

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Projeto de Engenharia Elétrica

Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória: Avaliação e Medidas Mitigadoras

Luiz Gianini Bezerra de Melo

Campina Grande, outubro de 2010.

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Projeto de Engenharia Elétrica

**Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória:
Avaliação e Medidas Mitigadoras**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da
UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenheiro Eletricista.*

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientador

Campina Grande, outubro de 2010.

Luiz Gianini Bezerra de Melo

Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória: Avaliação e Medidas Mitigadoras

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da
UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenheiro Eletricista.*

Aprovado em _____ de _____ 2010.

Banca Examinadora

Orientador: Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Examinador:

Agradecimentos

Agradeço a toda minha família, especialmente aos meus pais, Lamarck Bezerra de Melo e Eleny Gianini, por todos os princípios éticos e de caráter que me foram ensinados, pela educação que me foi dada, dedicação, companheirismo e amor que nunca me faltaram. A meu grande irmão Artur, um grande orgulho para mim, que a cada dia vejo como um exemplo a ser seguido.

A todos os meus verdadeiros amigos que estiveram comigo nos momentos bons e ruins que passamos ao longo da graduação, principalmente a Ângelo, Antônio Alberto, Flávio, Huno, Rodrigo, Saulo e Frederico. Todos contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos professores Washington Neves e Damásio Fernandes, pelos conhecimentos passados, orientação e a inestimável oportunidade que me foi dada. Ao amigo Wilker Azevêdo, por toda a disponibilidade em me ajudar na realização deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica, pela excelência do ensino que me foi passado, contribuindo de forma significativa para meu aprendizado acadêmico, possibilitando realizar o sonho de me tornar engenheiro eletricitista.

Sumário

Agradecimentos.....	IV
Lista de Figuras.....	VII
Lista de Tabelas	X
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
2. Tensão de Restabelecimento Transitória	3
2.1. Considerações Preliminares.....	3
2.2. Tipos de Faltas Avaliadas.....	4
2.2.1. Faltas Quilométricas.....	4
2.2.2. Faltas Trifásicas não Aterradas	5
2.3. Especificações Técnicas	7
2.3.1. IEC 62271-100 (2006)	7
2.3.2. Normas ANSI.....	10
2.3.3. Normas IEEE	12
2.4. Aferição.....	13
3. Representação da Rede Elétrica.....	14
3.1. Plataforma EMTP.....	14
3.2. Modelagem de Componentes	14
3.2.1. Linhas de Transmissão.....	14
3.2.2. Cabos.....	14
3.2.3. Cargas.....	15
3.2.4. Bancos de Capacitores	15
3.2.5. Transformadores	16
3.2.6. Disjuntores e Chaves.....	17

3.3. Equivalentes de Rede.....	17
4. Mitigação da TRT.....	19
4.1. Redução da TCTR.....	19
4.2. Redução do Pico da TRT.....	20
4.2.1. Dispositivo Limitador da TRT	21
5. Estudo da TRT no Sistema Piloto	24
5.1. Sistema Piloto	24
5.2. Representação da Rede Teste	27
5.3. Avaliação dos Equipamentos	28
5.3.1. Eliminação de Falta Trifásica Não Aterrada.....	29
5.3.2. Eliminação de Falta Quilométrica.....	32
5.4. Medidas Mitigadoras	34
5.4.1. Instalação de Células Capacitivas	34
5.4.2. Utilização de Varistores de ZnO	35
6. Conclusões	40
Bibliografia	41

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Redes elétricas conectadas através de disjuntor.	3
Figura 2.2 – Extinção da corrente de falta e surgimento da TRT.	3
Figura 2.3 – Característica da TRT para faltas quilométricas.	5
Figura 2.4 – Característica da TRT para faltas trifásicas não aterradas.	6
Figura 2.5 – Circuito simplificado para análise de TRT oscilatória.	6
Figura 2.6 – Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC.	8
Figura 2.7 – Circuito simplificado para análise do fator de primeiro pólo.	9
Figura 2.8 – Forma característica da TRT de referência da norma ANSI para disjuntores de classe igual ou inferior a 72,5 kV.	10
Figura 2.9 – Representação da TRT presumida por dois parâmetros.	13
Figura 3.1 – Representação de cabos curtos (<100 m): modelo PI a parâmetros concentrados.	14
Figura 3.2 – Modelo RL série utilizado para representação de cargas no sistema.	15
Figura 3.3 – Modelo utilizado para representar um capacitor.	15
Figura 3.4 – Representação dos transformadores de potência.	16
Figura 3.5 – Sistema de potência com suas redes e fronteiras.	17
Figura 3.6 – Recomendação do CCON para delimitação de redes.	18
Figura 3.7 – Recomendação do ONS para delimitação de redes.	18
Figura 3.8 – Efeito do comprimento da rede simulada na forma de onda da TRT.	19
Figura 4.1 – Efeito das células capacitivas nos terminais do disjuntor sobre a frequência da TRT.	20
Figura 4.2 – Localização das células de surto para redução da TCTRT.	20
Figura 4.3 – Característica V-I não-linear típica de um varistor de ZnO.	21
Figura 4.4 – Arranjo para limitação do pico da TRT com dispositivo a varistores de ZnO.	22
Figura 5.1 – Diagrama simplificado das seccionais João Pessoa e Mangabeira do sistema Energisa-PB.	24
Figura 5.2 – Unifilar do setor de 69 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).	25
Figura 5.3 – Unifilar do setor de 13,8 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).	25

Figura 5.4 – Unifilar do setor de 69 kV da subestação João Pessoa (JPS).....	26
Figura 5.5 – Unifilar do setor de 13,8 kV da subestação João Pessoa (JPS).....	27
Figura 5.6 – Formas de onda para a TRT nas três fases do religador 21L1 da SE CPX sob falta trifásica não aterrada.	29
Figura 5.7 – Formas de onda para a corrente nas três fases do religador 21L1 da SE CPX sob falta trifásica não aterrada.....	29
Figura 5.8 – TRT presumida e especificada na fase B do religador 21L1 da SE CPX.	30
Figura 5.9 – Formas de onda para a TRT nas três fases do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.	30
Figura 5.10 – Formas de onda para a corrente nas três fases do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.	31
Figura 5.11 – TRT presumida e especificada na fase B do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.	31
Figura 5.12 – TRT presumida e especificada na fase A do religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.	32
Figura 5.13 – Detalhe da TRT presumida e especificada na fase A do religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.....	32
Figura 5.14 – TRT presumida e especificada na fase A do religador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.	33
Figura 5.15 – Detalhe da TRT presumida e especificada na fase A do religador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.	33
Figura 5.16 – Efeito na TRT após inserção de células capacitivas à jusante do religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.	34
Figura 5.17 – Efeito na TRT após inserção de células capacitivas à jusante do religador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.	35
Figura 5.18 – Efeito na TRT após inserção de células varistoras de ZnO em paralelo ao religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.	36
Figura 5.19 – Efeito na TRT após inserção de células varistoras de ZnO em paralelo ao religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.....	36
Figura 5.20 – Efeito na TRT após inserção de células varistoras de ZnO em paralelo ao religador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.	37
Figura 5.21 – Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com o Religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada.	38

Figura 5.22 – Corrente no dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com o Religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada. 39

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Fator de amplitude k_{af} para disjuntores de classe inferior a 100 kV. .	9
Tabela 2.2. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas.....	10
Tabela 2.3 – Parâmetros de referência da norma ANSI para TRT especificada de equipamentos de classe 15 kV.....	11
Tabela 2.4 – Valores padrões da norma ANSI para parametrização das envoltórias da TRT especificada no escopo de faltas trifásicas não aterradas.	12
Tabela 4.1 – Característica técnicas dos elementos varistores a base de ZnO. ..	22
Tabela 4.2 – Característica V-I para dispositivo limitador com 3 e 4 pastilhas varistoras de em série.	23
Tabela 5.1 – Parâmetros de referência da TRT especificada para equipamentos de classe 15 kV – norma ANSI C37.06.....	28
Tabela 5.2 – Síntese dos resultados obtidos para os religadores submetidos a falta quilométrica.....	33
Tabela 5.3 – Resultados obtidos após inserção de células capacitivas à jusante dos religadores 21L1 (CPX) e 21L6 (TBU) sob falta quilométrica.	35
Tabela 5.4 – Resultados obtidos após inserção de pastilhas de ZnO em paralelo aos religadores 21L1 (CPX) e 21L6 (TBU).	37

1.Introdução

1.1. Motivação

A crescente expansão dos sistemas elétricos interligados vem a fomentar a análise das conseqüências que as operações de chaveamento, e mudança da topologia da rede, trazem no âmbito dos estudos de transitórios eletromagnéticos. É imprescindível que, para a operação confiável de todo sistema, seja feita uma avaliação no contexto das sobretensões de manobra de disjuntores e religadores por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), evidenciando os requisitos impostos a estes equipamentos frente à nova configuração da rede.

A utilização de plataformas de simulações digitais de fenômenos eletromagnéticos do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) para analisar o sistema, na busca por maior confiabilidade no diagnóstico da TRT, traz consigo uma exigência ininterrupta do aprimoramento dos modelos e técnicas utilizadas, minimizando os gastos financeiros consequentes do mau dimensionamento dos mesmos.

Além disso, é de suma importância a avaliação dos equipamentos seccionadores frente à TRT visando sua integridade durante a eliminação de faltas na rede elétrica. Para a superação térmica do meio extintor, quando a taxa de crescimento da TRT ultrapassa o limite estabelecido por norma, normalmente é recomendada a instalação de células capacitivas visando reduzir a frequência de oscilação da TRT (Colclaser *et al*, 1971). Geralmente a substituição do equipamento por outro de classe de tensão superior é indicada quando este se encontra superado pelo valor de pico da TRT, levando o meio de extinção a estresses dielétricos elevados. Alternativas para redução do valor de pico utilizando dispositivos de óxido de zinco (ZnO) foram sugeridas por estudos recentes (Nobre *et al*, 2001).

Ainda como motivação, este trabalho se insere em pesquisas do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) financiado pela ENERGISA.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar a adequabilidade de dois religadores de classe 15 kV encontrados em subestações do Regional Mussuré II da ENERGISA (PB) quanto às solicitações de TRT que lhes são impostas.

São eles o Religador 21L1 da Subestação Cruz do Peixe (CPX) e o Religador 21L6 da Subestação Tambaú (TBU), que por meio de simulações digitais realizadas com o programa ATP (*Alternative Transients Program*), foram analisados em relação a aspectos como redução da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (TCTRT), utilizando células capacitivas, mitigação do valor de pico da TRT com a instalação de dispositivos varistores de ZnO, estando os equipamentos submetidos a supressão de faltas trifásicas não aterradas e faltas monofásicas quilométricas.

2. Tensão de Restabelecimento Transitória

2.1. Considerações Preliminares

Durante o processo de eliminação de faltas no sistema elétrico, no momento em que a corrente é interrompida, as duas redes separadas redistribuem sua energia adequando-se ao novo estado elétrico. A Figura 2.1 ilustra a separação das duas redes conectadas através de disjuntor no sistema elétrico.

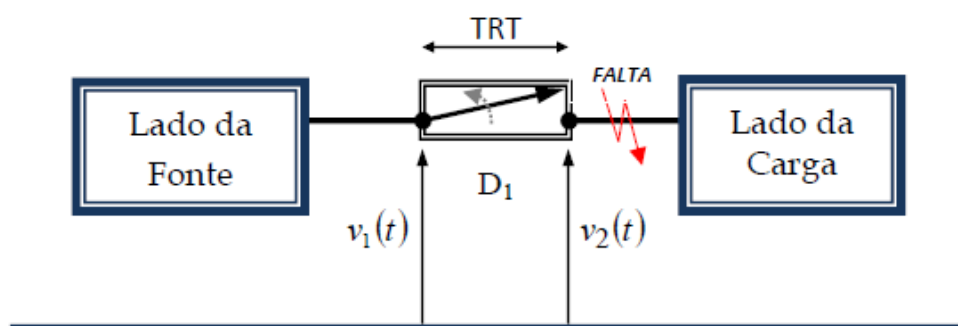


Figura 2.1 – Redes elétricas conectadas através de disjuntor.

Como resultado, a tensão que surge entre os pólos do disjuntor apresentará oscilações transitórias de acordo com a frequência natural do sistema até que o regime estacionário seja atingido. Essa componente transitória é chamada de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), ilustrada na Figura 2.2.

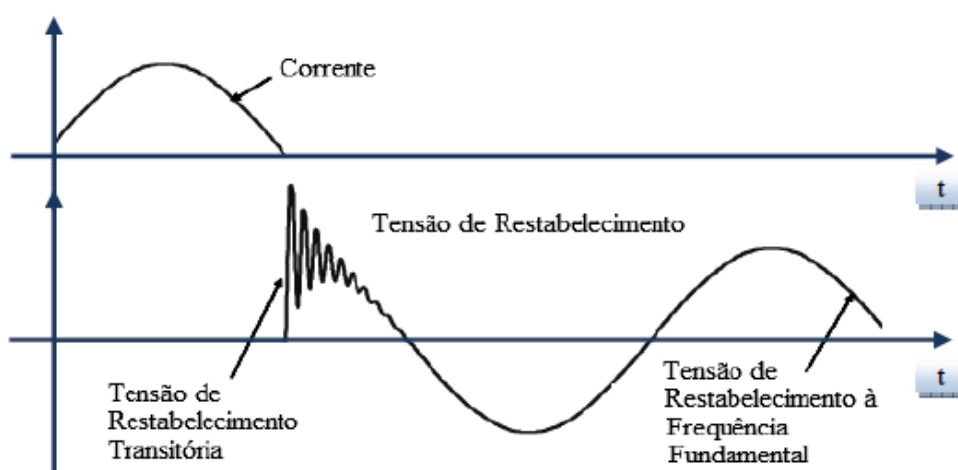


Figura 2.2 – Extinção da corrente de falta e surgimento da TRT.

Durante o período inicial que precede a separação mecânica dos contatos, a solicitação térmica na câmara de extinção do disjuntor é de grande severidade. Após a

extinção da corrente, os mecanismos internos tentam recuperar as características do meio de interrupção de um estado anterior de bom condutor para um outro estado com atributos de bom dielétrico, ao passo que, concomitantemente, a solicitação de tensão entre os contatos atua de forma contrária, podendo provocar a reignição do arco ou disrupção do meio. Se o meio não se recuperar mais rapidamente que a TRT, o arco é restabelecido, outro meio ciclo de corrente ocorre, e o processo de interrupção é mais uma vez tentado até que a interrupção ocorra ou haja a falha do disjuntor (Swindler *et al*, 1997).

O processo de reignição ocorre pelo fato de que durante os primeiros micro segundos após a extinção do arco, o meio de interrupção ainda apresenta uma condutância relativamente alta, de forma que se a TRT apresentar uma alta taxa de crescimento durante esse instante, a corrente pode ser suficiente para aquecer a coluna do arco e restaurar a condução, se o aquecimento exceder a capacidade de remover calor e resfriar o arco da câmara de extinção (Swindler *et al*, 1997).

A disrupção ocorre pela superação dielétrica do meio e pode acontecer a qualquer momento no ciclo de TRT, embora seja usualmente mais freqüente nas dezenas a centenas de micro segundos do ciclo, quando a TRT apresenta uma amplitude suficientemente alta (Swindler *et al*, 1997).

Desta forma, o disjuntor pode ser superado tanto por taxa de crescimento (reignição do arco) quanto por amplitude da TRT (disrupção do meio).

2.2. Tipos de Faltas Avaliadas

Avaliando os efeitos dos diferentes tipos de falta sobre a TRT presumida, em face das severas solicitações térmicas e dielétricas que provocam no meio de extinção do arco elétrico, faltas monofásicas quilométricas e faltas trifásicas não aterradas são recomendadas pelas normas de referência (IEC 62271-100, 2007; ANSI/IEEE C37.011, 2005) para análise da suportabilidade dos equipamentos face à TRT.

2.2.1. Faltas Quilométricas

Faltas monofásicas quilométricas são curto-circuitos localizados em linhas de transmissão a alguns quilômetros (ℓ) dos equipamentos seccionadores, como ilustra Figura 2.3a. A forma de onda da TRT, neste caso, apresenta geralmente uma característica do tipo dente de serra (Figura 2.3b), devido à componente $v_2(t)$ do lado da linha, com freqüência superior ao correspondente espectro da componente $v_1(t)$ do lado

da fonte, que geralmente é da forma exponencial-cosseno, podendo ser do tipo um menos cosseno dependendo do sistema considerado.

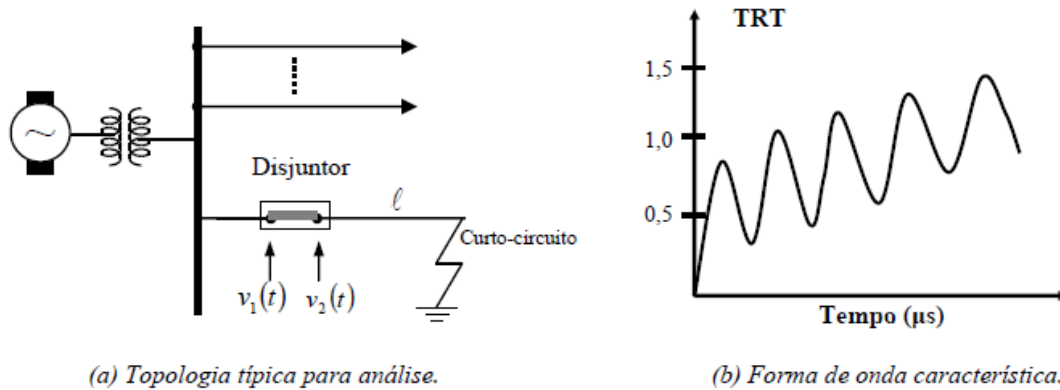


Figura 2.3 – Característica da TRT para faltas quilométricas.

Este tipo de falta apresenta um alto gradiente de TRT nos primeiros microssegundos ($<100 \mu\text{s}$) que sucedem a separação física dos pólos do disjuntor, proporcionando considerável elevação térmica ao meio de extinção do arco, ocasionando em uma maior possibilidade de ruptura durante aproximadamente os $10 \mu\text{s}$ após a interrupção da corrente, período em que o equilíbrio térmico ainda não tem sido restabelecido (Garzon, 1997).

A distância do ponto em que ocorre a falta até o disjuntor em que a TCTRT é mais severa não apresenta um perfil linear, desta forma, normalmente são avaliados diversos locais de falta (entre 1 e 5 km) ao longo da linha à jusante do equipamento seccionador.

2.2.2. Faltas Trifásicas não Aterradas

Faltas trifásicas não aterradas nos terminais dos equipamentos incidem nas maiores solicitações dielétricas ao meio de extinção do arco, apresentando um valor de pico da TRT superior ao caso das faltas quilométricas. Neste caso, dá-se maior atenção durante o restabelecimento dielétrico do meio no intervalo de tempo de aproximadamente $20 \mu\text{s}$ a 1 ms após a interrupção da corrente (Garzon, 1997).

No caso de existirem transformadores adjacentes ao equipamento seccionador e não se constatarem linhas de transmissão ou cabos conectados na barra sob falta, como mostra Figura 2.4a, a TRT apresenta uma característica oscilatória ilustrada na Figura 2.4b (Colclaser *et al*, 1976).

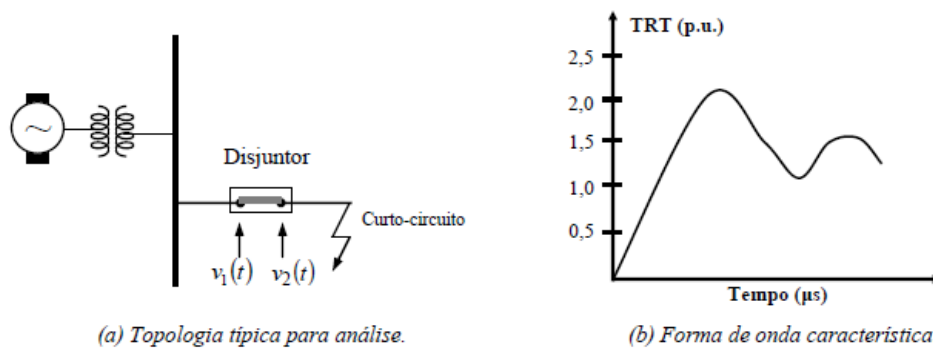


Figura 2.4 – Característica da TRT para faltas trifásicas não aterradas.

Considerando o circuito simplificado da Figura 2.5, algumas considerações podem ser tomadas quanto ao perfil da TRT após a eliminação da falta terminal pelo disjuntor.

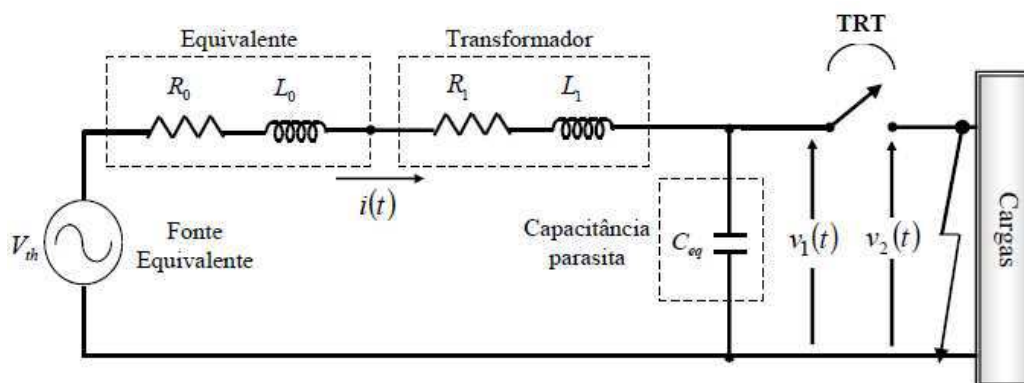


Figura 2.5 – Circuito simplificado para análise de TRT oscilatória.

Uma vez que a tensão $v_2(t)$ no lado da carga é nula, a TRT neste caso equivale à tensão V_c sob a capacitância parasita C_{eq} , oriunda dos cabos, buchas do transformador e do próprio disjuntor. Considerando $R_{eq} = R_o + R_1$ e $L_{eq} = L_o + L_1$ e admitindo-se o perfil de tensão senoidal $V_{th} = V_m \text{sen}(\omega t)$ da fonte equivalente, a soma das tensões no circuito fornece:

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{R_{eq}}{L_{eq}} \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{L_{eq} C_{eq}} = \frac{V_m \text{sen}(\omega t)}{L_{eq} C_{eq}} \quad (1)$$

Se as reflexões nos pontos de descontinuidade da rede forem desprezíveis perante a TRT, a solução da equação apresentará a seguinte forma a depender das características do circuito:

- Oscilatória, para $R_{eq} > \sqrt{L_{eq}/4C_{eq}}$;

- Exponencial, para $R_{eq} \leq \sqrt{L_{eq}/4C_{eq}}$.

Desprezando as perdas no circuito e seu efeito de amortecimento para o caso de $R_{eq} = 0$, a TRT entre os contatos do disjuntor será:

$$V_{TRT}(t) = V_C(t) = V_m \omega_o^2 \left(\frac{\cos \omega t - \cos \omega_o t}{\omega_o^2 - \omega^2} \right), \quad (2)$$

em que $\omega_o = 1/\sqrt{L_{eq}C_{eq}}$ é a frequência natural de oscilação do circuito.

Como normalmente $\omega_o \gg \omega$, e a defasagem angular ωt tende a zero pelo fato da análise da se dar na ordem dos microssegundos, obtém-se a forma aproximada da TRT dada por:

$$V_{TRT}(t) = V_C(t) = V_m (1 - \cos \omega_o t). \quad (3)$$

Pelo que foi anteriormente exposto, pode-se concluir que as características e severidades da TRT são função do tipo e localização da falta, assim como da topologia e carregamento do sistema.

2.3. Especificações Técnicas

As normas técnicas vigentes estabelecem os requisitos específicos para TRT considerando faltas nos terminais do disjuntor ou a pequena distância deles. Faz-se necessária a distinção entre a TRT presumida, devida às características elétricas do sistema e obtida por meio de ensaio ou simulações de curto-circuito, e a TRT especificada, a qual seus parâmetros são considerados como valores de referência.

2.3.1. IEC 62271-100 (2006)

A norma IEC 62271-100 (2006) define duas envoltórias para a TRT especificada:

- Disjuntores de tensão nominal maior ou igual a 100 kV, localizados em pontos do sistema com elevada razão entre corrente de curto-circuito e sua máxima capacidade de interrupção do dispositivo (% CNI), a TRT normalmente apresenta uma alta taxa de crescimento inicialmente, seguido de um período de redução da taxa. Esta envoltória é definida por três segmentos de reta ou quatro parâmetros.

- Disjuntores de tensão nominal menor ou igual a 100 kV, a TRT normalmente apresenta uma componente fundamental acrescida de uma onda oscilatória de frequência única, sendo sua envoltória definida por meio de dois segmentos de reta, especificada pelo método dos dois parâmetros. Também tem sido comumente aplicada para disjuntores com tensão nominal acima de 100 kV cuja relação entre corrente de curto-circuito e capacidade nominal de interrupção seja inferior a 30%.

O método baseia-se em um primeiro segmento de reta que parte da origem e demora um tempo t_3 para atingir o valor de pico da TRT u_c , e um segundo segmento que se mantém constante no mesmo valor, conforme mostrado na Figura 2.6. O segmento de reta definindo um retardo é considerado somente para testes de ensaio. Parte de um ponto correspondente ao retardo nominal (t_d) e se desenvolve paralelamente ao primeiro segmento de reta do traçado de referência da TRT até as coordenadas de tensão (u') (correspondente a um terço do valor de pico u_c) e de tempo t' .

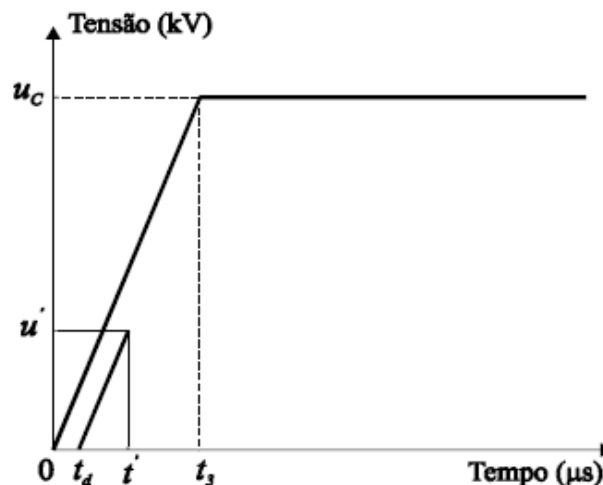


Figura 2.6 – Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC.

Os parâmetros da TRT especificadas são então definidos como função da classe de tensão do disjuntor (u_r), do fator de primeiro pólo (k_{pp}) e do fator de amplitude (k_{af}).

O fator de primeiro pólo k_{pp} é definido como sendo a razão entre a componente fundamental da tensão do primeiro pólo do disjuntor a eliminar a corrente de curto, antes que os outros pólos atuem suprimindo a falta, e seu valor correspondente em regime após a supressão total da falta por todos os pólos do disjuntor.

A norma IEC 62271-100 (2006) considera k_{pp} igual 1,5 e 1,0 para faltas trifásicas não aterradas e faltas quilométricas respectivamente, mostradas na Figura 2.7

(a) e (b). O valor unitário para faltas quilométricas torna-se evidente uma vez que a tensão entre os pólos do disjuntor tem como referência o valor da tensão fase-terra na fase atingida pela falta.

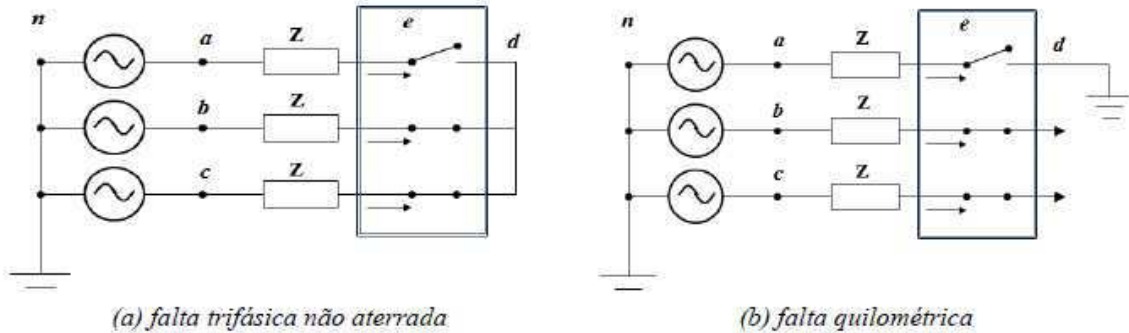


Figura 2.7- Circuito simplificado para análise do fator de primeiro pólo.

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. 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 mesmo. Os valores sugeridos para o k_{af} de acordo com o tipo de falta e %CNI são apresentados na Tabela 2.1, sendo válida apenas para sistemas cujos cabos que conectam disjuntores e equipamentos adjacentes apresentem um comprimento inferior a 100 m (Dufournet e Montillet, 2005).

Tabela 2.1. Fator de amplitude k_{af} para disjuntores de classe inferior a 100 kV.

Tipo da Falta	%CNI	k_{af}
Trifásica não aterrada	100	1,54
	60	1,65
	30	1,74
	10	1,80
Quilométrica	-	1,54

Outro parâmetro que também depende do nível da corrente de curto-circuito é o tempo para alcançar o valor de pico da TRT especificada (t_3), fatores de 0,67 (60% CNI) e 0,40 (10 e 30% CNI) em comparação com o valor especificado para 100% CNI. O valor de pico da TRT especificado por norma é dado por:

$$u_c = k_{pp} \cdot k_{af} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_r \quad (4)$$

Os parâmetros para formação das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas em equipamentos de classe 15,0 e 72,5 kV são exibidos na Tabela 2.2 abaixo.

Tabela 2.2. Parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas não aterradas.

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_3 (μ s)	TCTRT (kV/ μ s)
15	100	1,5	1,54	28,3	31,0	0,91
	60	1,5	1,65	30,3	21,0	1,44
	30	1,5	1,74	30,0	12,5	2,56
	10	1,5	1,80	33,1	12,5	2,67
72,5	100	1,5	1,54	137	93,0	1,47
	60	1,5	1,65	146	62,0	2,35
	30	1,5	1,74	155	37,0	4,19
	10	1,5	1,80	160	37,0	4,32

2.3.2. Normas ANSI

Na atualização da norma ANSI C37.06-1979 do ano 2000 (Kirkland e Dufournet, 2007) são definidas duas envoltórias para a TRT. Para disjuntores localizados em redes aéreas e de classe de tensão menor ou igual a 72,5 kV, representa-se a TRT especificada pela envoltória do tipo (1-cos), tendo o valor de crista da onda E_2 o valor de 1,88 vezes a máxima tensão nominal do disjuntor. A Figura 2.8 ilustra a forma de onda característica da norma ANSI.

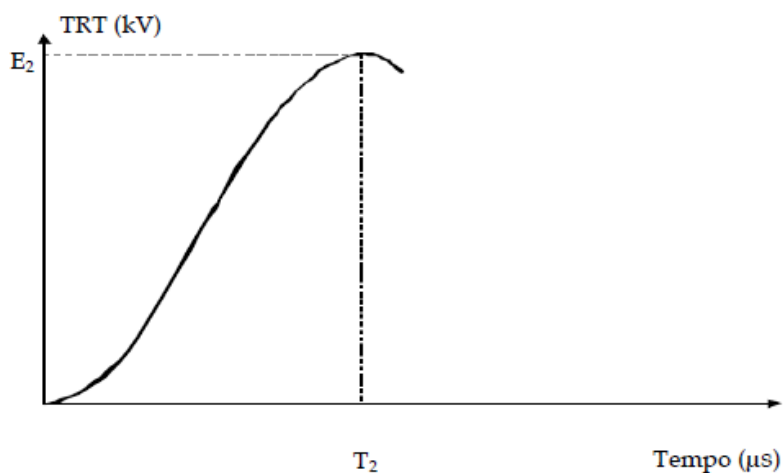


Figura 2.8 – Forma característica da TRT de referência da norma ANSI para disjuntores de classe de tensão igual ou inferior a 72,5 kV.

Para este caso tem-se:

$$V_{TRT}(t) = E_2[1 - \cos(\omega t)], \quad (5)$$

sendo $\omega = \frac{\pi}{T_2}$ a frequência de oscilação da TRT.

O fator multiplicativo de 1,88 no valor de E_2 tem origem nos fatores da equação (5), sendo neste caso o fator de amplitude considerado independente da amplitude da corrente de falta e da capacidade nominal de interrupção do equipamento, de valor constante igual a 1,54. A taxa de crescimento da TRT de referência da norma é obtida não somente pela simples razão direta entre o valor de pico E_2 e o tempo T_2 , existindo neste caso um fator de valor igual a 1,138 representando uma correção referente ao cálculo da tangente da envoltória do tipo (1-cos). A Tabela 2.3 apresenta os parâmetros de referência da TRT especificada para equipamentos de classe 15 kV.

Tabela 2.3 – Parâmetros de referência da norma ANSI para TRT especificada de equipamentos de classe 15 kV.

Tipo da Falta	Valor de pico E_2 (kV)	Tempo de Crista T_2 (μ s)	TCTRT (kV/ μ s)
Trifásica não aterrada	28,2	36,0	0,89
Quilométrica	18,8	36,0	0,59

Com intuito de adequar a parametrização das envoltórias como função da corrente de curto-circuito e da capacidade nominal de interrupção do disjuntor, foram realizadas atualizações na norma a partir do início da última década (ANSI Std C37.06, 2000). Um fator multiplicativo de correção K foi adicionado, e os fatores associados ao tempo para a TRT atingir o valor de pico em função da %CNI correspondem aos apresentados na norma IEC 62271-100. A Tabela 2.4 apresenta os parâmetros associados a alguns disjuntores de classe inferior a 100 kV, para o caso de faltas trifásicas não aterradas.

Tabela 2.4 – Valores padrões da norma ANSI para parametrização das envoltórias da TRT especificada no escopo de faltas trifásicas não aterradas.

Tensão nominal u_r (kV)	% CNI	E_2 (kV) C37.06/1979	Fator K	E_2 (kV) C37.06/2000	Tempo t_3 (μ s)	Tempo corrigido (μ s)	TCTR (kV/ μ s)	
							C37.06 /1979	C37.06 /2000
15	100	28,2	1,00	28,2	36,0	36,0	0,89	0,78
	60	28,2	1,07	30,2	36,0	24,1	0,89	1,24
	30	28,2	1,13	31,9	36,0	14,4	0,89	2,19
	10	28,2	1,17	33,0	36,0	14,4	0,89	2,28
72,5	100	136,0	1,00	136,0	106,0	106,0	1,46	1,46
	60	136,0	1,07	145,5	106,0	71,0	1,46	2,33
	30	136,0	1,13	153,7	106,0	42,4	1,46	4,13
	10	136,0	1,17	159,1	106,0	42,4	1,46	4,27

2.3.3. Normas IEEE

No ano de 2005 o IEEE publicou uma reedição da norma C37.011, constando de atualizações das referências IEEE Std C37.04, ANSI C37.06 e IEEE Std C37.09. De maneira geral, as principais diferenças que servirão como referência para os estudos contidos neste trabalho, foram citadas por Wagner *et al* (2007):

- Para definição das características da TRT especificada utilizam-se as envoltórias da norma IEC;
- Estudo de faltas trifásicas não aterradas em sistemas com tensão igual ou inferior a 72,5 kV, considerando fator de primeiro pólo e de amplitude de acordo com as disposições da norma IEC;
- Atribuição dos fatores de pólo em todas as fases para análise de TRT frente à faltas trifásicas não aterradas.

Nesta norma, o fator de amplitude K_{af} , para definição do valor de pico da TRT, é igual e constante a 1,54 em todos os casos, havendo um fator adicional K_{u_c} dependente da relação da %CNI, e compensa a variação do fator de amplitude conforme a norma IEC propõe. O fator de primeiro pólo K_{pp} é exatamente o mesmo definido pela norma IEC, desta maneira obtém-se o valor de pico da TRT mostrado na equação (6).

$$U_c = \left(K_{pp} K_{af} \sqrt{\frac{2}{3}} V \right) K_{u_c} . \quad (6)$$

Os fatores de referência para o tempo em que a TRT atinge seu pico (t_3) também são os mesmos apresentados na norma IEC. Conclusivamente, para disjuntores de classe inferior a 100 kV, a série C37 da norma IEEE segue requisitos bastante semelhantes aos adotados pela IEC. A menos dos termos utilizados para descrevê-la, as envoltórias da TRT especificadas são idênticas.

Outra premissa é que os valores de TRT definidos por norma não levam em consideração a representação do arco elétrico Wagner *et al* (2007), ou seja, o disjuntor apresenta característica ideal: uma resistência nula quando em condução, e com amplitude tendendo a infinito quando da abertura de seus contatos.

2.4. Aferição

Diante do que foi exposto, os parâmetros representativos da TRT presumida serão as coordenadas dos pontos de interseção dos segmentos de reta que foram a envoltória, t_3 e u_c no caso da envoltória de dois segmentos como mostra a Figura 2.9.

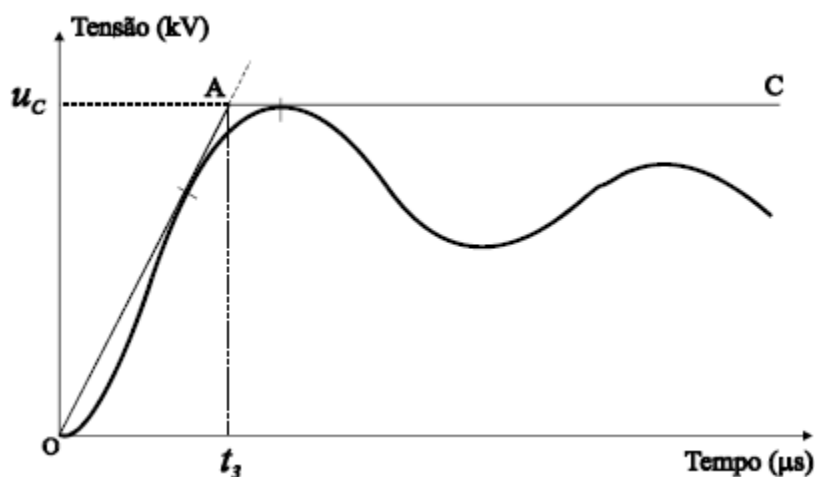


Figura 2.9 – Representação da TRT presumida por dois parâmetros.

O procedimento mais adotado para a análise de superação consiste em comparar em um mesmo gráfico o oscilograma da TRT propriamente dita com a envoltória prevista nas principais normas ou especificada pelo fabricante (valores de referência). Como já discutido, para faltas nos terminais do disjuntor dá-se maior atenção durante o restabelecimento dielétrico do meio, no intervalo de tempo de aproximadamente 20 μs a 1 ms após a interrupção da corrente (Garzon, 1997). Para faltas quilométricas, o meio dielétrico apresenta maior possibilidade de reignição durante seu restabelecimento térmico, verificado nos primeiros 10 μs após a interrupção da corrente, período em que o equilíbrio térmico ainda não tem sido restabelecido (Garzon, 1997).

3. Representação da Rede Elétrica

3.1. Plataforma EMTP

Para realizar toda a modelagem e representação da rede elétrica em estudo, e realizar as simulações dos casos que serão estudados, foi utilizado um software baseado na plataforma EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), o ATP (*Alternative Transients Program*).

3.2. Modelagem de Componentes

Estudos de TRT podem abranger uma faixa de frequência desde a fundamental da tensão da rede em estudo, a até dezenas de kHz, fazendo-se necessário uma representação apropriada de modelos de componentes da rede elétrica tais como linhas de transmissão, cabos, transformadores, cargas, disjuntores, chaves seccionadoras, bancos de capacitores.

3.2.1. Linhas de Transmissão

O modelo a parâmetros distribuídos de Bergeron (Dommel, 1996), apresenta boa precisão no espectro da TRT representando circuitos que não se encontram diretamente ligados ao ramal de alimentação da subestação que se pretende realizar os estudos (Durbak *et al*, 2009). O passo de tempo da simulação deve ser adotado com critério, visando respeitar o tempo de trânsito das ondas que se propagam no circuito de menor comprimento.

3.2.2. Cabos

A grande maioria dos cabos presentes em subestações das redes de distribuição possui comprimento inferior a 100 m, sendo suficiente sua representação por meio do modelo PI a parâmetros concentrados, mostrado na Figura 3.1.

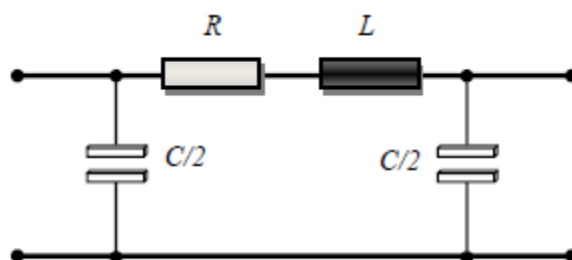


Figura 3.1 – Representação de cabos curtos (< 100m): modelo PI a parâmetros concentrados.

3.2.3. Cargas

Maiores níveis de sobretensão são observados quando se realiza o seccionamento de trechos do sistema elétrico sob o patamar de carga leve (Jones, 1988). O modelo RL série para representação da carga é adotado, pois provoca maior nível de severidade de TRT do que o modelo RL paralelo. Esse fato é decorrente da filtragem de sinais de alta frequência realizado pela reatância do elemento série, fazendo com que se comporte como um circuito aberto para essas componentes de alta frequência, inibindo assim parte das atenuações provocadas pela componente resistiva da carga. O modelo para representação de cargas no sistema é mostrado na Figura 3.2.

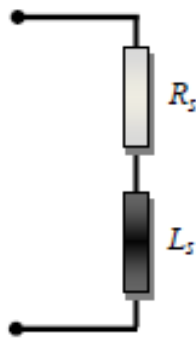


Figura 3.2 – Modelo RL série utilizado para representação de cargas no sistema.

3.2.4. Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores presentes em cada subestação são representados por sua própria capacitância C , indutância L (indutância intrínseca do capacitor devido aos seus fios e eletrodos) e resistência R_p (resistência resultante da resistividade do meio dielétrico, bem como de suas perdas) e R_s (resistência série dos fios, terminações e eletrodos) (Whitaker, 1999), como ilustrado na Figura 3.3.

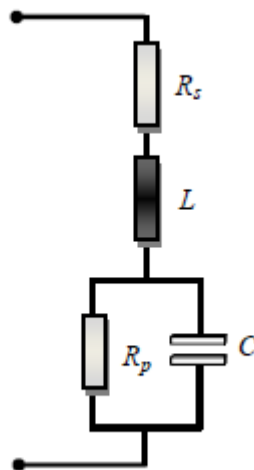


Figura 3.3 – Modelo utilizado para representar um capacitor.

A capacitância C pode ser obtida diretamente através da potência reativa Q nominal do banco e do nível de tensão entre fases V do barramento ao qual se encontra conectado. A indutância L advém do equivalente entre a indutância intrínseca do banco e o reator limitador de corrente, sendo seus valores típicos $5 \mu\text{H}$ e $100 \mu\text{H}$, respectivamente (Zanetta, 2003). As perdas no banco podem ser representadas por um único resistor equivalente R_{ESR} (Whitaker, 1999), e seu valor é da ordem de $0,44 \text{ W/kVAr}$ (D’Ajuz et al, 1987). A modelagem completa é fundamental para avaliar com maior eficácia os cenários de operação, sob condições em que as margens de segurança relativa ao pico e taxa de crescimento de TRT se encontram reduzidas a abaixo de 10% (Azevêdo, 2010).

3.2.5. Transformadores

Transformadores podem ser modelados basicamente dispondo-se das resistências e indutâncias no lado de baixa (R_L e L_L) e no de alta (R_H e L_H) sem acoplamentos entre fases, e das capacitâncias intrínsecas dos enrolamentos e buchas tanto para cada lado do transformador (C_L e C_H), quanto para a de capacitância de transferência entre as buchas do primário e secundário (C_{HL}), as quais são relevantes para transitórios com espectro de frequência de dezenas de kHz. A Figura 3.4 mostra a o modelo adotado para representação de transformadores de potência.

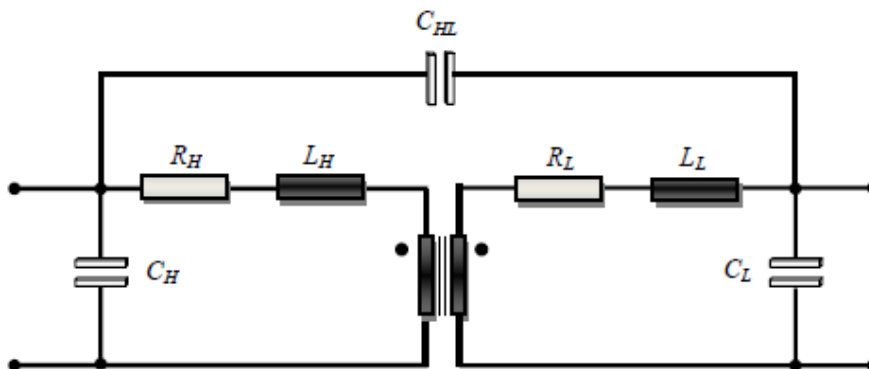


Figura 3.4 – Representação dos transformadores de potência.

As capacitâncias *shunt* incorrem nas respectivas frequências naturais de oscilação do circuito ligado ao primário e secundário do transformador (Wang *et al*, 2005). A capacitância de transferência representa o caminho de propagação do surto entre o lado de alta e de baixa tensão do mesmo (Durbak *et al*, 2009).

Para estudos de TRT, a característica própria de saturação do núcleo dos transformadores pode ser dispensada (Nobre, 1999), pois embora haja uma elevação nos

níveis de corrente antes da abertura dos contatos do disjuntor para suprimir a falta, os transformadores não operarão em saturação.

3.2.6. Disjuntores e Chaves

São modelados simplesmente como chaves controladas no tempo, sem a representação do arco elétrico (IEEE Std C37.011, 1995; IEC 62271-100, 2006). Desta forma, os disjuntores e chaves são modelados como um elemento ideal, apresentando impedância nula ao estar conduzindo, e infinita instantaneamente quando da abertura de seus contatos. As capacitâncias concentradas em cada lado dos dispositivos podem ser representadas.

3.3. Equivalentes de Rede

Para a realização de simulações dos fenômenos transitórios em sistemas de potência por meio de *softwares*, faz-se necessário representar em detalhes apenas o subsistema em foco (rede interna e fronteiras), já o restante do sistema (rede externa) representa-se por meio de equivalentes.

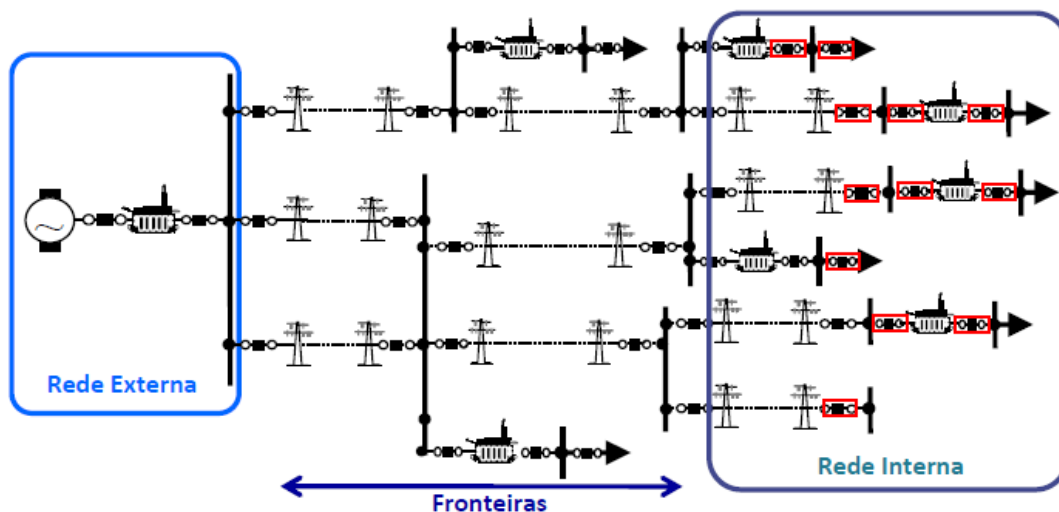


Figura 3.5 – Sistema de potência com suas redes e fronteiras.

Comumente, a definição das barras de fronteira é realizada de forma independente das distâncias entre as barras no sistema, e da composição da TRT frente às características das reflexões das ondas viajantes no sistema. Segundo o Comitê Coordenador de Operações Norte-Nordeste (CCON, 1991), o ponto mínimo para representar os equivalentes encontra-se na segunda barra após àquela em que o disjuntor em estudo está instalado, como mostra a Figura 3.6.

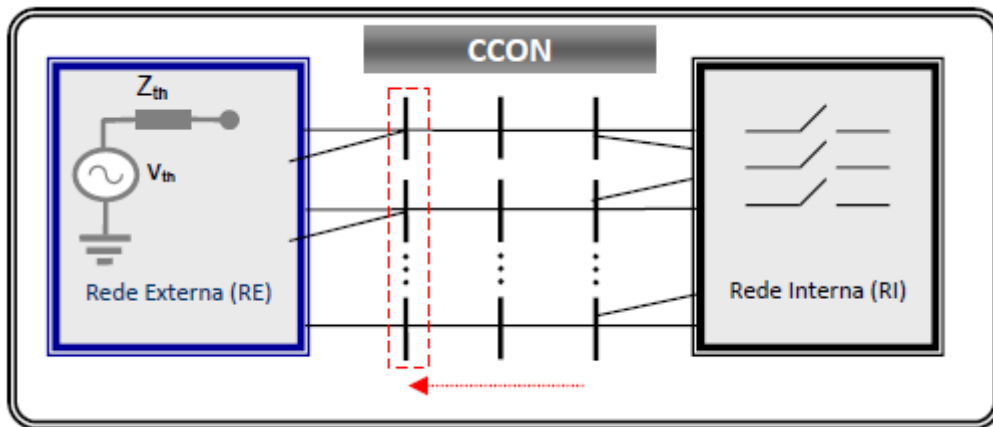


Figura 3.6 – Recomendação do CCON para delimitação de redes.

Já para o Operador Nacional do Sistema (ONS, 2007), as premissas para delimitação da rede de estudo são que entre as barras de estudo e as barras de fronteira haja no mínimo duas outras barras. A Figura 3.7 ilustra esse arranjo.

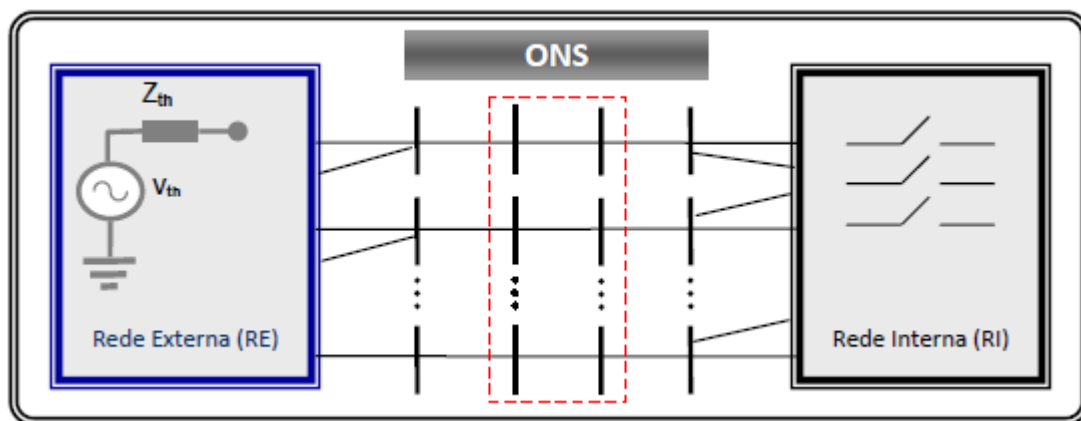


Figura 3.7 – Recomendação do ONS para delimitação de redes.

A delimitação do sistema levando em consideração apenas o número de barras entre as redes interna e externa, pode levar a imprecisões consideráveis nos resultados obtidos nas simulações e testes. À medida que os equivalentes são estabelecidos em pontos mais próximos ao disjuntor, as imprecisões decorrentes da representação de equivalentes simplificados calculados à frequência nominal podem elevar os valores de pico da TRT presumida, acarretando erros de dimensionamento (Azevêdo *et al*, 2009).

A Figura 3.8 exibe o efeito do comprimento da rede simulada L sob a forma de onda da TRT presumida (simulada), note que quanto menor o comprimento da rede em questão, os respectivos picos de TRT para cada caso tendem a apresentar um valor mais elevado.

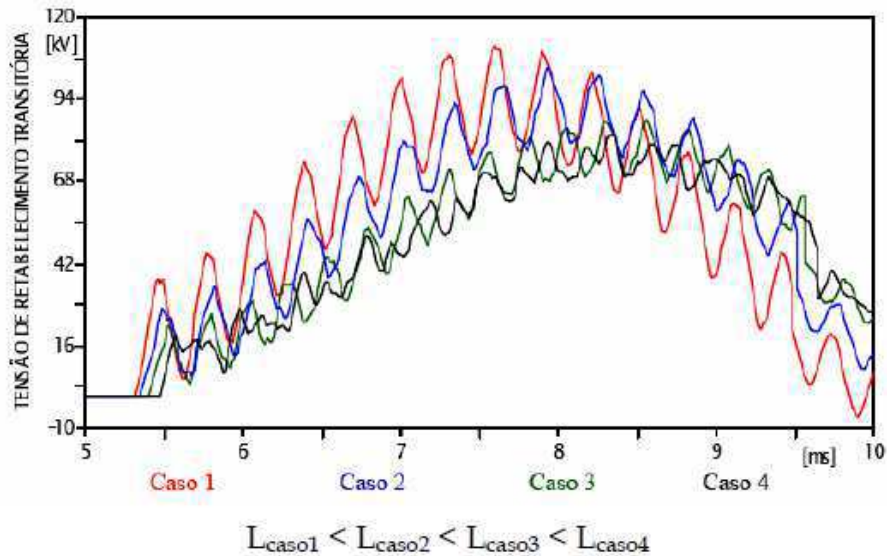


Figura 3.8 – Efeito do comprimento da rede simulada na forma de onda da TRT.

4. Mitigação da TRT

4.1. Redução da TCTRT

Estudos baseados na teoria de ondas viajantes, realizados por Conclaser *et al* (1971), demonstraram como influencia a presença de células capacitivas nos terminais do disjuntor na componente transitória da tensão a qual este está submetido, frente a solicitação de faltas quilométricas. Pôde ser verificado que a instalação das células acarretou em uma medida eficaz para a redução da taxa de crescimento da TRT. No mesmo estudo, algumas avaliações foram realizadas quanto à disposição típica de barramentos em subestações, constatando-se que pode haver certa distinção na potência reativa e número de células capacitivas a serem utilizadas para minimizar a taxa de crescimento da TRT em um ou mais equipamentos. Em nível de 13,8 kV normalmente são utilizadas células da ordem de 150 a 250 nF ou provisoriamente bancos de capacitores da ordem de 50 kvar (Alves, 2006). Apesar de não proporcionar alterações consideráveis no valor de pico da TRT, o ponto de localização das células capacitivas deve ser avaliado tecnicamente, buscando uma maior eficácia em seu propósito de utilização.

Através de simulações utilizando programas do tipo EMTP, Swindler *et al* (1997) puderam discutir e avaliar a instalação de células capacitivas em estudos de TRT sobre equipamentos de uma subestação de uma refinaria de óleo. A instalação de células capacitivas incorrem na redução da frequência natural de oscilação da tensão de

restabelecimento no sistema, $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, evitando-se assim variações bruscas em sua taxa de crescimento, conforme mostra a Figura 4.1.

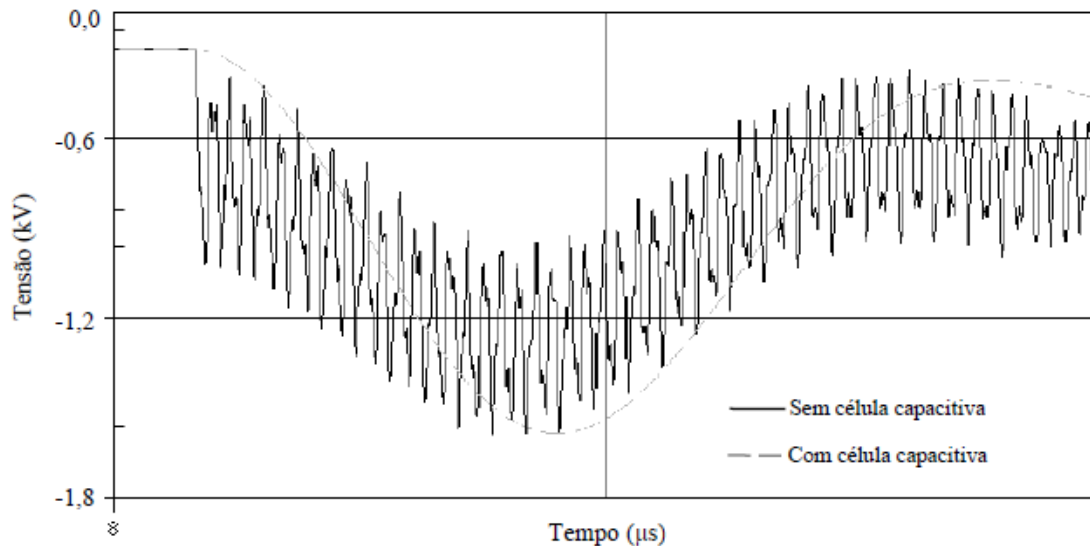


Figura 4.1 – Efeito das células capacitivas nos terminais do disjuntor sobre a frequência da TRT.

A localização das células de surto a montante ou a jusante do disjuntor, mostrada na Figura 4.2, é de extrema relevância quanto ao cenário de superação evidenciado. Na superação por TCTRT sob condições de falta trifásica não aterrada, recomenda-se a instalação das mesmas nos pólos do disjuntor localizados a montante, reduzindo assim a frequência de oscilação da tensão $v_1(t)$ do lado da fonte. Já no caso de superação por TCTRT, a instalação deve ser realizada nos pólos do equipamento localizados a jusante, ou seja, no lado da carga, deste modo minimizando as oscilações de alta frequência da tensão $v_2(t)$ características deste tipo de falta.

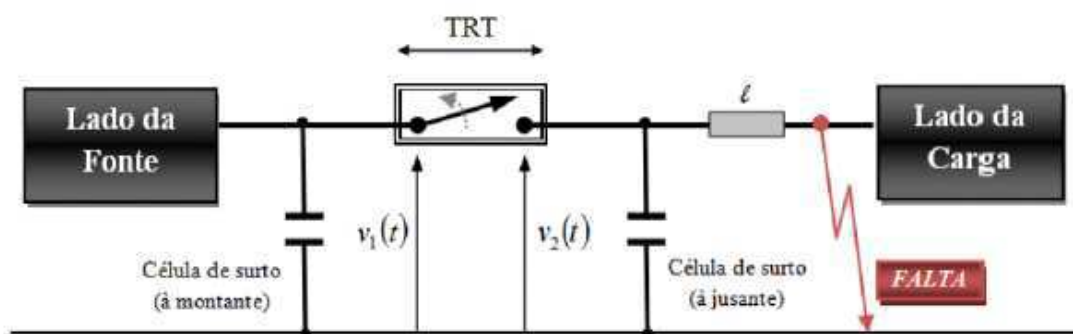


Figura 4.2 – Localização das células de surto para redução da TCTRT.

4.2. Redução do Pico da TRT

A prática mais comum quando o disjuntor encontra-se superado pelo valor de pico da TRT é, além das restrições impostas ao circuito em relação a patamares de

carregamento do sistema e transferência de comando de abertura (*trip*), a substituição do equipamento por outro de classe de tensão superior que suporte o nível de TRT ao qual está submetido no sistema.

Frente à severidade das condições encontradas em um estudo de revalidação de dimensionamento dos disjuntores de classe 15 kV da subestação Angelim (sistema CHESF), quanto à solicitação de TRT, foi proposto o uso de varistores de óxido de zinco (ZnO) para redução do pico da TRT (Nobre *et al*, 2001). Simulações digitais foram realizadas, e os resultados mostraram que a característica de não linearidade entre tensão e corrente das pastilhas de ZnO podem se tornar uma alternativa viável e efetiva quanto a superação do equipamento por valor de pico da TRT.

De fato, o nível de energia absorvido pelas pastilhas frente a mitigação de faltas trifásicas não aterradas de dezenas de kHz encontrava-se bem abaixo do que estas poderiam dissipar.

4.2.1. Dispositivo Limitador da TRT

Varistores de óxido de zinco são dispositivos semicondutores que apresentam característica altamente não linear entre a tensão e corrente a qual estão submetidos. Em condições de operação normal, comporta-se praticamente como um circuito aberto, apresentando uma resistência elevadíssima, que faz circular pelo mesmo apenas uma corrente residual. Quando submetido a sobretensões, muda suas características elétricas internas à matéria, diminuindo consideravelmente sua resistência e desta maneira absorvendo boa parte da energia injetada por surtos na rede. A característica típica de um dispositivo de ZnO de padrão comercial é mostrada na Figura 4.3.

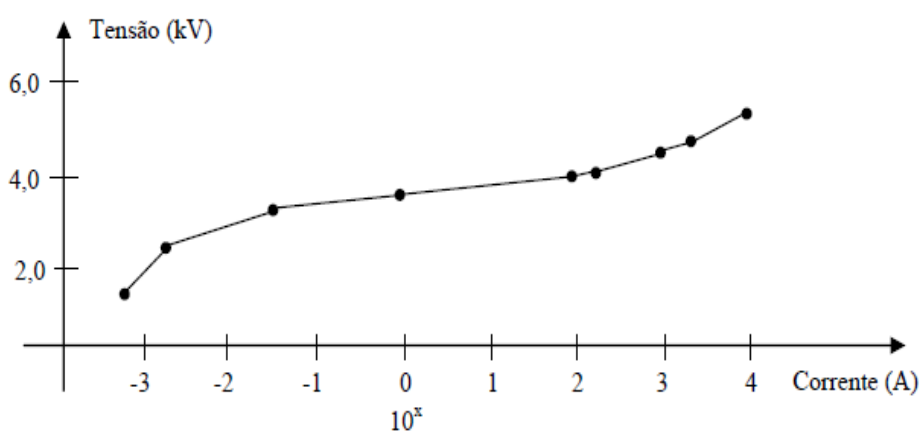


Figura 4.3 – Característica V-I não-linear típica de um varistor de ZnO.

Sob o escopo de estudos de TRT, visando limitar o nível que alcança a sobretensão entre os pólos de um disjuntor superado por valor de pico, é proposto o uso de dispositivo a base de pastilhas varistoras de ZnO em paralelo ao equipamento de seccionamento, conforme mostrado na Figura 4.4.

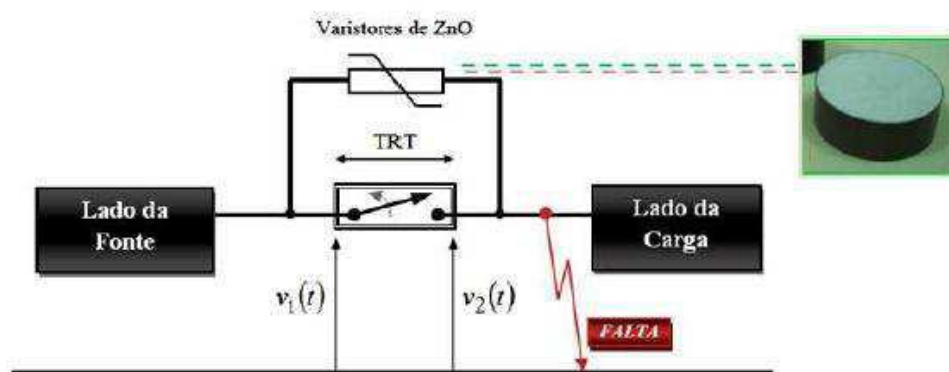


Figura 4.4 – Arranjo para limitação do pico da TRT com dispositivo a varistores de ZnO.

O correto dimensionamento do número de pastilhas necessárias para reduzir o evento transitório a níveis seguros de operação deve ter como requisitos de análise a energia possível de ser absorvida pelo dispositivo limitador de ZnO e a máxima corrente que o atravessa em operação.

Para simular o dispositivo neste trabalho, são utilizados varistores de ZnO cilíndricos com cilíndricos com espessura de 23 mm e diâmetro igual a 62 mm (padrão comercial). Os dados técnicos de cada elemento não linear, assim como as características V-I do dispositivo formado com três e quatro pastilhas de varistores em série são mostradas na Tabela 4.1 e

Tabela 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1 – Característica técnicas dos elementos varistores a base de ZnO.

Característica	Valor
Condutividade Térmica	23 W/m°C
Calor Específico	456 J/kg°C (a 0 °C)
Varição do Calor Específico com a Temperatura	4,4 (J/kg°C)/°C
Densidade	5258 kg/m ³
Tensão Nominal	3,5 kV
Corrente Nominal de Descarga	10,0 kA

Tabela 4.2 – Característica V-I para dispositivo limitador com 3 e 4 pastilhas de varistores em série.

<i>I</i> (A)	<i>V</i> (kV)	
	3 Pastilhas	4 pastilhas
0,0008	6,78	9,04
0,0030	11,95	15,92
0,7000	14,37	19,13
1,0000	15,24	20,32
100,00	16,80	22,40
200,00	17,10	22,80
1000,0	19,20	25,60
5000,0	21,00	28,00
10000,0	22,50	30,00

5. Estudo da TRT no Sistema Piloto

5.1. Sistema Piloto

O sistema escolhido para realização dos estudos e simulações foi o Regional Mussuré II da concessionária de energia elétrica ENERGISA-PB. Nele encontram-se as subestações Cruz do Peixe (CPX) e Tambaú (TBU), localizadas na região da grande João Pessoa, que foram escolhidas como casos base pelo fato de que a superação de alguns disjuntores por TRT havia sido acusada em estudos anteriores realizados no ano de 2007 (SAELPA, 2007).

Conforme mostra a Figura 5.1, o Regional Mussuré II é concebido por meio de três ramais principais conectados a partir do barramento de 69 kV da subestação Mussuré (MRD 69), fazendo a ligação até as seccionais Mangabeira (MGB) e João Pessoa (JPS), que por sua vez alimentam todo o sistema piloto.

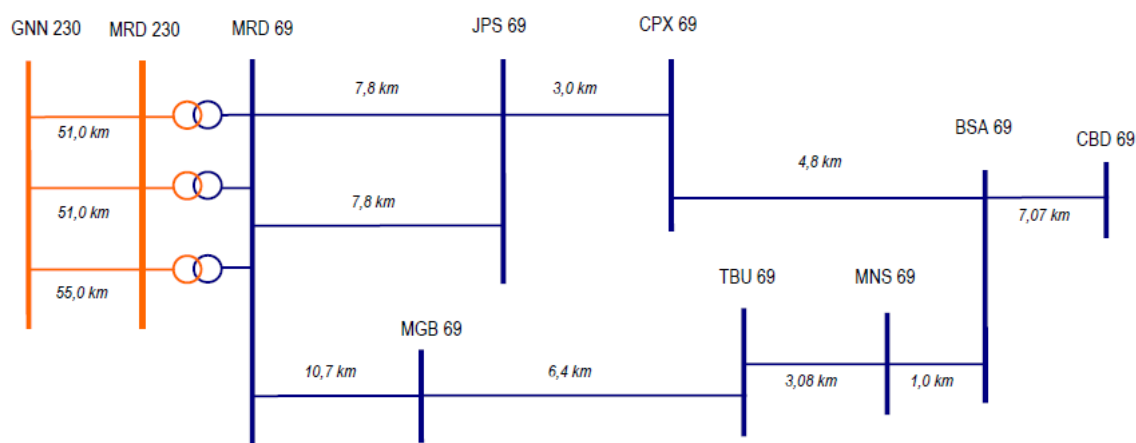


Figura 5.1 – Diagrama simplificado das seccionais João Pessoa e Mangabeira do sistema Energisa-PB.

Os perfis da TRT dos disjuntores e religadores das subestações em estudo foram avaliados frente à suportabilidade em suprimir faltas não aterradas trifásicas nos seus terminais. Para o caso dos disjuntores e religadores com linhas de transmissão conectadas imediatamente à jusante, também foi analisado a supressão de faltas quilométricas.

Os diagramas unifilares das subestações Cruz do Peixe (CPX) e Tambaú (TBU), com os setores de 69 e 13,8 kV são mostrados em detalhes abaixo.

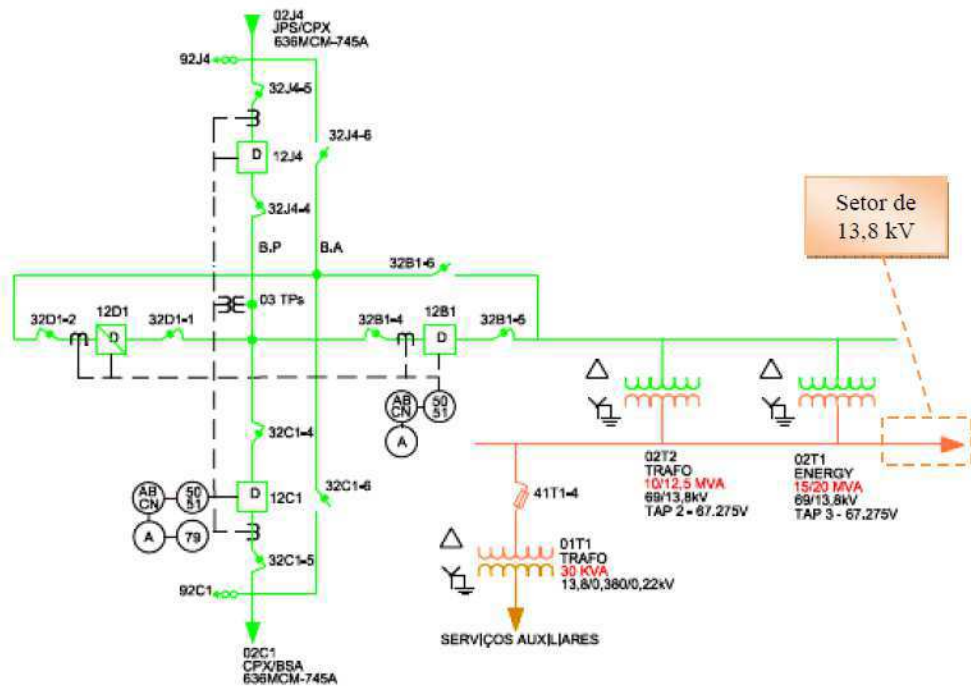


Figura 5.2 – Unifilar do setor de 69 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).

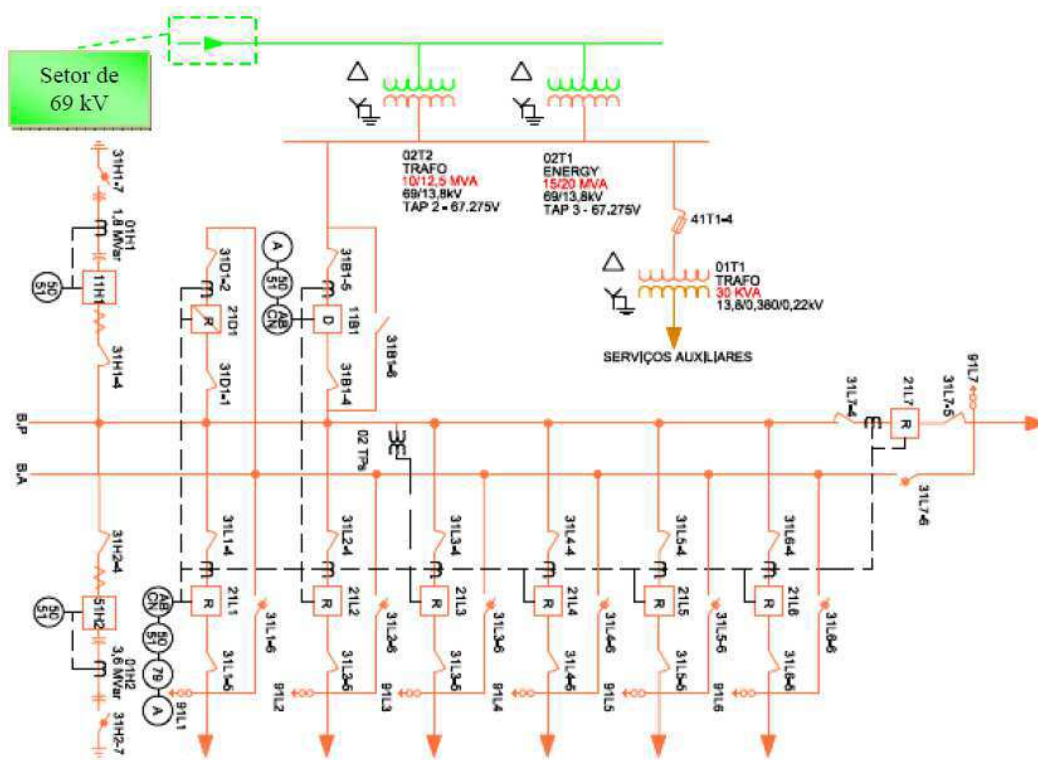


Figura 5.3 – Unifilar do setor de 13,8 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).

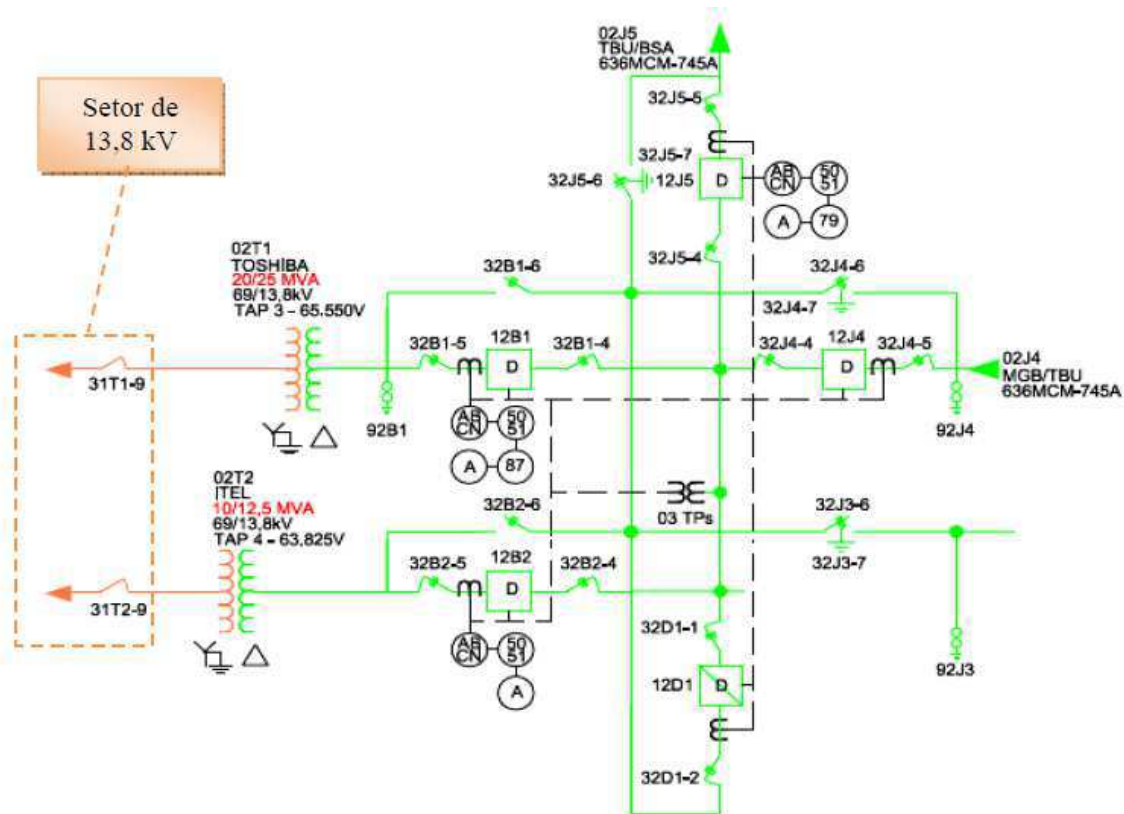


Figura 5.4 – Unifilar do setor de 69 kV da subestação João Pessoa (JPS).

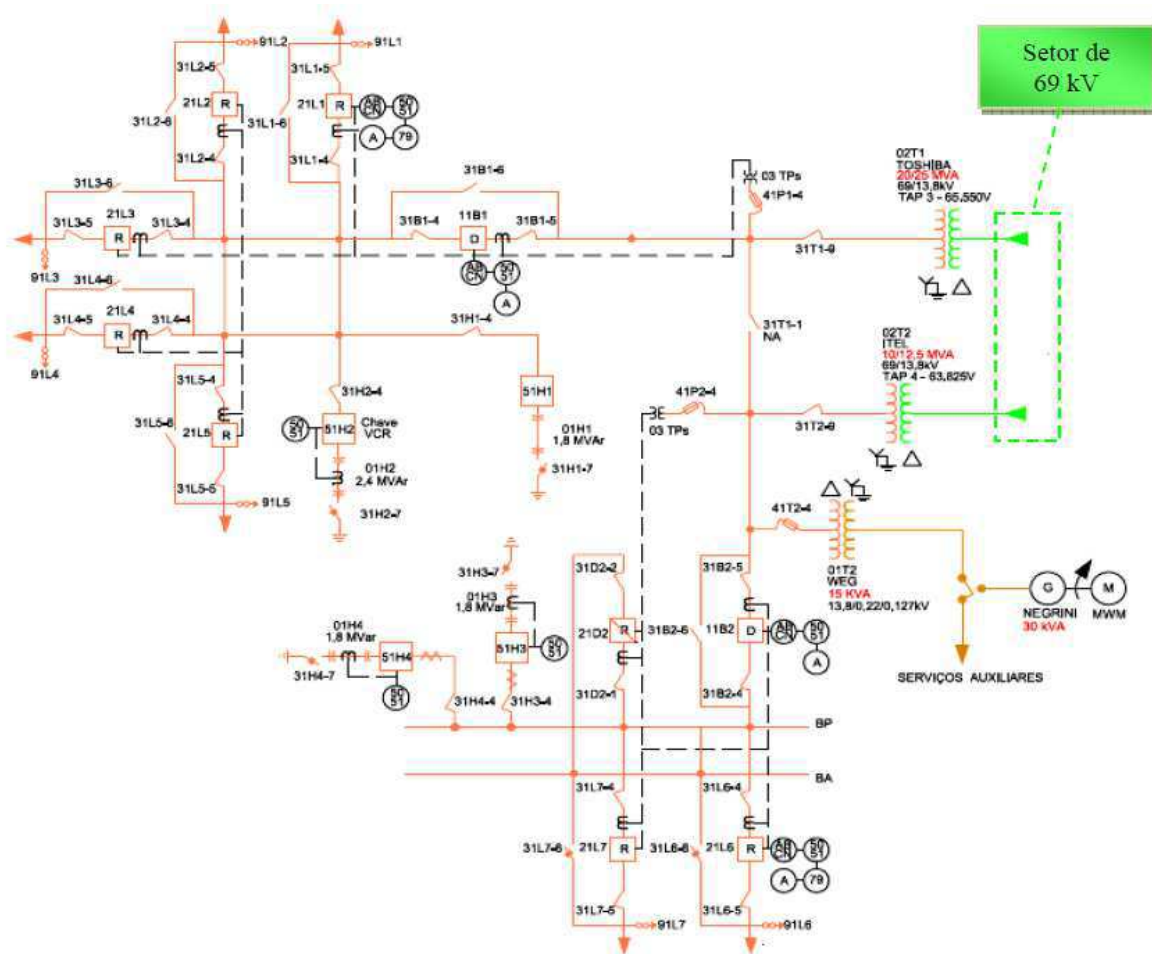


Figura 5.5 – Unifilar do setor de 13,8 kV da subestação João Pessoa (JPS).

5.2. Representação da Rede Teste

Os critérios relevantes para a representação dos componentes e características da rede elétrica teste utilizada nas simulações, foram:

- A rede elétrica foi modelada em detalhes, incluindo capacitâncias parasitas, bancos de capacitores e cargas das subestações;
- O equivalente da rede externa foi alocado no barramento de 230 kV da subestação de Goianinha, sendo o módulo da tensão pré-falta do sistema obtido segundo as avaliações do estudo de fluxo de carga;
- Os cabos que conectam linhas de transmissão, barramentos, transformadores das subestações foram representados por circuitos PI a parâmetros concentrados;
- Transformadores foram modelados a elementos concentrados RL série sem acoplamento entre fases, incluindo as capacitâncias de buchas e

enrolamentos, e capacitância de transferência entre primário e secundário;

- Os bancos de capacitores foram representados por elementos concentrados;
- As cargas no sistema foram modeladas por circuitos RL série, proporcionando um modelo conservativo nas respostas obtidas em comparação com o circuito RL paralelo. Será avaliado o cenário de carregamento leve do sistema, que se caracteriza por condições transitórias mais severas (Jones, 1988; Costa *et al*, 2009);
- A representação utilizada para linhas de transmissão foi o modelo a parâmetros distribuídos de Bergeron (Dommel, 1996).

5.3. Avaliação dos Equipamentos

Simulações digitais serão realizadas para a avaliação de dois equipamentos presentes no sistema piloto: o religador 21L1 da Subestação Cruz do Peixe (CPX) de fabricante Cooper Power, tipo ESV-1516, com capacidade de interrupção de 16 kA; e o religador 21L6 da Subestação Tambaú (TBU) do fabricante Alston, tipo 22017/1/26, também com capacidade de interrupção de 16 kA.

Ambos serão submetidos a estudo para condição de supressão de faltas trifásicas não aterradas nos seus terminais e faltas monofásicas quilométricas. Para o segundo caso, as condições mais adversas para a taxa de crescimento da TRT foram observadas para faltas localizadas no ramal de distribuição a 2 km de distância do equipamento avaliado (Azevêdo, 2010). Os dois religadores em estudo apresentam os valores de referência para a TRT presumida estabelecidos pela norma ANSI, apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros de referência da TRT especificada para equipamentos de classe 15 kV – norma ANSI C37.06.

Tipo de Falta	Valor de Pico E_2 (kV)	Tempo de Crista T_2 (μ s)	TCTRT (kV/ μ s)
Trifásica não aterrada	28,2	36,0	0,89
Quilométrica	18,8	36,0	0,59

5.3.1. Eliminação de Falta Trifásica Não Aterrada

As formas de onda obtidas da tensão entre os contatos do Religador R1L1 da Subestação Cruz do Peixe (CPX) e a corrente sob condição de falta trifásica não aterrada são mostradas na Figura 5.6 e Figura 5.7, respectivamente.

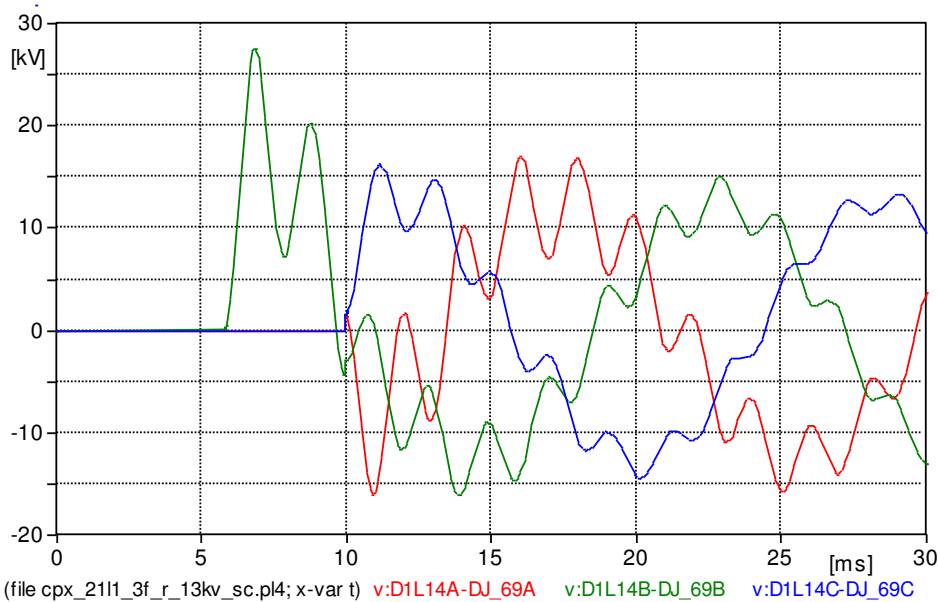


Figura 5.6 – Formas de onda para a TRT nas três fases do religador 21L1 da SE CPX sob falta trifásica não aterrada.

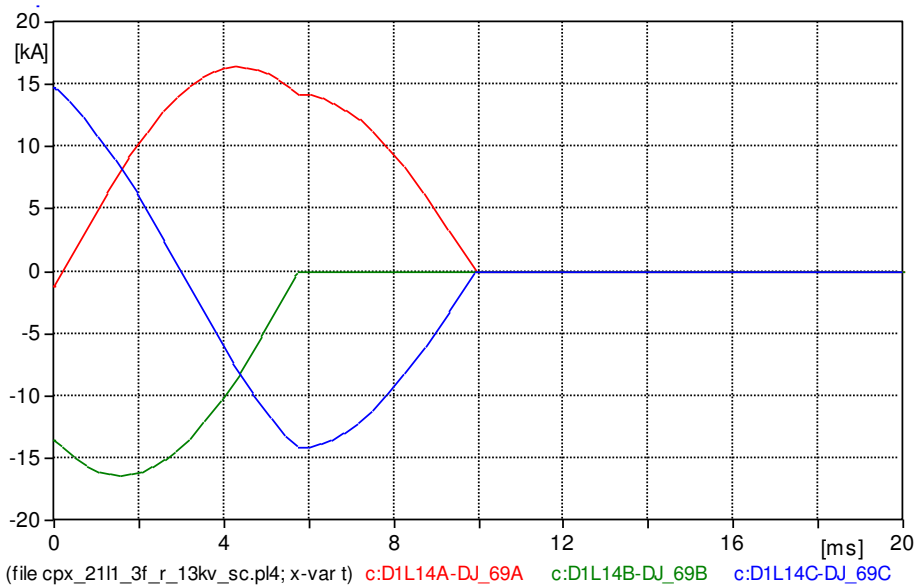


Figura 5.7 – Formas de onda para a corrente nas três fases do religador 21L1 da SE CPX sob falta trifásica não aterrada.

Analisando as formas de onda obtidas, constata-se que o primeiro pólo a abrir do religador 21L1 é o da fase B, estando seus contatos submetidos à maior solicitação de TRT em relação aos demais pólos. Desta forma, uma avaliação criteriosa deve ser feita

na fase B do equipamento. A Figura 5.8 mostra as aferições dos valores presumidos e especificados da TRT na fase B sob condições de falta trifásica não aterrada.

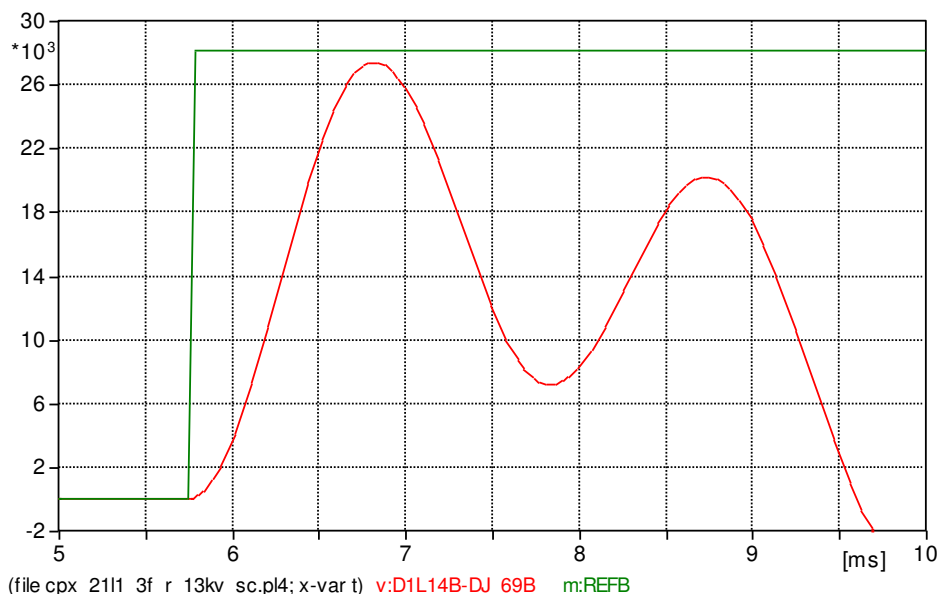


Figura 5.8 – TRT presumida e especificada na fase B do religador 21L1 da SE CPX.

A análise da forma de onda obtida demonstra que o religador 21L1 encontra-se apropriado para suprimir faltas trifásicas não aterradas em seus terminais. O valor de pico de 26,4 kV apresenta nível de segurança de 6,4% relativo aos valores de norma. A taxa de crescimento de 0,04 kV/ μ s encontra-se bem abaixo do valor especificado.

Para o religador 21L6 da subestação Tambaú (TBU), as seguintes formas de onda obtidas da tensão entre seus pólos e corrente de são mostradas na Figura 5.9 e Figura 5.10, respectivamente.

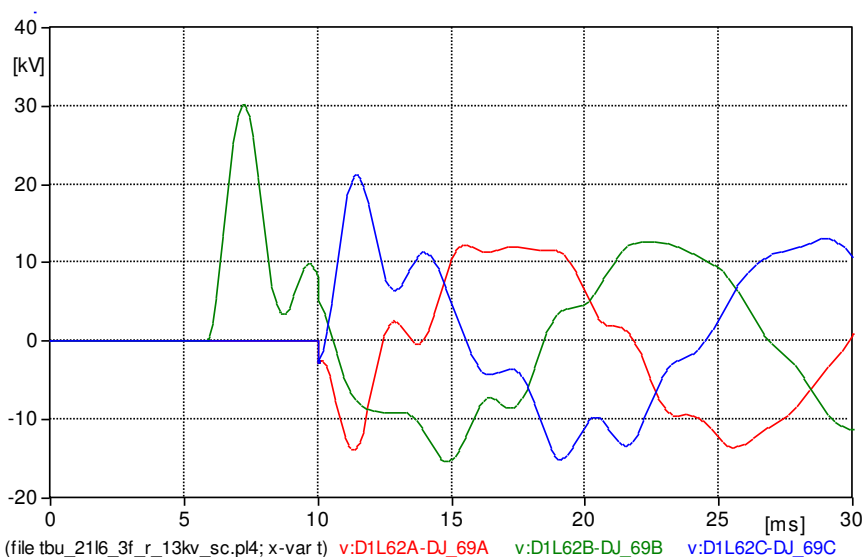


Figura 5.9 – Formas de onda para a TRT nas três fases do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.

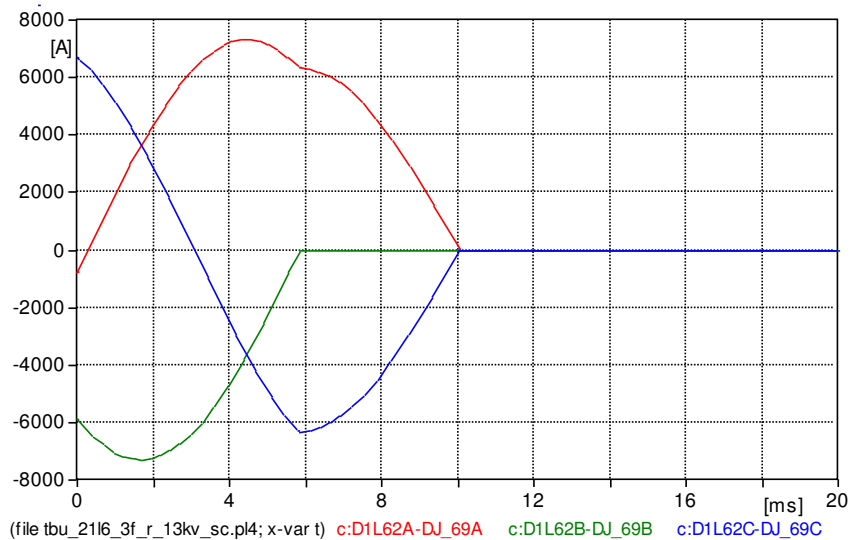


Figura 5.10 – Formas de onda para a corrente nas três fases do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.

Analogamente ao caso do religador 21L1 da Subestação CPX, o primeiro pólo do equipamento a extinguir a corrente da falta é o da fase B, estando submetido aos maiores esforços térmicos e dielétricos frente à onda de TRT, que é mostrada na Figura 5.11 em comparação com a referência da norma ANSI.

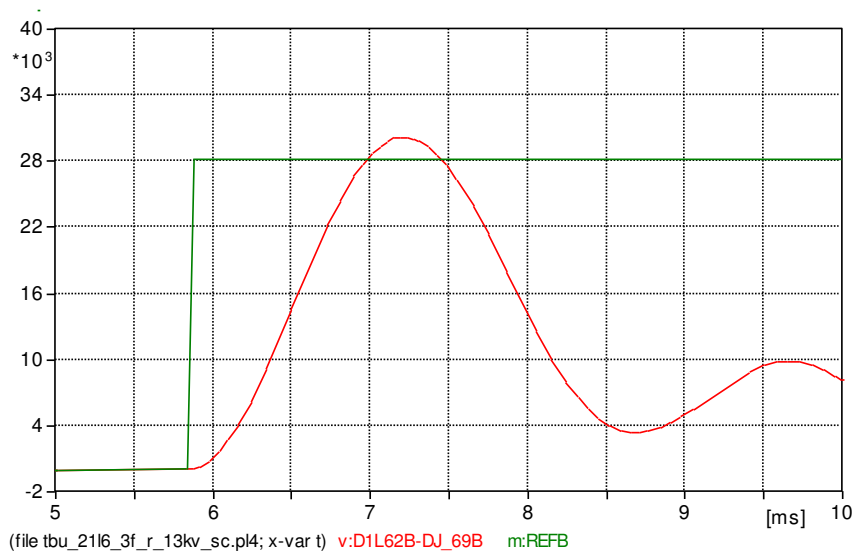


Figura 5.11 – TRT presumida e especificada na fase B do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.

Como pode ser visto, o religador 21L6 da Subestação TBU encontra-se superado por valor de pico da TRT, estando o meio isolante extintor do arco submetido a esforços dielétricos maiores do que pode suportar. O valor do pico da onda de 30,2 kV encontra-se 7,1% acima do valor especificado. A TCTRT encontrada de 0,034 kV/ μ s está bem abaixo da especificada de 0,89 kV/ μ s, estando o religador adequado a suportar os esforços térmicos ao qual está submetido.

5.3.2. Eliminação de Falta Quilométrica

Para o caso da eliminação de falta monofásica quilométrica na fase A do religador 21L1, a Figura 5.12 mostra a forma de onda obtida para a TRT em comparação com valor de referência da norma ANSI. A Figura 5.13 mostra em detalhe a forma de onda observada.

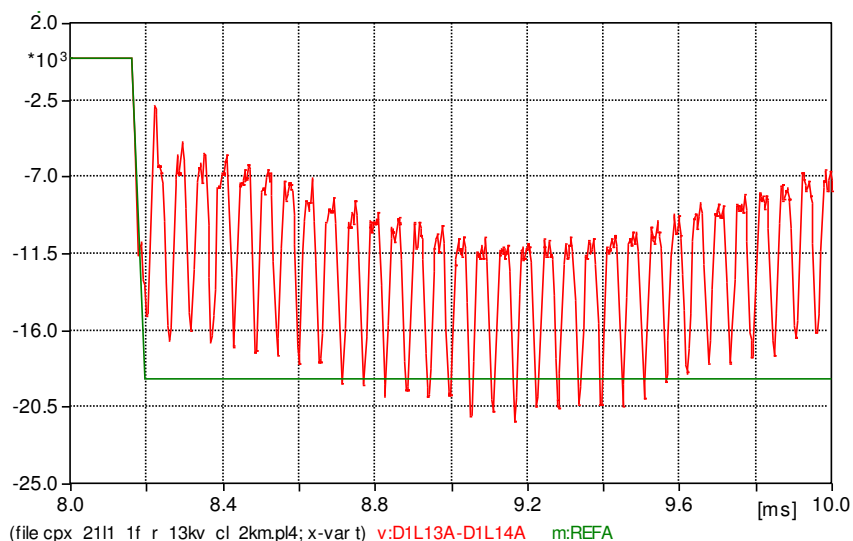


Figura 5.12 – TRT presumida e especificada na fase A do religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.

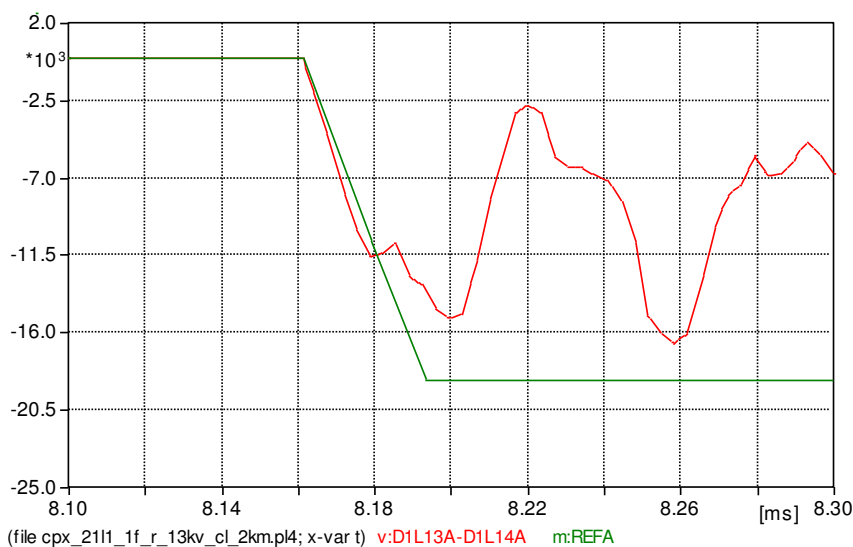


Figura 5.13 – Detalhe da TRT presumida e especificada na fase A do religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.

As formas de onda aferidas para o religador 21L6 da Subestação Tambaú sob falta quilométrica são mostradas na Figura 5.14 e Figura 5.15.

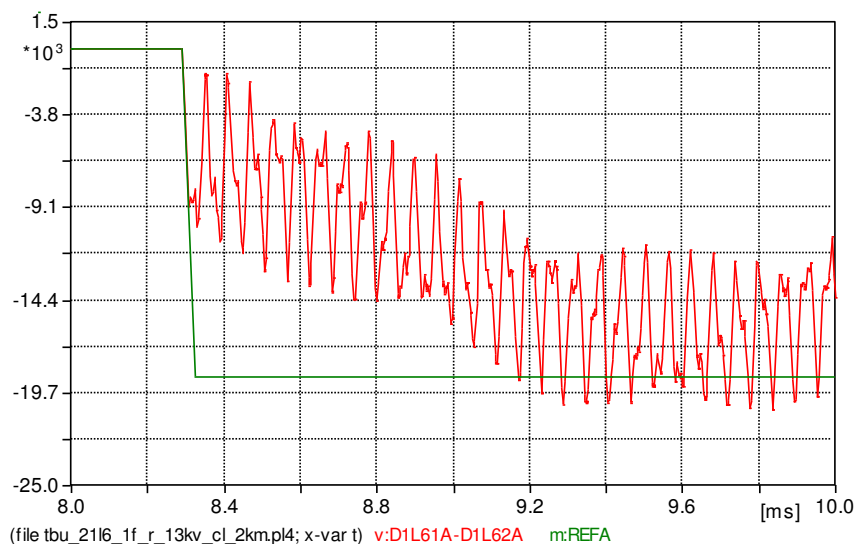


Figura 5.14 – TRT presumida e especificada na fase A do relizador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.

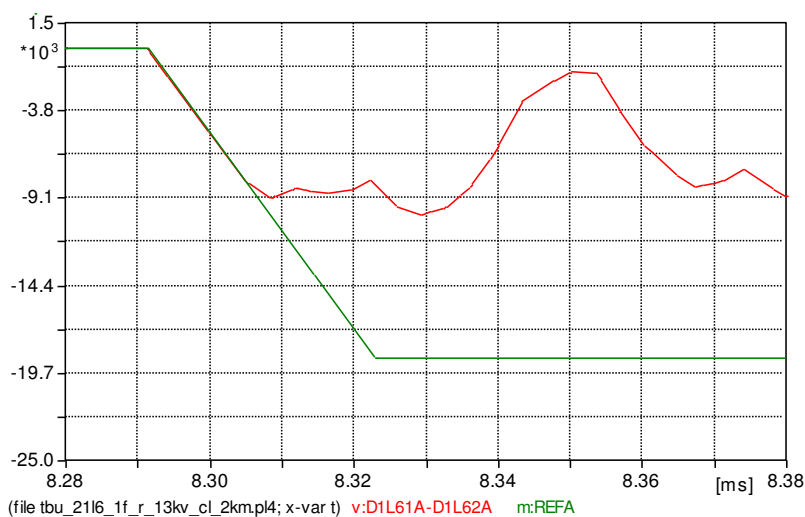


Figura 5.15 – Detalhe da TRT presumida e especificada na fase A do relizador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.

Uma síntese dos resultados obtidos nas simulações em comparação com os valores de referência é mostrada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Síntese dos resultados obtidos para os relizadores submetidos a falta quilométrica.

Equipamento (SE)	Simulação		Referência	
	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)
21L1 (CPX)	21,3	0,74	18,8	0,59
21L6 (TBU)	20,7	0,73	18,8	0,59

Constata-se que para o cenário de supressão de faltas quilométricas os relizadores 21L1 da Subestação CPX e 21L6 da Subestação TBU encontram-se superados tanto pelo valor de pico (superação dielétrica do meio isolante), quanto pela

taxa de crescimento da TRT (superação térmica do meio extintor do arco). O religador 21L1 (CPX) apresentou valores de 13,3 e 25,4% acima dos valores de referência para o valor de pico e taxa de crescimento da TRT, respectivamente. Já para o religador 21L6 (TBU) foram obtidos valores de 10,1 e 23,7% acima dos mesmos.

5.4. Medidas Mitigadoras

Para os equipamentos que apresentaram superação tanto por valor da taxa de crescimento, quanto pelo valor de pico da TRT, serão avaliadas medidas mitigadoras para que estes possam vir operar com segurança sem que seja necessária a troca dos dispositivos por outros de classe superior, procedimento bastante oneroso para as concessionárias de energia.

5.4.1. Instalação de Células Capacitivas

Como alternativa para minimizar a TCTRT encontrada para os religadores em estudo, foi proposta a instalação de células capacitivas de 150 nF nos terminais dos equipamentos. Como a superação por taxa de crescimento ocorreu quando da supressão de faltas quilométricas pelos dois dispositivos, as células capacitivas foram instaladas à jusante dos mesmos, visando assim diminuir a alta frequência da tensão do lado da carga.

Os resultados desses testes para os religadores 21L1 da Subestação CPX e 21L6 da Subestação TBU, com a instalação de uma célula capacitiva (150 nF) e duas células em paralelo (300 nF), são mostrados em comparação com a forma de onda encontrada sem dispositivo mitigador na Figura 5.16 e Figura 5.17.

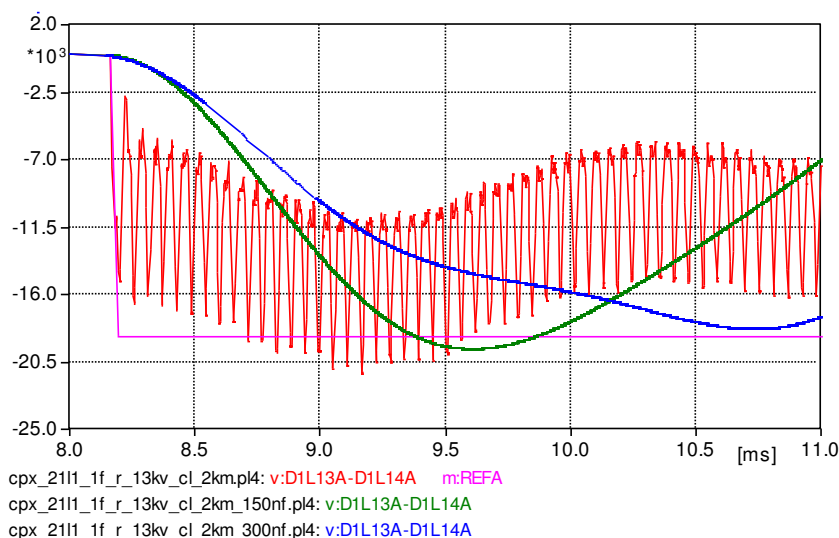


Figura 5.16 – Efeito na TRT após inserção de células capacitivas à jusante do religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.

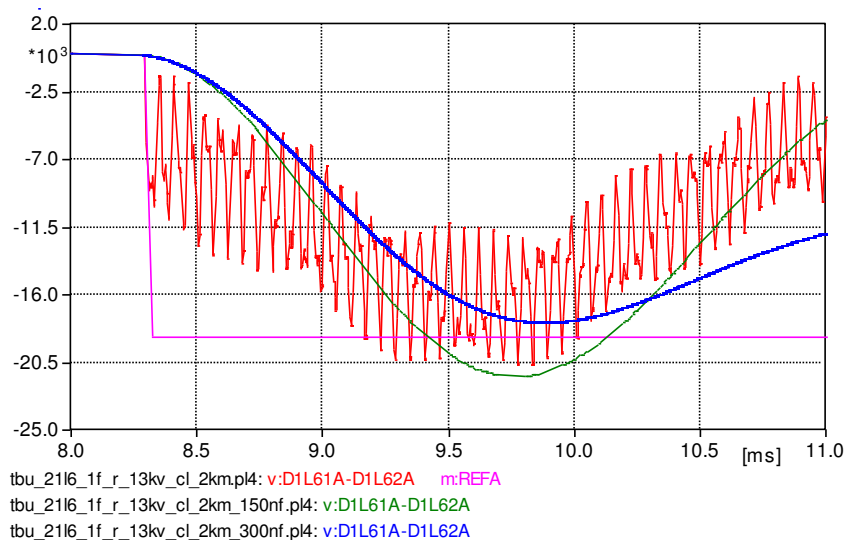


Figura 5.17 – Efeito na TRT após inserção de células capacitivas à jusante do religador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.

Uma síntese dos resultados obtidos após a inserção de células capacitivas à jusante dos religadores 21L1 (CPX) e 21L6 (TBU), submetidos a falta quilométrica, pode ser vista na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados obtidos após inserção de células capacitivas à jusante dos religadores 21L1 (CPX) e 21L6 (TBU) sob falta quilométrica.

Equipamento (SE)	Células Capacitivas (150 nF)	Simulação		Referência	
		Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)
21L1 (CPX)	1	19,7	0,02	18,8	0,59
	2	18,3	0,014		
21L6 (TBU)	1	21,4	0,084	18,8	0,59
	2	17,9	0,02		

Uma análise dos resultados obtidos mostra que, apesar da utilização mínima de células capacitivas de 150 nF nos equipamentos levarem a resultados satisfatórios quanto a taxa de crescimento da TRT, ficando bem abaixo do valor de referência, eles ainda continuam superados pelo valor de pico. Desta forma, a utilização de duas células em paralelo (300 nF), de forma complementar à redução da TCTRT, também garante operação satisfatória dos religadores em relação ao valor de pico, com uma margem de segurança de 2,7 e 4,8% para o 21L1 e 21L6, respectivamente.

5.4.2. Utilização de Varistores de ZnO

Aproveitando-se da propriedade altamente não linear entre tensão e corrente que os varistores possuem, uma solução avaliada para reduzir o valor de pico da TRT foi a

instalação de uma associação série de pastilhas de varistores de óxido de zinco (ZnO) em paralelo com os terminais dos religadores avaliados no estudo.

Simulações foram realizadas utilizando 3 e 4 pastilhas de varistores para os casos em que os religadores apresentavam superação por valor de pico da TRT, sob a perspectiva de falta trifásica não aterrada e falta quilométrica. Nos casos das faltas quilométricas, quando os religadores também apresentavam superação por taxa de crescimento, foram utilizadas células capacitivas de 150 nF em conjunto com as pastilhas de varistores. Os resultados são mostrados nas Figura 5.18 a Figura 5.20.

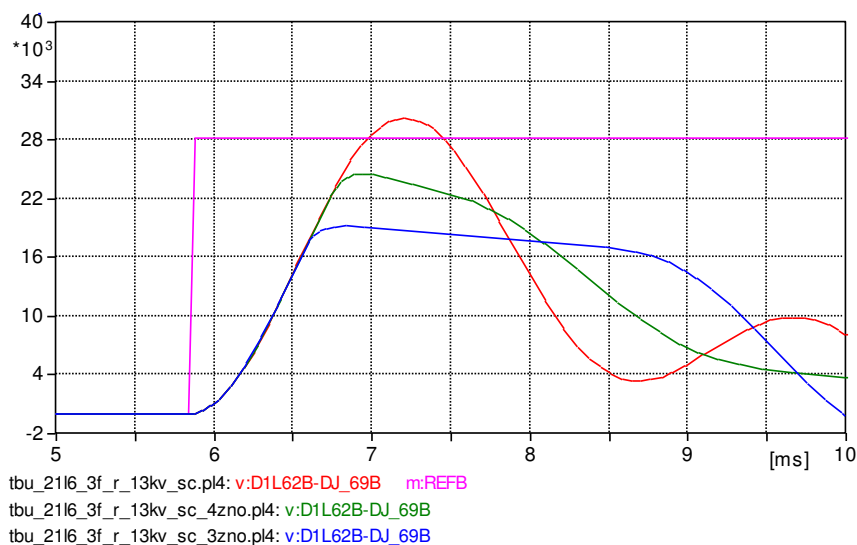


Figura 5.18 – Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.

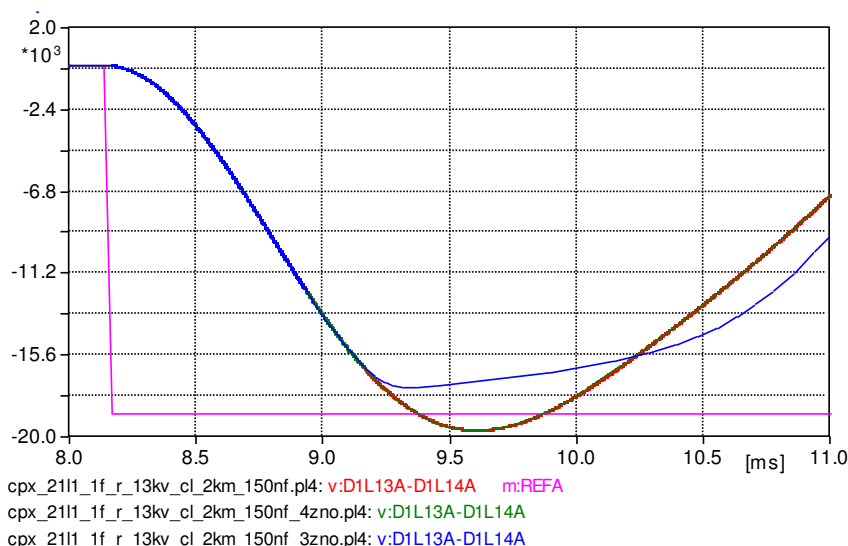


Figura 5.19 – Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L1 da SE CPX sob falta quilométrica.

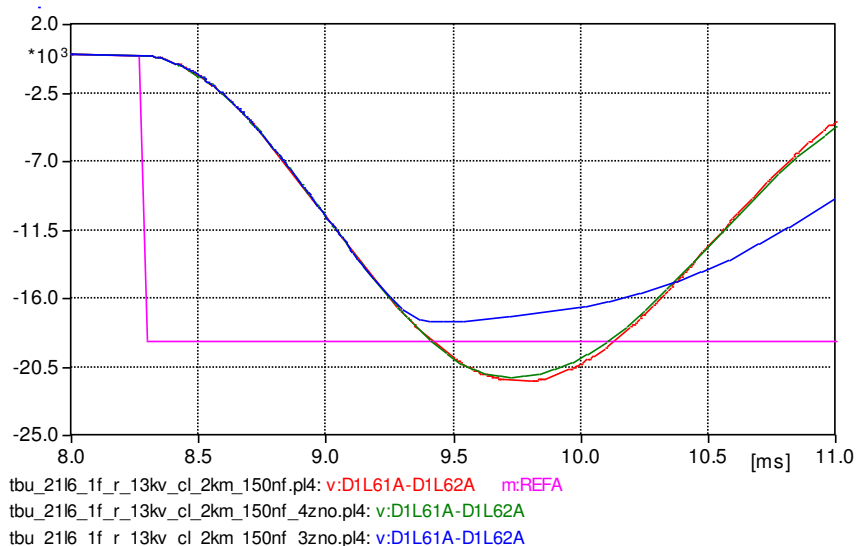


Figura 5.20 – Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do relógio 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.

Na Tabela 5.4 é mostrada uma síntese dos resultados obtidos nas simulações utilizando o dispositivo mitigador de ZnO para os relógios 21L1 da SE CPX e 21L6 da SE TBU.

Tabela 5.4 – Resultados obtidos após inserção de pastilhas de ZnO em paralelo aos relógios 21L1 (CPX) e 21L6 (TBU).

Equipamento (SE)	Tipo de Falta	Pastilhas de ZnO	Simulação		Referência	
			Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)
21L1 (CPX)	Quilométrica	3 + células capacitivas	17,4	0,02	18,8	0,59
		4 + células capacitivas	19,7	0,02		
21L6 (TBU)	Trifásica	3	19,2	0,034	28,2	0,89
		4	24,5	0,034		
	Quilométrica	3 + células capacitivas	17,5	0,084	18,8	0,59
		4 + células capacitivas	21,2	0,084		

Analisando os relógios submetidos à falta quilométrica, percebe-se que com a utilização de 4 pastilhas de varistores os equipamentos continuam superados por valor de pico, não havendo redução significativa deste valor aos encontrados sem dispositivo mitigador. Já quando são utilizados 3 discos de ZnO, são encontrados valores de pico da TRT abaixo da referência, com margem de segurança de 7,4 e 6,9 % para os relógios 21L1 (CPX) e 21L6 (TBU), respectivamente. Os valores para TCTRT não sofrem alterações significativas. A energia dissipada e a corrente que passa no dispositivo

mitigador para esse caso assume valores muito baixos, não sendo necessária uma avaliação mais criteriosa em seu dimensionamento.

Para falta trifásica não aterrada nos terminais do religador 21L6 da Subestação Tambaú (TBU), percebe-se uma significativa redução do valor de pico da TRT em relação ao valor obtido na simulação sem nenhum dispositivo mitigador. Com a utilização de 3 pastilhas de ZnO obteve-se um valor de pico de 19,2 kV, e uma margem de segurança de 31,9 % em relação à referência. Os valores utilizando-se 4 pastilhas foram 24,5 kV, com margem de segurança respectiva de 13,1 %. Os valores para TCTRT não sofrem alterações significativas.

Para este caso, torna-se necessário o dimensionamento do número de pastilhas de varistores a serem utilizadas, levando em conta a energia absorvida e corrente no dispositivo. As formas de onda observadas para a energia e corrente nos dispositivos mitigadores utilizando 3 e 4 pastilhas de ZnO são mostradas nas Figura 5.21 e 5.22, respectivamente.

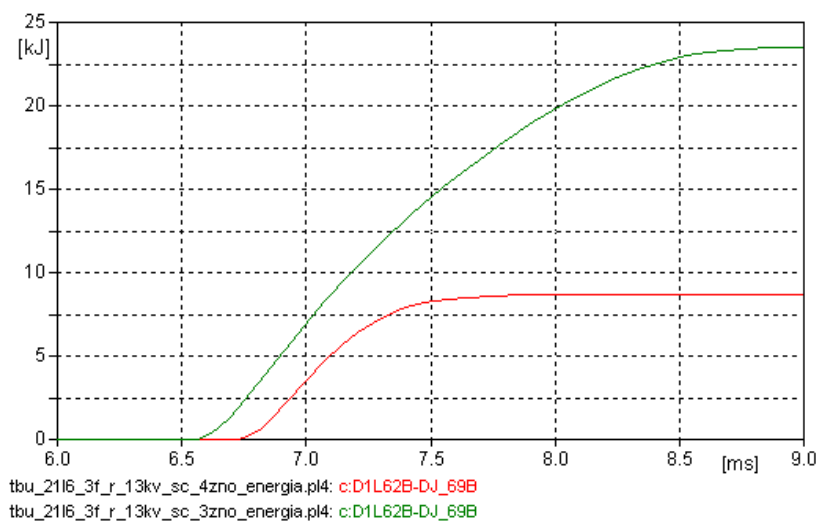


Figura 5.21 – Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada.

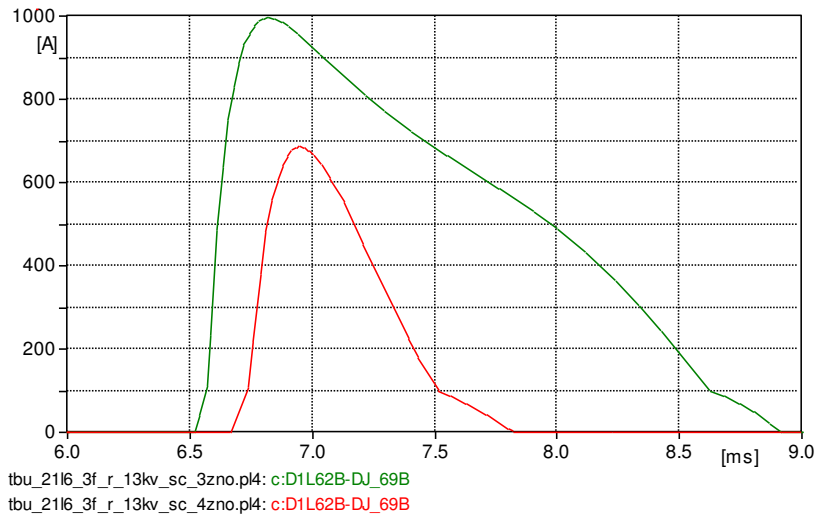


Figura 5.22 – Corrente no dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do Religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada.

Pode ser constatado que o uso do dispositivo mitigador do valor de pico da TRT formado por 4 pastilhas apresenta valores para corrente e energia absorvida abaixo do caso em que é constituído por 3 pastilhas, sendo mais apropriada e segura a sua aplicação. Os valores de corrente residual de regime encontrados foram de 2,68 e 1,58 mA utilizando-se 3 e 4 pastilhas, além disso a tensão sobre cada pastilha de varistor é de aproximadamente 6,1 kV utilizando-se 4 pastilhas, abaixo do valor de 6,4 kV encontrado com 3 pastilhas.

6. Conclusões

Foi realizado um diagnóstico do religador 21L1 da Subestação Cruz do Peixe (CPX) e do religador 21L6 da Subestação Tambaú (TBU) frente à solicitação de Tensão de Restabelecimento Transitória, no qual foi constatada a superação do segundo equipamento mediante a eliminação de falta trifásica não aterrada em seus terminais, e de ambos frente a faltas monofásicas quilométricas.

A superação dos dois equipamentos avaliados submetidos a falta quilométrica se deu tanto por valor de pico quanto pela taxa de crescimento da TRT, um cenário bastante grave para o sistema. Alternativas de instalação de células de surto capacitivas sozinhas para redução da TCTRT, e aliadas a dispositivos de ZnO entre os terminais dos religadores se mostraram eficazes levando tanto o valor de pico quanto a taxa de crescimento a valores abaixo da referência de norma. Desta forma, a utilização desses dispositivos pode vir a permitir operações antes proibitivas, aumentar a vida útil dos equipamentos e minimizar os recursos investidos pelas concessionárias de energia na aquisição de novos religadores e disjuntores de classe de tensão superior.

Pelas características intrínsecas da forma da TRT quando da supressão de faltas trifásicas não aterradas, o religador 21L6 (CPX) mostrou-se superado apenas por valor de pico. Neste caso foi também avaliado a utilização de dispositivo de ZnO, que efetivamente reduziram o valor para limites seguros abaixo do valor de referência. Um dimensionamento do número de pastilhas a serem utilizadas também foi realizado, constatando-se que neste caso o uso de dispositivos constituídos de 4 pastilhas em série é mais apropriado e seguro, mantendo os requisitos de segurança tanto do dispositivo quanto da operação do religador, em níveis confiáveis.

Bibliografia

- ALVES, F. R. **Características do Disjuntor para Abertura de Linhas de Transmissão em Vazio**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 159 p., 2006.
- ANSI C37.06-2000. **AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities**. New York, Inc., 2000.
- ANSI/IEEE C37.011-1979. **IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers**, New York, Inc., 1979.
- ANSI/IEEE C37.011-2005. **IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers**. New York, IEEE, Inc., 2005.
- ANSI/IEEE C37.04-1979. **IEEE Standard Rating Structure for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis (Revision of ANSI/IEEE Standard)**, New York, Inc., 1979.
- ANSI/IEEE C62.11-1987. **IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits**, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR-7118. **Disjuntores de Alta Tensão**, Rio de Janeiro, ABNT, 161 p., 1994.
- AZEVÊDO, W. V. S. **Síntese de Redes Equivalentes Dependentes da Frequência e Mitigação de Tensão de Restabelecimento Transitória**. Dissertação de Mestrado, Campina Grande, 2010.
- AZEVÊDO, W. V. S. et al. "Efeitos da Representação de Equivalentes de Redes Elétricas em Análises de TRT: Estudo de Casos". **Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VIII CBQEE)**, Blumenau, agosto 2009. (Nome completo dos autores).
- AZEVÊDO, W. V. S. et al. "Mitigação de Tensão de Restabelecimento Transitória em Equipamentos de Média Tensão". **III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2010)**, 2010. (Nome completo dos autores).

- CCON - Comitê Coordenador de Operações Norte-Nordeste. **Metodologia e Critérios para a Análise de Adequação de Disjuntores quanto à Tensão de Restabelecimento Transitória**, Recife-PE, Junho 1991.
- COLCLASER JR., R. G.; BEEHLER, J. E.; GARRITY, T. F. "A Field Study of Bus-Fault Transient". **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 95, nº 6**, November/December 1976.
- COLCLASER, R. G.; BERKEBILE, L. E.; BUETTNER, D. E. "The Effect Of Capacitors on the Short-Line Fault Component of Transient Recovery Voltage". **IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems**, 1971.
- D'AJUZ, A. et al. Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão, Rio de Janeiro, FURNAS, 1985. 300. (Nome completo dos autores).
- DOMMEL, H. W. **EMTP Theory Book**. Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, B.C., Canadá: [s.n.], 1996.
- DUFOURNET, D.; MONTILLET, G. F. Harmonization of TRVs in ANSI/IEEE and IEC. **Power Engineering Society General Meeting, vol. 1**, June 2005. 1019-1024.
- FERNANDES Jr., D., NOBRE, D. M. et al. "Estudos de TRT em Disjuntores de Classe 15 kV". **III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica - III CONLADIS**, São Paulo - SP, v. I, p. 483-485, 1998. (Nome completo dos autores).
- GARZON, R. D. **High Voltage Circuit Breakers Design and Application**. New York: Marcel Dekker, Inc., 365 p., 1997.
- GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. John Wiley & Sons Inc., New York, 751p.: [s.n.].
- IEC 62271-100. **High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating Current Circuit-Breaker**, October 2006.
- IEEE C37.011-1994 Standard. **Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis**, New York, NY, June 1995.

- IEEE C37.04TM-1999. **IEEE Standard Rating Structure for AC High Voltage Circuit Breakers (Revision of ANSI/IEEE Standard C37.04-1979)**, New York, IEEE, Inc., 1999.
- IEEE Working Group 15.08.09. **Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs**, IEEE Power Engineering Society, Piscataway, NJ 08855-1331, 1991.
- IEEE Working Group 3.4.17. "Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications". **IEEE Transactions on Power Delivery**, EUA, 11(4):1798-1809, 1996.
- JONES, R. A. "Transient Recovery Voltages for Station Auxiliary System Switchgear". **IEEE Transactions on Power Delivery EUA, VOL 3, nº 3**, Julho 1988.
- KIRKLAND, R. S.; DUFOURNET, D. The Harmonization of IEEE and IEC Transient Recovery Voltage Waveforms. **Switchgear Committee Technical Program Archives**, 2007.
- LEUVEN EMTP Center, **ATP - Alternative Transients Program - Rule Book**, Belgium, July 1987.
- NOBRE, D. M. **Estudo de Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT**. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, Brasil, 85 p., 1999.
- 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: Sub-módulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos**, Resolução 1051/07 – 25/09/2007.
- SAELPA - Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba – RP TRT 01/2007 – Versão 1. **Validação do Estudo de TRT Elaborado pela SAELPA: Disjuntores e Religadores de 13,8 kV – Regional Mussurú II (Volume 2 – Análise de cada subestação)**, janeiro 2007.

- SAELPA - Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba – RP TRT 01/2007 – Versão
- 1. Validação do Estudo de TRT Elaborado pela SAELPA: Disjuntores 69 kV – Regional Mussurú II (Volume 1 – Síntese)**, fevereiro, 2007.
- SWINDLER, D. L. et al. “Transient Recovery Voltage Considerations in the Application of Medium-voltage Circuit Breakers. **IEEE Transaction on Industry Applications**, 1997. (Nome completo dos autores).
- WAGNER, C. L.; DUFOURNET, D.; MONTILLET, G. F. Revision of the Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High Voltage Circuit Breakers of IEEE C37.011: A Working Group Paper of the High Voltage Circuit Breaker Subcommittee. **IEE Transaction on Power Delivery**, v.22, n°01, January 2007.
- WANG, X. et al. “Transient Recovery Voltage Investigation of 15 kV Circuit Breaker Failure”. **IPST – International Conference on Power Systems Transients**, Montreal, Canada, June 2005. (Nome completo dos autores).
- WHITAKER, J. C. **AC Power Systems Handbook. 2nd Ed.**, Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 1999.
- ZANNETA Jr., L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo, SP - Brasil: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.