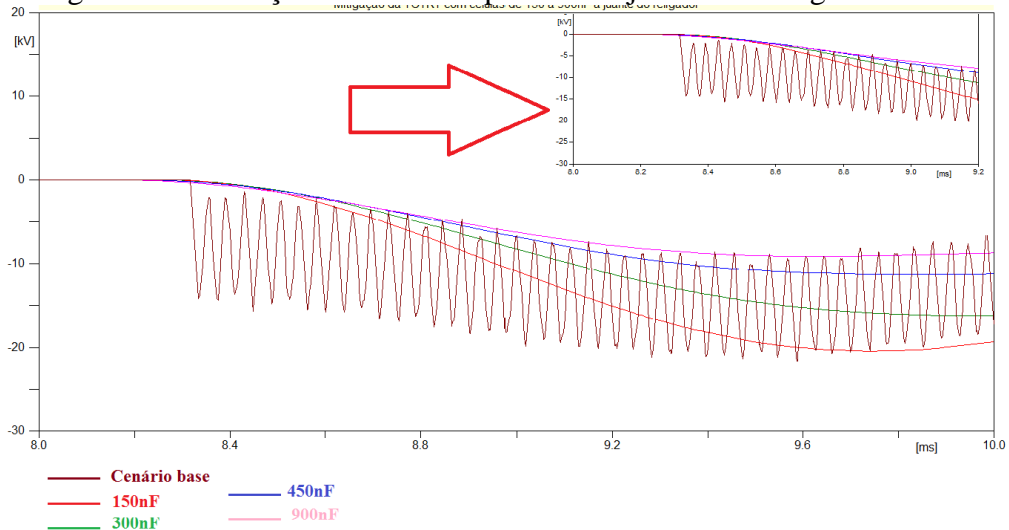
Como alternativa para efetivar a redução da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória, foram averiguados cenários de inserção de células de surto capacitivas de 150, 300, 450 e 900nF no cenário de falta monofásica quilométrica. Os resultados para as células instaladas à montante do religador, ou seja, no terminal conectado ao barramento principal da subestação obtidos para o religador 21L3 estão dispostos na Figura 4.14. Na Figura 4.15 tem-se os resultados da simulação para os capacitores instalados à jusante do religador, no terminal localizado no lado do suprimento da carga, portanto.

Figura 4.14. Inserção de células capacitivas à montante do religador 21L3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.15. Inserção de células capacitivas à jusante do religador 21L3.



Fonte: Autoria própria.

Uma síntese dos resultados obtidos para o religador 21L3 diante do cenário base, do cenário com as células de surtos instaladas à montante e à jusante tendo como base a instalação de células de 150, 300, 450 e 900nF estão dispostas na Tabela 4.4.

Tabela 4.5. Resultado da análise do posicionamento e do número de células capacitivas para redução da TCTRT no religador 21L3.

Localização	Nº de células de 150nF	Simulação		Referência IEC		Religador superado?
		E_2 (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	E_2 (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	
Caso base	--	21,60	1,38	18,90	0,61	Sim
À montante do religador	1	20,43	1,12	18,90	0,61	Sim
	2	21,20	1,35	18,90	0,61	Sim
	3	20,16	1,79	18,90	0,61	Sim
	6	21,80	1,37	18,90	0,61	Sim
À jusante do religador	1	20,39	0,22	18,90	0,61	Sim
	3	17,24	0,25	18,90	0,61	Não
	4	15,73	0,31	18,90	0,61	Não
	6	18,45	0,32	18,90	0,61	Não

Diante dos dois cenários de conexão das células de surto: à montante e à jusante, constatou-se que quando a instalação é feita na primeira localização, não há efetiva redução na taxa de crescimento da TRT em cenário de falta monofásica quilométrica enquanto que, no segundo *layout*, houve redução da TCTRT e, portanto, possibilidade de abertura segura do equipamento a partir da instalação mínima de 300nF.

Vale destacar que a localização das células de surto é recomendada em concordância com o cenário de superação sob análise. Em ocasiões de falta trifásica não aterrada, a instalação ocorre nos pólos localizados à montante do equipamento. No cenário analisado, como o lado da fonte apresenta uma frequência de oscilação muito inferior ao espectro do lado da carga, era esperado que não houvesse relevância suficiente para mitigação da TCTRT.

Foi constatado também a mitigação do pico da TRT a limites aceitáveis, entretanto, dentro de uma faixa de segurança de 8,7; 16,7 e 2,3% para, respectivamente, os casos de 2, 3 e 6 células de surto capacitivas de 150nF instaladas à jusantes do religador em cenário de falta quilométrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram efetivados estudos que aspiraram a compreensão dos requisitos de proteção de disjuntores e religadores quanto à TRT, além de analisar meios para atenuação do valor de pico e da taxa de crescimento. Após a compreensão das especificações dos equipamentos analisados e explanação sobre a TRT, foram realizados estudos e simulações através do ATP, sendo apresentadas e propostas medidas de mitigação.

Na SE sob estudo, no que se refere à falta trifásica não aterrada, o diagnóstico dos religadores apontou que estes equipamentos se mostraram dentro dos limites de segurança estabelecidos por norma com exceção do religador 21L2 que, assim como o disjuntor 11B1, apresentou problemas relacionados à tensão disruptiva do meio de extinção do arco elétrico, ultrapassando o valor de pico exigido pela envoltória normativa.

Na análise dos religadores, no que se refere à eliminação de falta monofásica quilométrica, os equipamentos se mostraram superados pelo valor de pico da TRT. Esta é uma verificação importante para o perfil do sistema analisado (equipamentos conectados a um transformador e com várias linhas de saída da subestação), uma vez que é mais comum a superação por pico em falta trifásica não aterrada.

Foi constatada, ainda, a superação da taxa de crescimento (TCTRT). Como medida de mitigação, a instalação de células de surto capacitivas é recomendada à jusante do equipamento, mais próximo do terminal conectado à saída do ramal de distribuição, o que permite atenuar as variações de tensão provocadas pelas ondas viajantes de alta frequência na linha. Em decorrência, constatou-se a redução da componente de tensão vista dos terminais dos religadores.

Ainda com relação ao cenário descrito, tendo em vista a distribuição das células de surto capacitivas nos terminais do religador no lado da carga, há possibilidade de abertura segura a partir da instalação de células cuja associação ou valor individual se estabeleça a partir de 300nF.

6 TRABALHOS FUTUROS

Em função do espaço de tempo e da complexidade do tema até a conclusão deste trabalho, recomenda-se para trabalhos futuros a incorporação da geração distribuída no sistema a partir, por exemplo, da inserção do parque eólico ao sub-regional analisado.

Por fim, sugere-se também a análise do disjuntor 11B2 e dos religadores 21L6 e 21L7 que compõe o restante da subestação sob estudo.

7 REFERÊNCIAS

ALAWIE, M.; FILION, Y.; COUTU, A. **Impact of High Voltage Shunt Capacitor Banks on General Purpose Circuit Breakers.** Disponível em <https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2011/11IPST111.pdf>. Acesso em 08 set. 2022.

AMON FILHO, J.; PEREIRA, M.P. Novos Desenvolvimentos dos Programas ATP/EMTP e ATPDraw. São Paulo: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2001.

AZEVÊDO, W. V. S. *et al.* Efeitos da Representação de Equivalentes de Redes Elétricas em Análises de TRT: Estudo de Casos. In: **Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VIII CBQEE)**. 2009.

AZEVÊDO, W.V.S *et al.* **REDUÇÃO DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA: Discussão de medidas e avanços.** Disponível em: <<https://docplayer.com.br/37791125-Reducao-de-tensao-de-restabelecimento-transitoria-discussao-de-medidas-e-avancos.html>>. Acesso em 23 mai. 2021.

AZEVÊDO, W.V.S. **Contribuições para análise e redução de tensão de restabelecimento transitória.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFCG, Campina Grande, 2010.

BIANCO, F.A.F.; Martinez M.L.B. **Análise dos estudos de tensão de restabelecimento transitória em subestações de 13,8 kV.** Florianópolis: XII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1995.

CARVALHO, A.C.C. *et al.* **A teoria do arco elétrico nos disjuntores de alta tensão.** In: FRONTIN, S.O.; MORAIS, S.A. Disjuntores e chaves: Aplicação em sistemas de potência. 1^oed. EDUF Editora, Niterói, 1995.

CAVALCANTI, R, R, G. **Influência do arco elétrico em disjuntores para estudos de tensão de restabelecimento transitória.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFCG, Campina Grande, 2010.

COLOMBO, Roberto. Disjuntores de alta tensão. [S. l.]: Nobel: Siemens SA, 1988.

DUARTE, L. H. S. *et al.* **Experiência da CEMIG na análise de tensões de restabelecimento transitórias associadas às faltas alimentadas por transformadores.** XIX SNPTEE. Rio de Janeiro: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007.

DUAILIBE P. Consultoria para Uso Eficiente de Energia. Novembro de 1999. Notas de aula. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOU DA FONSECA.

DUFOURNET, D.; MONTILLET, G. F. **Harmonization of TRVs in ANSI/ IEEE and IEC Standards for High-voltage Circuit Breakers Rated Less than 100 kV**. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.

EATON. Religadores: fundamentos de religadores Powering Business Worldwide. Disponível em: <<https://www.eaton.com/br/pt-br/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/reclosers/reclosers--fundamentals-of-reclosers.html>>. Acesso em: 06, set. 2022

FILIPOVIĆ-GRBIĆ, UGLEŠIĆ, FILIPOVIĆ-GRBIĆ. **Analysis of Transient Recovery Voltage in 400 kV SF6 Circuit Breaker Due to Transmission Line Faults**. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 6, N. 5. 2011.

FONSECA, A.T.; FONSECA, R. A. **Falha em disjuntor a vácuo durante manobra de banco de capacitores do CER da SE Ouro Preto 2(CEMIG)**. Recife: XII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1993.

FRONTIN, S. O. *et al.* Equipamentos de Alta Tensão Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 1º ed. Rio de Janeiro: p. 532-551. 2013.

Guia Resumido do ATP – Alternative Transient Program. Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~crisina/pos%20graduacao/GUIA.ATP.pdf>>. Acesso em 27 abril 2022.

GLOVER, J. Duncan; OVERBYE, Thomas; SARMA, Mulukutla S. Power System Analysis & Design. Cengage Learning, 2017.

IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controlgear: Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers. 1.2º.ed. 2016.

HEWITSON, Leslie; BROWN, Mark, BALAKRISHNAN, Ramesh. Practical Power System Protection. Elsevier Science, 2004.

HEUNMILLER W. G., *et al.*, Transient Recovery Voltage Failures Of Two 15 Kv Indoor Oilless Circuit Breakers. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. Vol. PAS-102, No. 8. p. (2578-2884), agosto, 1983.

LIMA, R T. **Desenvolvimento de Software para Medição dos Tempos de Operação Durante Ensaios em Disjuntores de Alta Tensão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UNIFEI, Itajubá, 2010.

MAMEDE FILHO, J. -Manual de equipamentos elétricos- Volume 1, 2ª ed. - Rio de Janeiro: LTC, 1994.

MAMEDE FILHO, J. - Manual de equipamentos elétricos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2005.

MAMEDE FILHO, J. Manual de equipamentos elétricos - 5 ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2019.

MELO, L. G. B. **Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória: Avaliação e Medidas Mitigadoras.** Orientador: Damásio Fernandes Júnior. 2010. 54 p. TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2010.

NOBRE, D. M.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A. "An Alternative to Reduce Medium- Voltage Transients Recovery Voltage Peaks". **International Conference on Power Systems Transients**, 2001.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede: Submódulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos**, Resolução 825/2018.

PORTO, B.P.S. **Uma Breve Introdução A Teoria E Ensaios Básicos Em Laboratório.** Orientador: Tarso Vilela Ferreira. 2009. 32 p. TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2009.

RAHIMOV *et al.* **Effect of Additional Capacities on Transients Recovery Voltage in the Short – Line – Fault Regime.** Disponível em <https://www.researchgate.net/profile/Rahimov-Jamshed/publication/361108822_Effect_of_Additional_Capacities_on_Transients_Recovery_Voltage_in_the_Short_Line_Fault_Regime/links/629dbcb4c660ab61f866db90/Effect-of-Additional-Capacities-on-Transients-Recovery-Voltage-in-the-Short-Line-Fault-Regime.pdf>. Acesso em 19 set. 2022.

ROMAGNOLE. Aplicações de Religadores Automáticos. Disponível em: <<https://www.romagnole.com.br/noticias/aplicacoes-de-religadores-automaticos/>>. Acesso em: 06, set. 2022.

SAMPAIO A. L. P. **Consolidação De Material Didático Para A Disciplina De Equipamentos Elétricos – Disjuntores**. Orientador: Jorge Nemésio Sousa. 2012. 123 p. TCC - Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro. 2012.

SF6 MEASUREMENTE GUIDE. Disponível em: <http://anaissnptee.cigre.com.br/arquivos/arquivos/XXIII_SNPTEE_GMI%2023.pdf>. Acesso em 21 maio 2021.

SMEETS, R. P. P; VAN DER LINDEN, W. A. Current-zero measurements of vacuum circuit breakers interrupting short-line faults. **IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE**, Holanda, vol. 31, Nº. 5, p. (852-858), outubro, 2003. Disponível em: <<https://pure.tue.nl/ws/files/2284946/Metis168289.pdf>>. Acesso em 29, set. 2022.

SMITH, R. K. **Tests Show Ability Of Vacuum Circuit Breaker To Interrupt Fast Transient Recovery Voltage Rates Of Rise Of Transformer Secondary**. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20100215115813id_/http://metalab.uniten.edu.my:80/~farrukh/vcb/sluggish/trv.pdf>. Acesso em 21/09/2022.

SOARES, R. M. *et al.* **Estudo de adequabilidade de disjuntores de Média e Alta tensão devido às solicitações de TRT e de surtos decorrentes de manobras em banco de capacitores**. Fundação Parque tecnológico da Paraíba, 2010.

WHITAKER, J. C. **AC Power Systems Handbook**. 2nd Ed., Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 1999.

YU, *et al.* **Static Voltage Sharing Design of a Sextuple-Break 363 kV Vacuum Circuit Breaker**. [S. I], 2010. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/13/2512/htm>>. Acesso em 29, set. 2022.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência** - São Paulo: Edusp, 2003.