



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

PRISCILA DIAS PEREIRA

**Metodologia para Redução da Tensão de
Restabelecimento Transitória em Disjuntores e
Religadores de Média Tensão**

Campina Grande, Paraíba.

Abril de 2014

PRISCILA DIAS PEREIRA

Metodologia para Redução da Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores e Religadores de Média Tensão

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior

Campina Grande, Paraíba.

Abril de 2014

PRISCILA DIAS PEREIRA

Metodologia para Redução da Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores e Religadores de Média Tensão

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Aprovado em ____ / ____ / _____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador, UFCG

Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

*Ao meu pai, Paulo, a quem
dedico todo meu amor, gratidão
e eterna saudade.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me fornecer saúde, determinação e força para sair de casa e enfrentar esta jornada repleta de surpresas e desafios que foram vencidos.

Agradeço à minha família pelo apoio e amparo, se fazendo sempre presente mesmo com a distância. Em especial aos meus pais, Paulo e Antonia, que nunca faltaram esforços para oferecer estudo de qualidade, fornecendo-me plenas condições e apoio para realizar meus sonhos, e à minha irmã, Paula, por ser sempre um exemplo de foco e determinação para alcançar meus objetivos.

Ao meu amor, Paulo, melhor amigo e companheiro de todas as horas, que sempre me apoiou e incentivou na conclusão deste sonho.

Ao professor Damásio Fernandes Jr. pela atenção, paciência, dedicação e principalmente pelo exemplo de pessoa e profissional.

Aos professores Edmar Candeia e Benedito Luciano pela valiosa contribuição na minha formação acadêmica como tutores do grupo PET.

A Adail e Tchaikovsky por estarem sempre à disposição para prestar qualquer ajuda ou esclarecimento, tornando tudo mais simples durante o curso, além da grande amizade.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os amigos que fui presenteada nesta caminhada, companheiros de curso e de vida, sem os quais não chegaria até aqui.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1 ARCO ELÉTRICO	2
2.2 CORRENTE SUBSEQUENTE	4
2.3 FORMAS DE ONDA DA TRT	5
2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A TRT	8
2.4.1 TIPO E LOCAL DE FALTA	9
2.4.2 TRT EM FALTAS QUILOMÉTRICAS	10
2.4.3 TRT EM FALTAS TERMINAIS	11
3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	13
4 ESTUDO DE CASO	16
4.2 REPRESENTAÇÃO DA REDE TESTE	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5.1 ELIMINAÇÃO DE FALTA TRIFÁSICA NÃO ATERRADA	21
5.2 ELIMINAÇÃO DE FALTA QUILOMÉTRICA	22
6 MEDIDAS MITIGADORAS	22
6.1 INSTALAÇÃO DE CÉLULAS CAPACITIVAS	23
6.2 UTILIZAÇÃO DE VARISTORES DE ZnO	25
7 CONCLUSÃO	31
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).	3
Figura 2 - Corrente Subsequente.	4
Figura 3 - Característica de uma TRT exponencial.	5
Figura 4 - Característica de uma TRT oscilatória.	6
Figura 5 - Característica de uma TRT triangular.	6
Figura 6 - Circuito trifásico simplificado.	7
Figura 7 - Falta trifásica não aterrada no barramento.	9
Figura 8 - Falta trifásica não aterrada no disjuntor.	9
Figura 9 - Falta fase-terra à pequena distância dos terminais do disjuntor.	9
Figura 10 - Falta fase-terra a uma distância l dos terminais do disjuntor.	10
Figura 11 - TRT para falta fase-terra à pequena distância do disjuntor.	11
Figura 12 - Falta no terminal do disjuntor.	11
Figura 13 - Formação da TRT em seguida a interrupção de uma falta terminal.	12
Figura 14: Circuito equivalente para análise da TRT.	12
Figura 15 - Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC.	14
Figura 16 - Representação por dois parâmetros de uma TRT presumida.	16
Figura 17 - Regional Mussuré II: Diagrama da rede de subtransmissão e alta tensão.	17
Figura 18 – Diagrama unifilar do setor de 69 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).	18
Figura 19 – Diagrama unifilar do setor de 13,8 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).	18
Figura 20 – Diagrama unifilar do setor de 69 kV da subestação João Pessoa (JPS).	19
Figura 21 – Diagrama unifilar do setor de 13,8 kV da subestação João Pessoa (JPS).	19
Figura 22 - Efeito das células capacitivas nos terminais do disjuntor sobre a frequência da TRT.	23

Figura 23 - Localização das células de surto para redução da TCTRT.	24
Figura 24 - Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no religador 21L6: Análise do valor de pico e da taxa de crescimento.	24
Figura 25 - Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no religador 21L7: Análise do valor de pico e da taxa de crescimento.	25
Figura 26 - Característica não-linear de tensão e corrente para um varistor de óxido de Zinco.	25
Figura 27 - Dispositivo de ZnO para redução do valor de pico da TRT.	26
Figura 28 - 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.	26
Figura 29 - Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.	27
Figura 30 - Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L7 da SE CPX sob falta trifásica não aterrada.	27
Figura 31 - Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L7 da SE CPX sob falta quilométrica.	27
Figura 32 - Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada.	29
Figura 33 - Corrente no dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do Religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada.	29
Figura 34 - Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do religador 21L7 (CPX) sob falta trifásica não aterrada.	29
Figura 35 - Corrente no dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do Religador 21L7 (CPX) sob falta trifásica não aterrada.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação do fator de amplitude (k_{af}) para disjuntores com nível de tensão inferior a 100 kV.	15
Tabela 2 – Valores padronizados para parametrização das envoltórias da TRT especificada: representação a dois parâmetros (IEC 62271-100/2006).	15
Tabela 3 - Parâmetros de referência da TRT especificada para equipamentos de classe 15 kV – norma ANSI C37.06.	21
Tabela 4 - Síntese dos resultados obtidos para os religadores submetidos à falta trifásica não aterrada.	22
Tabela 5 - Síntese dos resultados obtidos para os religadores submetidos à falta quilométrica.	22
Tabela 7 - Resultados obtidos após inserção de pastilhas de ZnO em paralelo aos religadores 21L7 (CPX) e 21L6 (TBU).	28

RESUMO

A eficiência na interrupção de correntes de falta por parte de disjuntores e religadores visa prevenir possíveis danos causados aos equipamentos em face da ocorrência de curto-circuitos. Durante a eliminação do defeito, condições transitórias severas são impostas pela rede a estes dispositivos seccionadores, solicitando a necessidade do diagnóstico correto da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) que surge entre os seus contatos. Este trabalho tem como objetivo fazer uma fundamentação teórica sobre TRT em sistemas de potência, realizar simulações digitais para sua determinação e identificar alternativas para a redução do valor de pico e da taxa de crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória em disjuntores e religadores. Como resultados da pesquisa, verificou-se que a inserção de dispositivos compostos de Óxido de Zinco (ZnO) em paralelo com os terminais do disjuntor é bastante eficaz na limitação do pico da TRT na condição de supressão de faltas trifásicas não aterradas próximas aos terminais do disjuntor. Observou-se também que a introdução de células capacitivas reduziu significativamente a taxa de crescimento da TRT, onde a localização irá depender do tipo de falta. Cenários de baixa frequência exigem maiores solicitações de energia ao dispositivo mitigador, no entanto, é possível determinar o número de pastilhas necessárias para reduzir a TRT a níveis seguros regidos pelas normas de fabricação dos equipamentos. Os resultados mostram que o dispositivo pode passar a permitir operações qualificadas preliminarmente como proibitivas. Além disso, os recursos financeiros destinados à aquisição de disjuntores e religadores de classe de tensão superior podem ser reduzidos.

Palavras-chave: disjuntores, tensão de restabelecimento transitória, sistemas de potência.

1 INTRODUÇÃO

Considerando os danos que podem ser causados ao sistema elétrico na ocorrência de um curto-circuito, torna-se necessário um estudo detalhado sobre a tensão que aparece no processo de interrupção da passagem da corrente elétrica no circuito, através da abertura do disjuntor. A componente transitória da diferença de potencial que surge entre os pólos do disjuntor, conhecida como tensão de restabelecimento transitória (TRT), pode afetar o bom desempenho do sistema. A fim de amenizar os possíveis prejuízos devido a elevados valores da TRT bem como sua taxa de crescimento, é foco do estudo neste trabalho, apresentar soluções para reduzir os valores de pico e a taxa de crescimento desta tensão.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos realizar uma fundamentação teórica sobre tensão de restabelecimento transitória em sistemas de potência, desenvolver simulações digitais utilizando o programa computacional ATP – *Alternative Transients Program* (Leuven EMTP Center, 1987), para a modelagem do sistema de potência a fim de tornar possível a análise do desempenho dos disjuntores quanto às solicitações de TRT e identificar alternativas para a redução de seu pico e da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energização de uma linha de transmissão é efetuada através do fechamento de um disjuntor, permitindo assim a passagem da corrente elétrica pelo sistema.

Os sistemas elétricos de potência devem ser projetados para atender a situações extremas originadas a partir de fenômenos transitórios, tais como curto-circuitos, operações de manobra e surtos causadores de sobretensões e sobrecorrentes.

Quando há uma falha no sistema, com o objetivo de diminuir os danos que podem se propagar por toda a linha de transmissão, ocorre a abertura dos pólos do disjuntor, causando o isolamento da região onde ocorreu a falha.

Os disjuntores são dispositivos capazes de estabelecer, conduzir e interromper corrente elétrica nas condições normais de circuito e conduzir por um tempo específico e interromper correntes sob condições anormais especificadas de circuito, tais como curto-circuito (Garzon, 1997).

Os fenômenos transitórios acontecem com grande frequência em sistemas de potência, fazendo-se assim necessário, um estudo detalhado sobre suas formas de onda de tensão e corrente em pontos específicos do circuito. Dessa forma, é possível entender como o sistema responde a fenômenos de natureza transitória ou como os sinais produzidos por esta ocorrência se propagam.

Existem vários tipos de fenômenos transitórios conhecidos que ocorrem em sistemas de potência. Um deles será o foco deste estudo, que se refere à abertura de um circuito por um disjuntor cuja ocorrência pode implicar em sobretensões nos equipamentos do sistema (Oleskovicz, 2007).

2.1 ARCO ELÉTRICO

O processo de eliminação de uma falta consiste primeiramente na abertura do disjuntor. A condição de manobra mais severa na qual um disjuntor pode ser submetido é a interrupção de corrente por falta, que quanto maior a corrente, maior será a solicitação imposta aos terminais do disjuntor.

No instante inicial em que ocorre o curto-circuito, a tensão entre os contatos fechados do disjuntor é praticamente nula. Quando os contatos são separados há uma ionização do meio dielétrico na câmara de extinção do disjuntor permitindo que a corrente de curto-circuito continue a ser conduzida, formando um arco elétrico. Tal corrente não pode ser extinta instantaneamente devido à conservação do fluxo magnético nas indutâncias do circuito.

O meio dielétrico do disjuntor trata então de diminuir a temperatura do arco elétrico, que está bastante elevada. Como a linha é de natureza indutiva e a corrente é alternada esse resfriamento irá reduzir a condutividade do arco-elétrico a fim de eliminar a corrente elétrica em sua primeira passagem pelo zero, para evitar maiores sobretensões. Esse sopro apesar de provocar deformação no arco (alongamento), não extinguirá o mesmo, mas auxiliará e tentará interromper seu reacendimento por reiguição térmica, imediatamente após a extinção do arco. Ocorre então o aumento da tensão de arco e a redução da corrente quando esta se aproxima do seu zero natural. Em seguida, o arco se extingue e a corrente de curto-circuito é interrompida.

A capacidade térmica e dielétrica da câmara de extinção começa a ser recuperada. A Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é aquela que surge nos pólos do disjuntor quando o arco elétrico é extinto no interior de sua câmara. Essa tensão tentará reacender o arco, quer seja por reiguição térmica ou por ruptura do dielétrico.

Para que a interrupção da corrente seja garantida, as suportabilidades térmicas e dielétricas do disjuntor devem ser superiores as da TRT. É necessário que o resfriamento do interior da câmara do disjuntor seja mais rápido que o crescimento da TRT. Assim sendo, o

primeiro parâmetro importante da TRT é a taxa de crescimento da TRT (TCRT). Enquanto que, quando os contatos do disjuntor já estão mais afastados um do outro, a suportabilidade dielétrica do meio de extinção deve ser maior que aos valores instantâneos atingidos pela TRT. Caso contrário a falta poderá ser restabelecida. Logo, os valores de pico da TRT constituem-se em parâmetros importantes no estudo dos transitórios em disjuntores.

Portanto, a capacidade de interrupção do disjuntor é determinada pela amplitude da corrente de falta e pela tensão de restabelecimento transitória através de seus contatos.

A tensão de restabelecimento possui duas componentes: A primeira ocorre imediatamente após a interrupção da corrente, é a componente transitória da tensão (TRT). A segunda é a componente de regime permanente, que forma uma linha de referência em torno da qual a componente transitória oscila.

Pode-se considerar que o disjuntor faça a conexão entre dois circuitos elétricos. De um lado contém a fonte, onde há produção de potência, e do outro lado contém a carga, onde ocorre o consumo de potência. A Figura 1 ilustra de maneira simplificada o sistema e apresenta a definição de TRT.

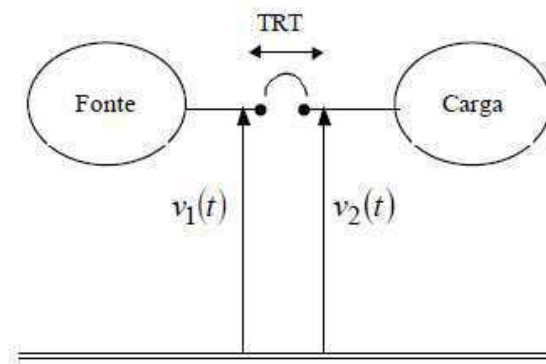


Figura 1- Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

No instante em que há abertura dos contatos do disjuntor, os dois sistemas são separados e passam a redistribuir suas energias independentemente para suas capacitâncias e indutâncias, adaptando-se a um novo estado elétrico. Como consequência, a tensão de restabelecimento, $v_1(t) - v_2(t)$ apresentará oscilações transitórias até que o regime permanente seja atingido.

Para circuitos trifásicos, considera-se a TRT que aparece no primeiro pólo do disjuntor que se abre para eliminação de uma falta, pois essa tensão é geralmente mais elevada que a tensão transitória entre os terminais dos outros dois pólos (Garzon, 1997).

2.2 CORRENTE SUBSEQUENTE

Depois de eliminado, o arco elétrico poderá ser reacendido, podendo causar danos ao sistema, pois o mesmo voltaria a produzir correntes elevadas de curto-circuito.

No instante após a interrupção da corrente, a inércia térmica provoca uma condutância residual no meio extintor. Com essa condutância residual e o surgimento da TRT tem-se uma passagem de corrente subsequente, que auxilia no processo de tentativa de reignição térmica do arco-elétrico fornecendo potência ao meio.

O balanço entre a potência recebida e a potência de perdas pelo processo de convecção, por irradiação e movimento das moléculas dissociadas durante o período de arco, determinará o comportamento da condutância do meio.

A Figura 2 mostra o gráfico dessa corrente alternada. O instante t_0 representa o momento em que ocorre a abertura do disjuntor e o instante t_1 é quando há extinção do arco elétrico (interrupção da corrente de curto-circuito).

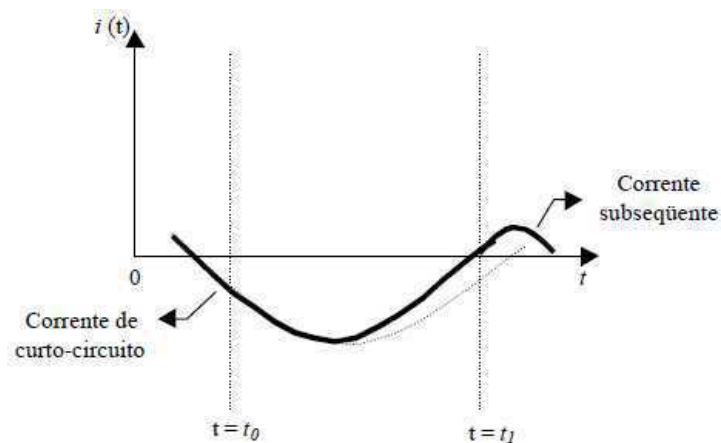


Figura 2 - Corrente Subsequente.

Se a potência de perdas for maior que a potência recebida, a condutância do meio diminuirá até a extinção total da corrente. Se a potência de perdas for inferior à potência recebida, a condutância poderá aumentar, levando a uma reignição térmica (Nobre, 1999; Medeiros, 2007).

Considerando o caso de não ocorrer reignição térmica no período da corrente subsequente, será iniciado o período de esforço dielétrico sobre o meio de extinção de arco. Nesse período, a TRT crescerá no sentido de atingir seu maior valor de pico. Se a rigidez dielétrica do meio aumentar, de modo que sua tensão disruptiva mantenha-se superior à TRT, não ocorrerá reignição por ruptura dielétrica. Entretanto, se a TRT atingir um valor

superior ao valor da tensão do meio dielétrico, poderá ocorrer reignição por ruptura dielétrica.

Através da redução do tempo para a interrupção e da manutenção da tensão de arco aproximadamente zero, tem-se conseguido reduzir sensivelmente a energia dissipada nos disjuntores durante o processo de interrupção de corrente, diminuindo, assim, os esforços térmicos na câmara do disjuntor.

O tempo para a interrupção é o tempo considerado a partir do instante do fechamento dos contatos do relé, que comanda a abertura dos contatos do disjuntor, até o instante em que a corrente seja interrompida. Em disjuntores mais rápidos o tempo de interrupção varia entre 2,5 a 4 ciclos. Em outros disjuntores o tempo de interrupção é maior, chegando até a 8 ciclos.

Quanto à rigidez dielétrica, esta é restabelecida com o auxílio de mecanismos existentes nos disjuntores, que utilizam o próprio meio extintor. A forma dos contatos do disjuntor e a pressão estabelecida no meio também constituem fatores importantes.

2.3 FORMAS DE ONDA DA TRT

As funções que representam a corrente de curto-circuito e a TRT são determinadas pelas características do circuito e do tipo e localização da falta a ser interrompida. São processos que contribuem consideravelmente no processo de operação dos disjuntores.

Em uma TRT, as formas de onda podem ser representadas por uma função exponencial, oscilatória ou triangular. Seu comportamento é de extrema importância no estudo de adequabilidade de disjuntores.

Uma forma de TRT exponencial ocorre quando um disjuntor interrompe uma falta trifásica não aterrada nos seus terminais na presença de, no mínimo, um transformador e uma linha de transmissão conectada na barra da falta. A Figura 3 ilustra esse fenômeno.

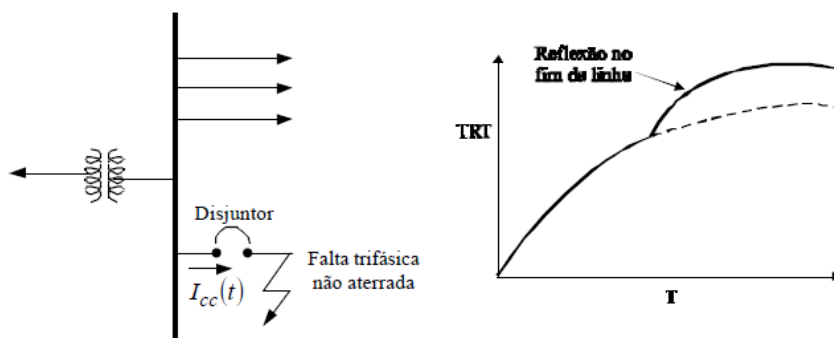


Figura 3 - Característica de uma TRT exponencial.

A forma de TRT oscilatória ilustrada na Figura 4, ocorre quando uma falta é limitada por um transformador ou reator em série, e não há presença de linhas de transmissão ou cabos conectados na barra de falta.

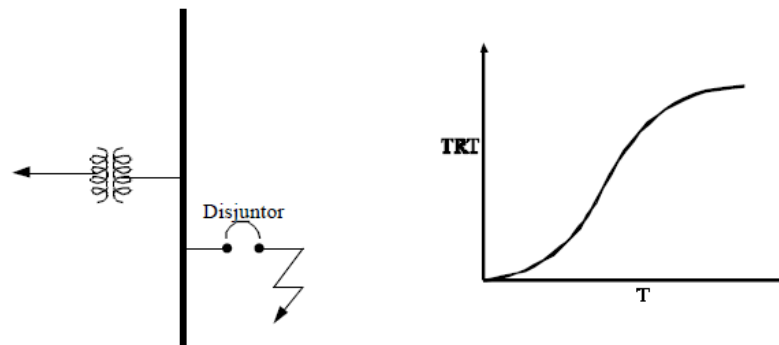


Figura 4 - Característica de uma TRT oscilatória.

Numa falta a pequena distância dos terminais do disjuntor, denominada de falta quilométrica, a TRT apresenta a característica triangular, também conhecida como “dente de serra”. Esta característica é mostrada na Figura 5.

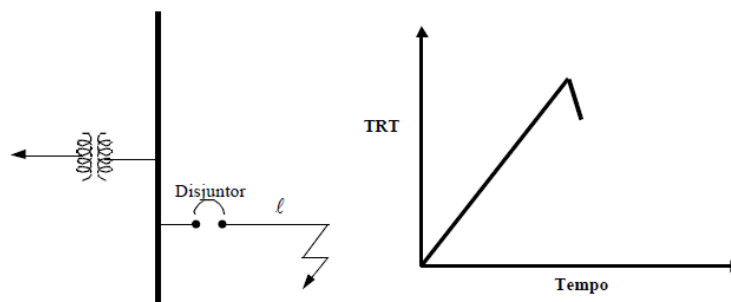


Figura 5 - Característica de uma TRT triangular.

Ao realizar o estudo do desempenho de disjuntores existentes com relação a TRT, geralmente considera-se o pior caso possível.

Quando ocorre uma falta trifásica não aterrada, a tensão em regime permanente entre os terminais do primeiro pólo do disjuntor que se abre, atinge 1,5 p.u., como mostrado abaixo.

Considerando o circuito trifásico simplificado da Figura 6, tem-se que $TRT = V_a - V_d = V_{ad}$ e que I_a , I_b e I_c são as correntes nas fases a, b e c, respectivamente, e Z é a impedância total no terminal do disjuntor no lado da fonte.

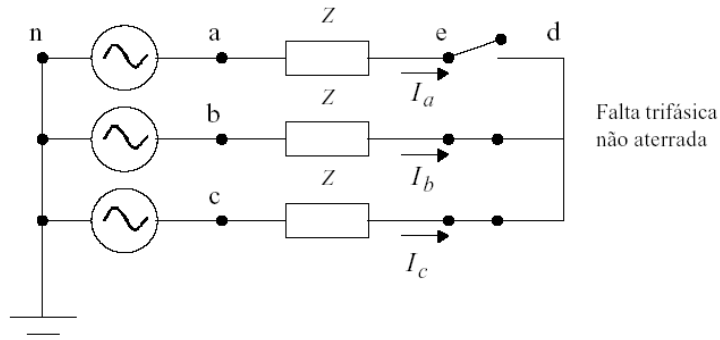


Figura 6 - Circuito trifásico simplificado.

Assim, de acordo com o sistema apresentado na Figura 6, têm-se as seguintes equações:

$$V_{ed} = V_{bd} + V_{nb} + V_{an} + V_{ea} \quad (2.1)$$

$$I_b = -I_c \quad (2.2)$$

$$V_{bd} = I_b \cdot Z \quad (2.3)$$

Como, $I_b = \frac{V_{bc}}{2Z}$, (2.4)

a Equação (2.3) torna-se,

$$V_{bd} = \frac{V_{bc}}{2}. \quad (2.5)$$

Substituindo a Equação (2.5) na Equação (2.1), tem-se que:

$$V_{ed} = \frac{V_{bc}}{2} + V_{nb} + V_{an}. \quad (2.6)$$

Sendo $V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$, então a Equação (2.6) resulta em:

$$V_{ed} = \frac{V_{bn} - V_{cn}}{2} + V_{nb} + V_{an}. \quad (2.7)$$

Fazendo:

$$V_{nb} = -V_{bn}.$$

E substituindo na Equação (2.7), tem-se:

$$V_{ed} = V_{an} - \left(\frac{V_{bn} + V_{cn}}{2} \right) \quad (2.8)$$

Como, $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$,

Fazendo:

$$V_{an} = -(V_{bn} + V_{cn}) \quad (2.9)$$

E substituindo a Equação (2.9) em (2.8), resulta em:

$$TRT = V_{ed} = 1,5.V_{an} . \quad (2.10)$$

Quando ocorre uma falta trifásica aterrada, a corrente de curto-circuito é semelhante à corrente de falta trifásica não aterrada, sendo diferentes as amplitudes atingidas pela TRT. Como a falta trifásica aterrada é menos agressiva que a falta trifásica não aterrada, verificamos que a amplitude da TRT para este caso será menor quando comparada ao caso não aterrado.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A TRT

Os fatores que influenciam a tensão de restabelecimento transitória são: capacitâncias, indutâncias, resistências, tipo e local de falta.

O estudo do comportamento de disjuntores quando estes são submetidos a TRT leva em consideração fatores como tipo e localização da falta que se mostrem mais severos com relação a TRT.

A tensão de restabelecimento transitória é uma função do nível de tensão do sistema e da amplitude do valor da corrente de curto-circuito. A impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor tem grande influência no valor de pico da TRT e na sua taxa de crescimento.

Quando ocorre uma falta nos terminais do disjuntor a corrente de falta é limitada apenas na seção do sistema do lado da fonte, o que ocasiona um valor de corrente de curto-circuito mais elevado para o disjuntor.

Em casos onde a falta é quilométrica, as taxas de crescimento de TRT são ainda maiores, porém com amplitudes de tensão menores que as ocorridas em faltas nos terminais do disjuntor.

No caso de faltas trifásicas, a TRT é particularmente crítica, sendo esta utilizada pelos fabricantes para ensaios com disjuntores.

O tipo de falta possui uma importância significativa no desempenho do disjuntor e no sucesso da interrupção da corrente de curto-circuito.

2.4.1 TIPO E LOCAL DE FALTA

As faltas podem ser de vários tipos, trifásicas aterradas ou não aterradas, bifásica aterrada ou não aterrada, e finalmente a falta pode ser monofásica a terra. Essas faltas podem ser do tipo terminal, quando se verificam nos terminais do disjuntor ou do tipo quilométrica quando ocorrem a alguns quilômetros do equipamento de manobra.

Como explicado anteriormente, é importante verificar a TRT considerando a eliminação de faltas terminais e de faltas monofásicas à pequena distância dos terminais do disjuntor. As condições de falta estudadas são mostradas nas Figuras 7, 8 e 9.

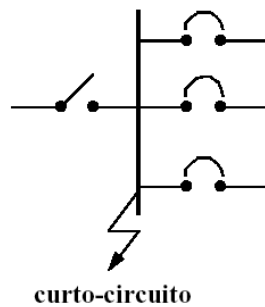


Figura 7 - Falta trifásica não aterrada no barramento.

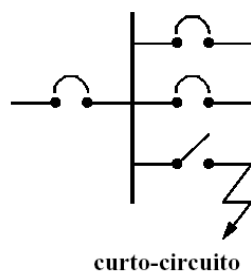


Figura 8 - Falta trifásica não aterrada no disjuntor.

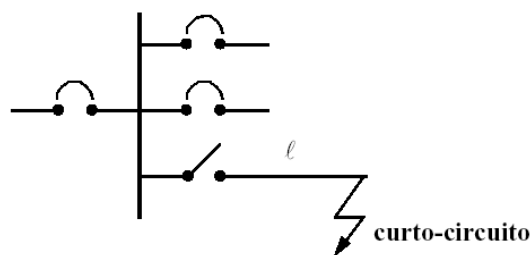


Figura 9 - Falta fase-terra à pequena distância dos terminais do disjuntor.

2.4.2 TRT EM FALTAS QUILOMÉTRICAS

As faltas quilométricas caracterizam-se pelo fato de ocorrer o curto-circuito nas linhas de transmissão a uma pequena distância dos terminais do disjuntor no lado da carga. O valor de pico da TRT produzido é menor, mas sua taxa de crescimento pode alcançar valores elevados, de modo que se o disjuntor não tiver uma capacidade de resfriamento suficientemente grande para compensar a elevação da temperatura e assim evitar a ionização do meio de extinção, haverá a reignição do arco.

A Figura 10 mostra um circuito monofásico representando uma falta fase-terra a pequena distância dos terminais do disjuntor.

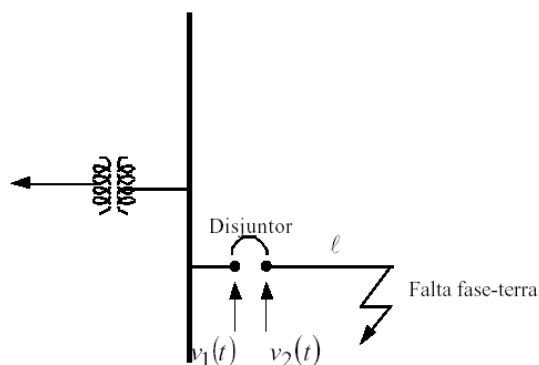


Figura 10 - Falta fase-terra a uma distância l dos terminais do disjuntor.

Após a interrupção de corrente, a tensão que aparece no lado da linha do disjuntor, $V_2(t)$, apresenta uma forma de onda do tipo dente de serra. Considera-se que a interrupção da corrente acontece no instante em que seu valor passar pelo primeiro zero após a abertura do disjuntor. A rampa inicial da tensão impõe condições severas no meio dielétrico do disjuntor, antes que este recupere sua rigidez dielétrica possibilitando uma reignição do arco elétrico.

A forma de onda da tensão no lado da fonte, $V_1(t)$, geralmente é do tipo exponencial-cosseno, mas dependendo do sistema considerado $V_1(t)$ pode assumir a forma de um-menos-cosseno.

A TRT nos terminais do disjuntor pode ser vista na Figura 11.

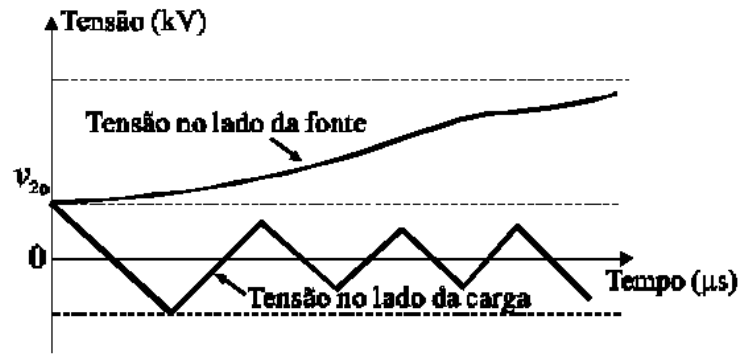


Figura 11 - TRT para falta fase-terra à pequena distância do disjuntor.

A TRT é igual à diferença entre $V_1(t)$ e da onda do tipo dente de serra, $V_2(t)$.

2.4.3 TRT EM FALTAS TERMINAIS

Para que o dispositivo opere corretamente, os picos da TRT não podem ser superiores à suportabilidade dielétrica do meio de extinção. Desse modo, não haverá a ruptura do meio dielétrico. Este parâmetro é considerado, quando os contatos do disjuntor já estão mais afastados entre si e as temperaturas no interior da câmara já são menores, havendo, portanto, menores riscos de reignição térmica. Nas faltas terminais (Figura 12), ocorre a condição mais severa sob o ponto de vista do valor de pico atingido pela TRT.

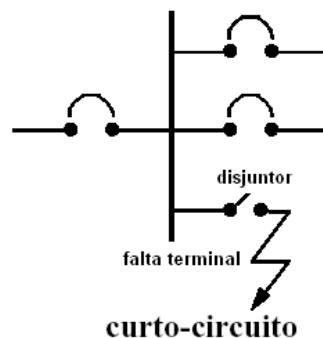


Figura 12 - Falta no terminal do disjuntor.

Para este tipo de falta, a TRT tem uma componente transitória que se superpõe à componente de frequência industrial, como ilustrado na Figura 13.

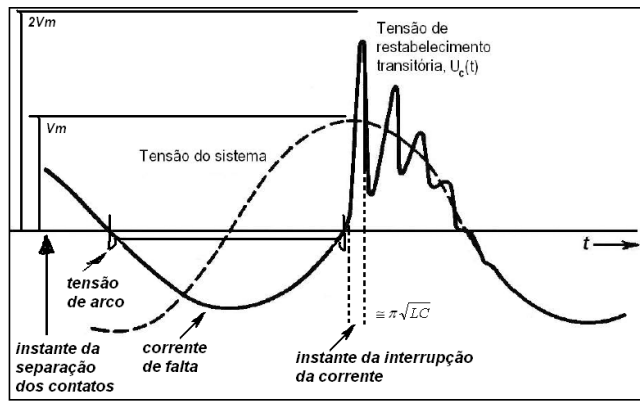


Figura 13 - Formação da TRT em seguida a interrupção de uma falta terminal.

A TRT é calculada abaixo, tomando como referência o circuito equivalente indicado na Figura 14, considerando que as resistências (e os amortecimentos) são ignoradas.

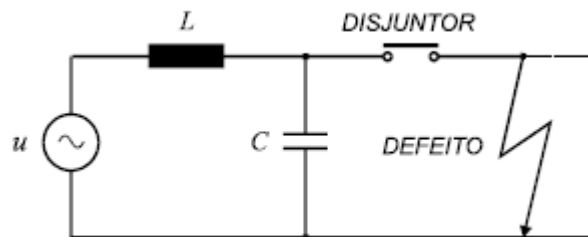


Figura 14: Circuito equivalente para análise da TRT.

Onde:

L : indutância em série equivalente entre fonte e disjuntor.

C : Capacitância para terra (buchas, TCs, transformador e capacitores de equalização do disjuntor).

$$L \frac{di}{dt} + u_c = U_m \cos \omega t, \quad i = C \frac{du_c}{dt} \quad (2.11)$$

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{u_c}{LC} = \frac{U_m}{LC} \cos \omega t, \quad u_c(0) \cong 0 \quad (2.12)$$

Solucionando as equações, temos:

$$u_c(t) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} U_m (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) \quad (2.13)$$

$$\omega_0 \rightarrow kHz, \omega \rightarrow 60 Hz \quad (\omega_0 \gg \omega) \rightarrow \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cong 1 \quad (2.14)$$

$$u_c(t) = U_m (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) \quad (2.15)$$

Se $t = 0$ e $u_c = U_m$ (tensão de pico), o termo em $60 Hz$ varia pouco ($\cong 1$).

$$u_c = U_m (1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.16)$$

Valor máximo da TRT:

$$u_c(\pi/\omega_0) = u_{c,max} = 2U_m \quad (2.17)$$

Se ω_0 é alta, a tensão nos contatos aumenta rapidamente, podendo exceder a rigidez dielétrica do meio extintor, havendo reignição do arco.

3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Quanto à tensão de restabelecimento transitória presumida e especificada de um circuito, as normas estabelecem requisitos específicos para cada situação de falta no sistema: faltas nos terminais do disjuntor e à pequena distância dos seus terminais. A TRT presumida é devida unicamente às características do circuito obtidas em ensaios ou simulações de curto-circuito e a TRT especificada é aquela em que seus parâmetros são considerados como valores de referência.

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

- Para disjuntores de tensão nominal igual ou acima de 100 kV, dispostos em pontos do sistema com elevada relação entre a corrente de curto-circuito e sua máxima capacidade de interrupção (% CNI), a TRT normalmente consiste de um período inicial de alta taxa de crescimento, seguido de um período de menor taxa. Esta envoltória é descrita por três segmentos de reta, definida pelo método de quatro parâmetros.

- Para disjuntores de tensão nominal igual ou inferior a 100 kV, a componente fundamental da TRT é acrescida de uma onda oscilatória de frequência única, e sua envoltória normalmente especificada através de dois segmentos de reta, definida pelo método de dois parâmetros (Figura 15).

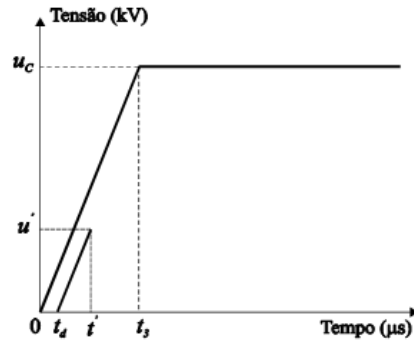


Figura 15 - Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC.

Em que:

- u_c é o maior valor de pico da TRT, em kV;
- t_3 é o tempo para atingir a tensão u_c , em μs ;
- t_d é o retardo nominal, em μs ;
- u' é uma tensão de referência, em kV e
- t' é o tempo para atingir a tensão u' , em μs .

O segmento de reta definindo um retardo é considerado somente para testes de ensaio. Parte de um ponto situado sobre o eixo dos tempos, correspondendo ao retardo nominal, t_d , e se desenvolve paralelamente ao primeiro segmento de reta do traçado de referência da TRT até um ponto correspondente a uma tensão dada u' e a um tempo t' .

Os parâmetros da TRT especificada são definidos como função da tensão nominal do disjuntor (u_r), do fator de primeiro pólo (k_{pp}) e do fator de amplitude (k_{af}). Para disjuntores com nível de tensão inferior a 100 kV, $k_{pp} = 1,5$. O parâmetro k_{af} varia de acordo com o tipo de falta aplicada e segundo a relação entre a corrente de curto-circuito no ponto da falta e a máxima capacidade de interrupção do disjuntor (%CNI). Na Tabela 1 são encontrados os valores de k_{af} , segundo tais especificações.

Tabela 1 – Especificação do fator de amplitude (k_{af}) para disjuntores com nível de tensão inferior a 100 kV.

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

O tempo de referência em que a TRT especificada atinge o máximo valor de pico t_3 , depende do nível de corrente de curto-circuito, simbolizada por fatores de 0,67 (60% CNI) e 0,40 (10 e 30% CNI) em comparação com o valor especificado para 100 % CNI.

Na Tabela 2 são mostrados os valores de parâmetros para obtenção das envoltórias de referência de alguns disjuntores com classe de tensão inferior a 100 kV.

Tabela 2 – Valores padronizados para parametrização das envoltórias da TRT especificada: representação a dois parâmetros (IEC 62271-100/2006).

Tensão nominal u_r (kV)	% CNI (<i>Test Duty</i>)	Fator de primeiro pólo k_{pp} (p.u.)	Fator de amplitude k_{af} (p.u.)	Valor de pico u_c (kV)	Tempo t_3 (μs)	TCTRT (kV/ μs)
15	T100	1,5	1,54	28,3	31	0,91
	T60	1,5	1,65	30,3	21	1,44
	T30	1,5	1,74	32,0	12,5	2,56
	T10	1,5	1,80	33,1	12,5	2,67
72,5	T100	1,5	1,54	137	93	1,47
	T60	1,5	1,65	146	62	2,35
	T30	1,5	1,74	155	37	4,19
	T10	1,5	1,80	160	37	4,32

Os parâmetros representativos da TRT presumida são as coordenadas dos pontos de interseção dos segmentos de reta. Para a envoltória constituída de dois segmentos de reta, os dois parâmetros u_c e t_3 caracterizam-se como coordenadas do ponto de interseção A (Figura 16) da forma de onda da TRT obtida da análise por simulação, medição ou teste.

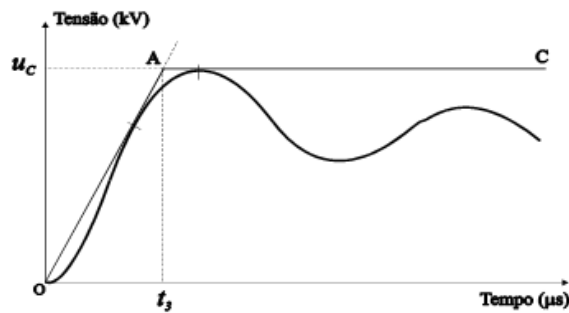


Figura 16 - Representação por dois parâmetros de uma TRT presumida.

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 (GSE/ENERGISA, 2009).

4 ESTUDO DE CASO

4.1 REDE TESTE

Na Figura 17 é apresentado o diagrama do Regional Mussurú II da ENERGISA-PB composto pelas principais subestações da sua rede de subtransmissão e alta tensão que compõem a área leste. Esta área da rede elétrica da concessionária é suprida em 230 kV a partir da subestação Goianinha (GNN) da CHESF e pelos parques eólicos de Vale dos Ventos (VDV) e Millenium (MIL), sendo estes últimos derivados de ramais da subestação Santa Rita (STR).

A partir dos dados coletados será avaliada a necessidade de incorporar dispositivos mitigadores da TRT aos equipamentos de seccionamento, dimensioná-los e apresentar as principais diretrizes a serem incorporadas em sua implantação.

Este trecho do Regional foi escolhido porque estudos preliminares haviam mostrado que alguns equipamentos da SE Cruz do Peixe estavam sob eminência de superação (SAELPA, 2007a; SAELPA, 2007b).

Os disjuntores e religadores foram testados frente às suas respectivas suportabilidades em suprimir faltas não aterradas trifásicas em seus terminais. Foram analisadas também, faltas quilométricas no caso de disjuntores e religadores conectados à jusante.

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.

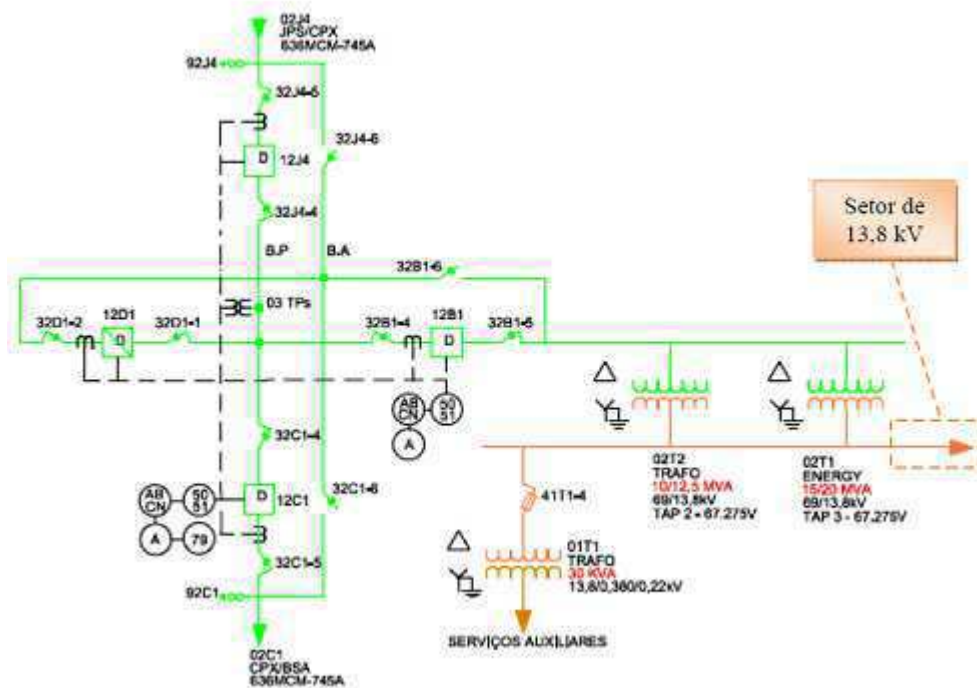


Figura 18 – Diagrama unifilar do setor de 69 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).

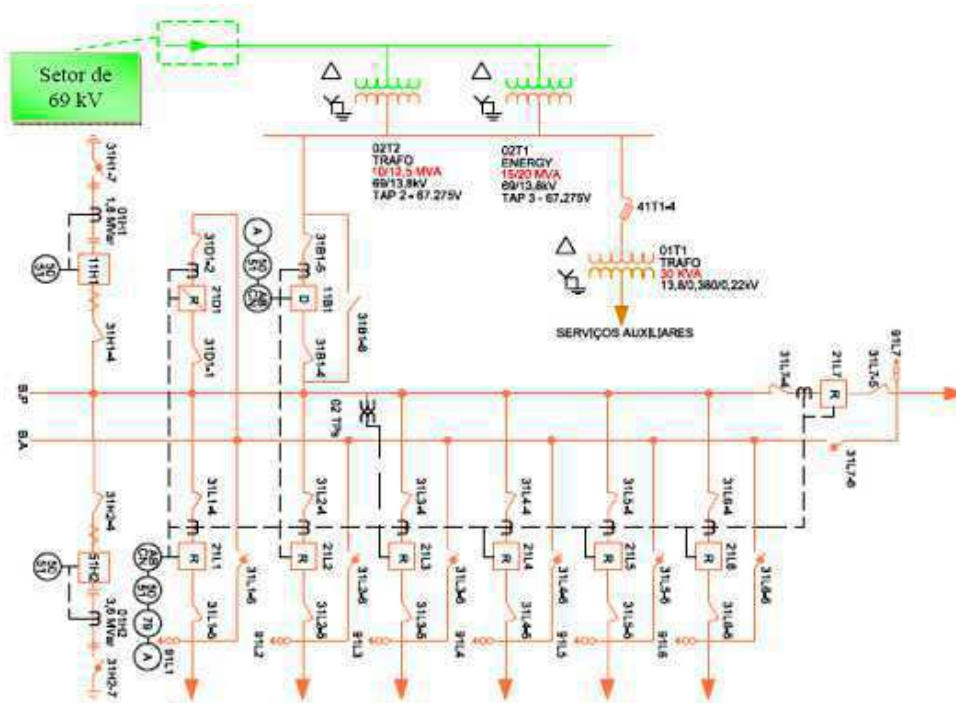


Figura 19 – Diagrama unifilar do setor de 13,8 kV da subestação Cruz do Peixe (CPX).

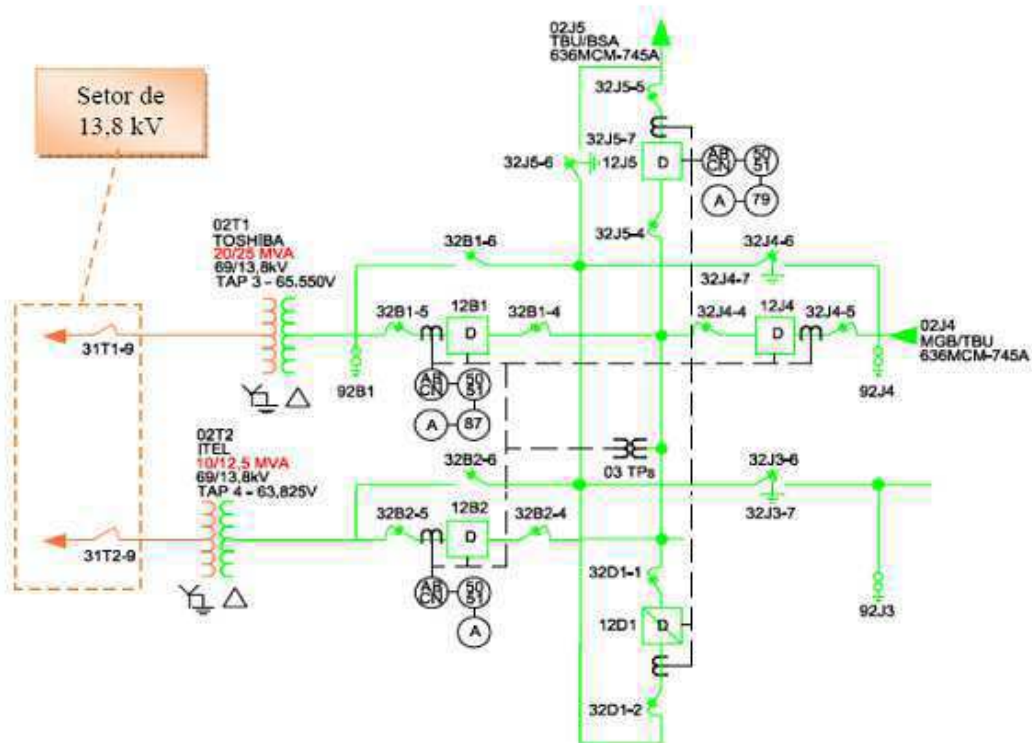
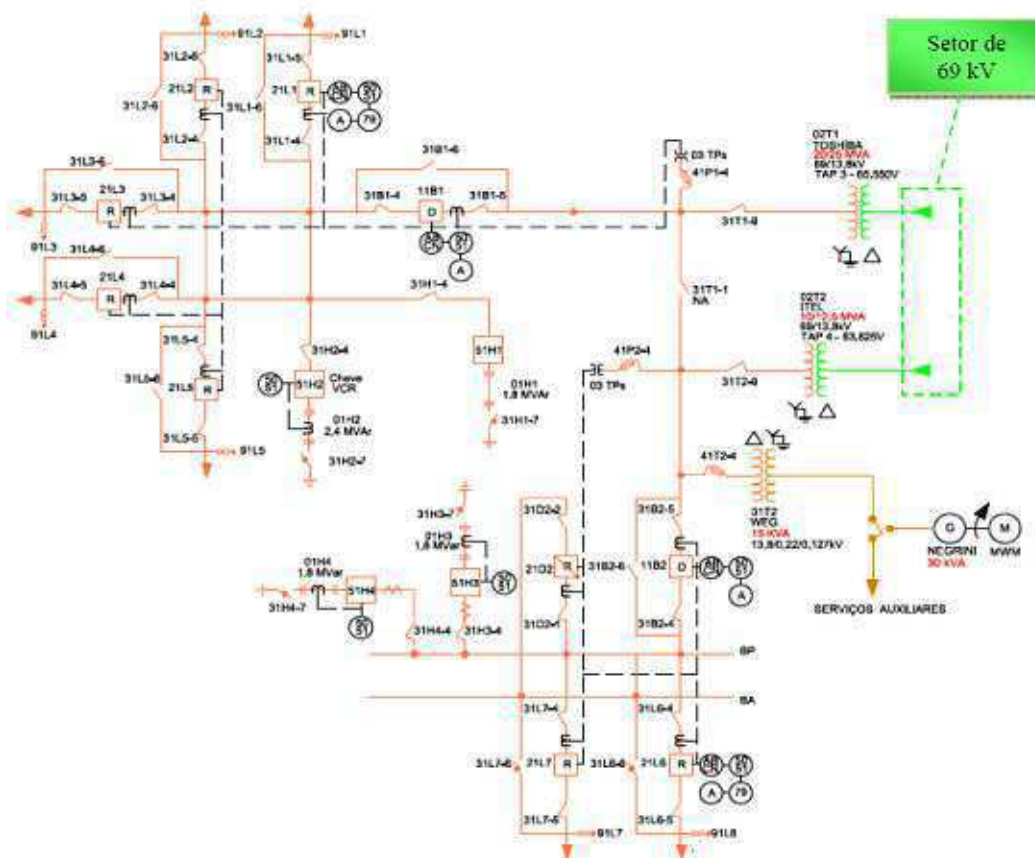


Figura 20 – Diagrama unifilar do setor de 69 kV da subestação João Pessoa (JPS).



4.2 REPRESENTAÇÃO DA REDE TESTE

Os critérios para os componentes e características da rede elétrica utilizados na simulação são apresentados a seguir:

- 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 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram escolhidos dois equipamentos pertencentes ao sistema piloto para realização das simulações digitais: o religador 21L7 da Subestação Cruz do Peixe (CPX) de classe de tensão 15 kV, CNI de 16 kA, de fabricação COOPER POWER, modelo ESV-1516 do ano de 1998; e o religador 21L6 da Subestação Tambaú (TBU) do fabricante Alston, tipo 22017/1/26, também com capacidade de interrupção de 16 kA.

Os equipamentos serão submetidos a testes na ocorrência de faltas trifásicas não aterradas em seus terminais e 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 valores da ANSI de TRT tomados como referência nas simulações são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - 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 (μs)	TCTRT (kV/μs)
Trifásica não aterrada	28,2	36,0	0,89
Quilométrica	18,8	36,0	0,59

5.1 ELIMINAÇÃO DE FALTA TRIFÁSICA NÃO ATERRADA

Realizadas as simulações para falta trifásica não aterrada, observou-se que os religadores 21L6 e 21L7 apresentaram valor de TCTRT abaixo do estabelecido pela norma, tendo condições de ser submetido a esforços térmicos. Porém, o valor de pico do religador 21L6 é superior ao tomado como referência e o religador 21L7 apresentou uma margem de segurança abaixo de 5% quanto ao valor de pico, estando ambos então submetidos a esforços dielétricos maiores do que pode suportar.

Os valores de pico dos respectivos religadores são apresentados na Tabela 4. Estes dados são comparados aos estabelecidos pela norma ANSI.

Tabela 4 - Síntese dos resultados obtidos para os religadores submetidos à falta trifásica não aterrada.

Equipamento (SE)	Simulação	Referência
	Uc (kV)	Uc (kV)
21L7 (CPX)	27,3	28,2
21L6 (TBU)	30,4	28,2

5.2 ELIMINAÇÃO DE FALTA QUILOMÉTRICA

Os valores de pico e TCTRT verificados nas simulações para os religadores 21L6 da Subestação Tambaú e 21L7 da Subestação Cruz do Peixe sob falta quilométrica comparados com os valores estabelecidos sob a norma ANSI são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Síntese dos resultados obtidos para os religadores submetidos à falta quilométrica.

Equipamento (SE)	Simulação		Referência	
	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)
21L7 (CPX)	21,08	1,87	18,8	0,59
21L6 (TBU)	20,7	0,73	18,8	0,59

A partir dos dados coletados, verificou-se que ambos os religadores em estudo apresentaram superação tanto pelo valor de pico (superação dielétrica do meio isolante), quanto pela taxa de crescimento da TRT (superação térmica do meio extintor do arco).

6 MEDIDAS MITIGADORAS

A utilização de limitadores de tensão em um sistema de potência tem a função de impedir que níveis de tensão acima de certo valor especificado possam atingir o circuito, danificando o equipamento no qual eles são submetidos a proteger. Sua utilização correta diminui os recursos fornecidos, uma vez que essa proteção irá conservar o equipamento.

Para os equipamentos que apresentaram superação no valor de pico da TRT ou em sua taxa de crescimento serão apresentadas medidas mitigadoras para reduzir esses valores a fim de deixá-los dentro dos padrões estabelecidos pela norma.

6.1 INSTALAÇÃO DE CÉLULAS CAPACITIVAS

Estudos baseados na teoria de ondas viajantes, realizados por Conclaser *et al* (1971), comprovaram a influência de células capacitivas, na componente transitória da tensão a qual o mesmo esta submetido, quando instaladas nos terminais de um disjuntor frente à solicitação de faltas quilométricas. A introdução de células capacitivas tornou-se uma medida eficaz no trabalho de redução da taxa de crescimento da TRT.

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).

A instalação de células capacitivas incorre 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 22.

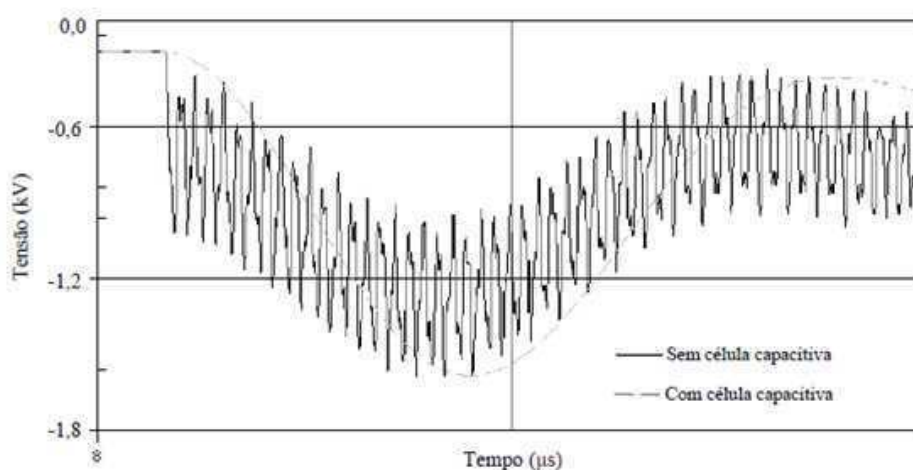


Figura 22 - Efeito das células capacitivas nos terminais do disjuntor sobre a frequência da TRT.

A localização das células de surto à montante ou à jusante do disjuntor, apresentada na Figura 23, 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 à montante, reduzindo assim a frequência de oscilação da tensão $V_1(t)$ do lado da fonte. Já no caso de superação por TCTRT em falta quilométrica, a instalação deve ser realizada nos pólos do equipamento localizados à jusante, ou seja, no lado da carga. Deste modo, minimizam-se as oscilações de alta frequência da tensão $V_2(t)$, características deste tipo de falta.

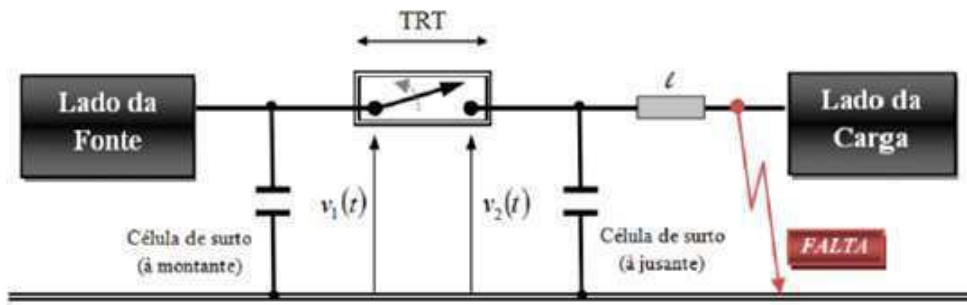


Figura 23 - Localização das células de surto para redução da TCTRT.

Foram instaladas células capacitivas de 150 nF à jusante nos religadores 21L7 da Subestação CPX e 21L6 da Subestação TBU. Os resultados são mostrados em comparação com a forma de onda encontrada sem dispositivo mitigador nas Figuras 24 e 25.

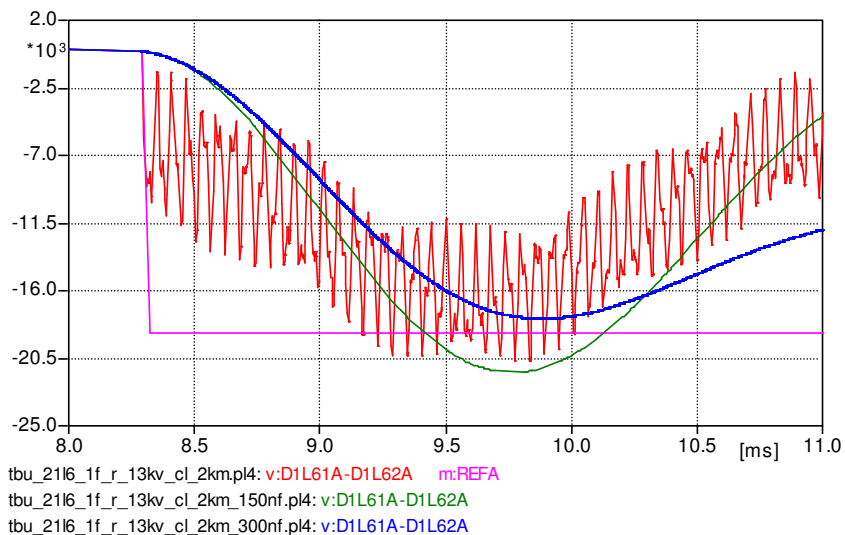


Figura 24 - Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no relizador 21L6: Análise do valor de pico e da taxa de crescimento.

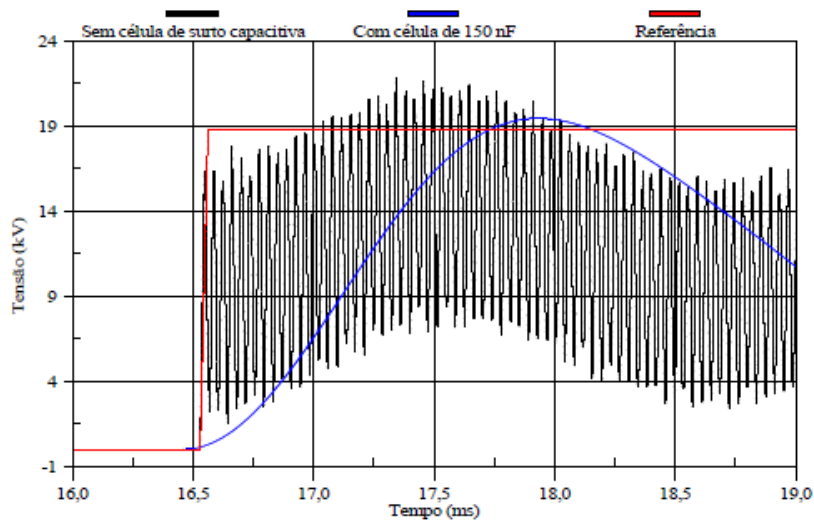


Figura 25 - Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no religador 21L7: Análise do valor de pico e da taxa de crescimento.

Observa-se que a TCTRT em ambos os equipamentos está bem abaixo do valor de referência quando se é adicionado uma célula capacitiva de 150 nF, porém o valor de pico ainda se encontra superado.

6.2 UTILIZAÇÃO DE VARISTORES DE ZnO

Os varistores de óxido metálico, os quais compõem parte dos pára-raios existentes nos sistemas elétricos, possuem uma relação altamente não-linear entre tensão e corrente que lhe permite uma característica particular no isolamento. Apresentando um perfil resistivo elevado, ele inibe a absorção da corrente, comportando-se praticamente como um circuito aberto. Em cenários de sobretensão, sua resistência se mostra relativamente baixa, permitindo a absorção de parte da energia dissipada por surtos na rede. Na Figura 26 é mostrada a característica $V-I$ para um varistor de óxido de Zinco (ZnO) de padrão comercial.

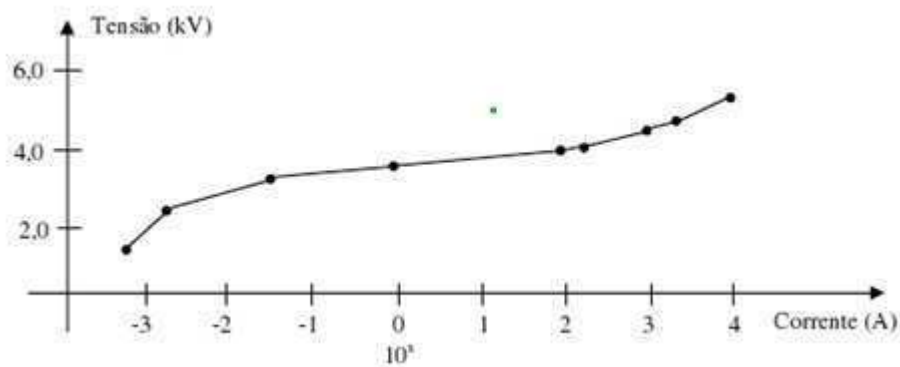


Figura 26 - Característica não-linear de tensão e corrente para um varistor de óxido de Zinco.

Uma solução investigada para redução do valor de pico da TRT é a instalação de um dispositivo à base de varistores de ZnO localizado em paralelo com os terminais do disjuntor, conforme é mostrado na Figura 27.

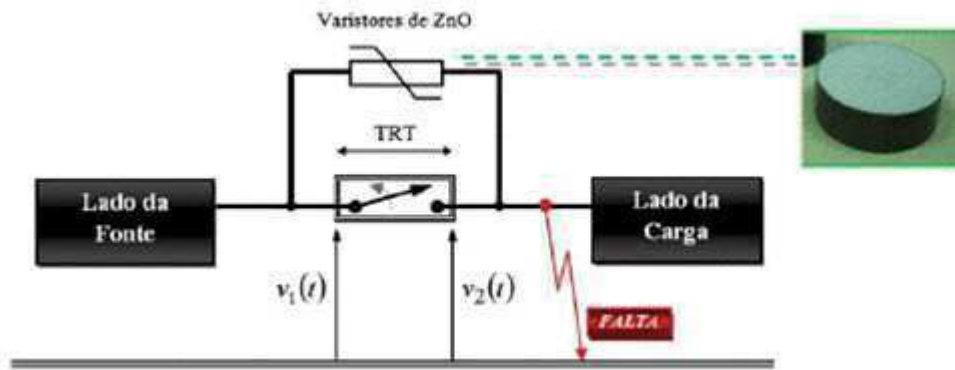


Figura 27 - Dispositivo de ZnO para redução do valor de pico da TRT.

A determinação da quantidade de pastilhas necessárias para reduzir o fenômeno transitório a níveis seguros requer análises fundamentadas nas características do evento transitório sob estudo. Destaca-se dentre os requisitos de dimensionamento a análise da energia suportável por parte do varistor e o perfil da máxima corrente a que o mesmo é submetido.

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 a seguir.

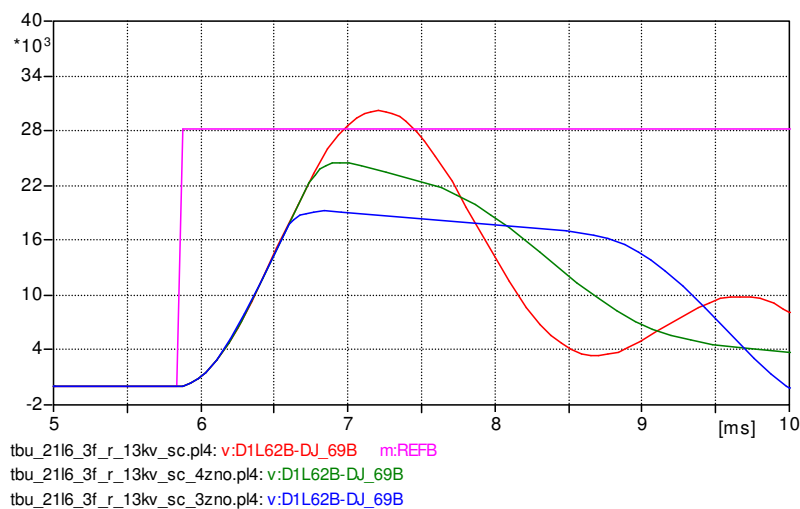


Figura 28 - Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L6 da SE TBU sob falta trifásica não aterrada.

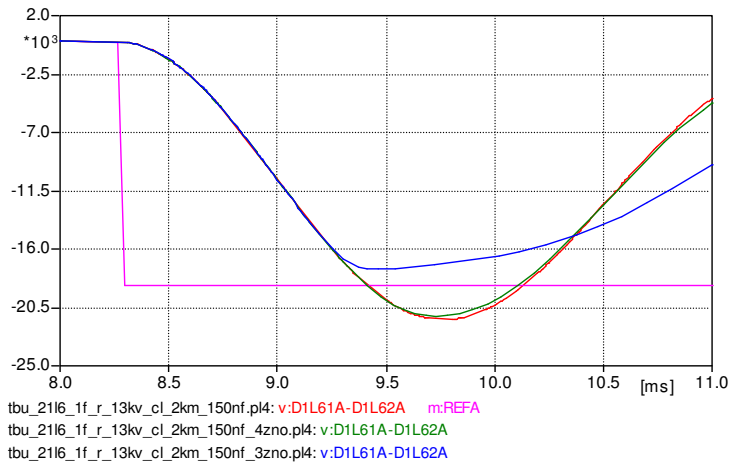


Figura 29 - Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L6 da SE TBU sob falta quilométrica.

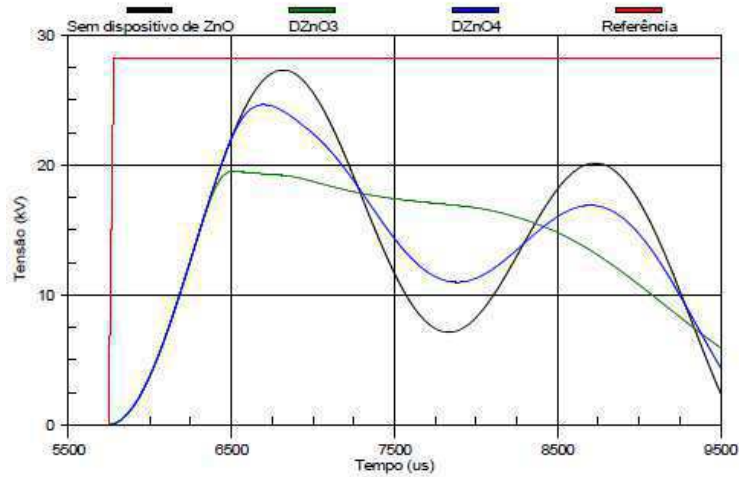


Figura 30 - Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L7 da SE CPX sob falta trifásica não aterrada.

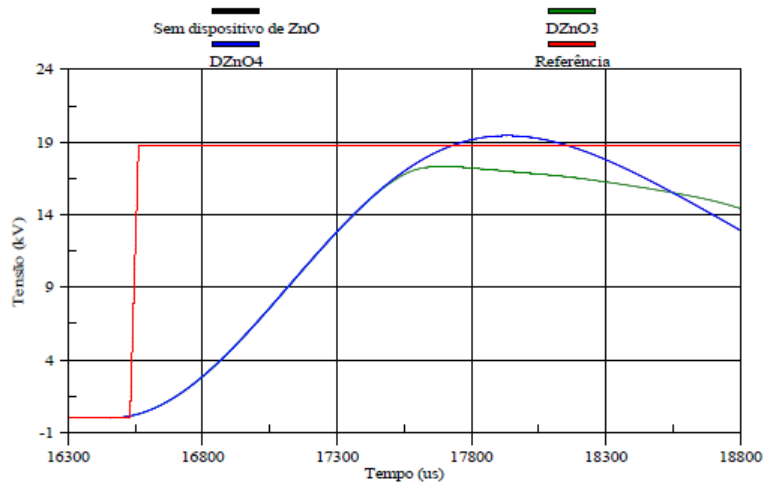


Figura 31 - Efeito na TRT após inserção de pastilhas de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do religador 21L7 da SE CPX sob falta quilométrica.

Na Tabela 6 é mostrada uma síntese dos resultados obtidos nas simulações utilizando o dispositivo mitigador de ZnO para os religadores 21L7 da SE CPX e 21L6 da SE TBU.

Tabela 6 - Resultados obtidos após inserção de pastilhas de ZnO em paralelo aos religadores 21L7 (CPX) e 21L6 (TBU).

Equipamento (SE)	Tipo de Falta	Pastilhas de ZnO	Simulação		Referência	
			Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)
21L7 (CPX)	Trifásica	3	19,5	0,02	28,2	0,89
		4	24,6	0,02		
	Quilométrica	3 + células capacitivas	17,3	0,18	18,8	0,59
		4 + células capacitivas	19,4	0,18		
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		

Observa-se que quando submetidos à falta quilométrica com a utilização de 4 pastilhas de varistores, os equipamentos continuam superados por valor de pico. Já quando são utilizados 3 discos de ZnO, são encontrados valores de pico da TRT abaixo dos aceitáveis pela norma, sendo esta a aplicação recomendável. Os valores para TCTRT não sofrem alterações significativas.

Para falta trifásica não aterrada nos terminais dos religadores 21L6 e 21L7, 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 ou 4 pastilhas de ZnO obteve-se um valor de pico abaixo do valor de referência para ambos os religadores. Os valores para TCTRT não sofrem alterações significativas.

Neste 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 para os religadores 21L6 e 21L7, respectivamente, são mostradas nas Figuras 32 a 35.

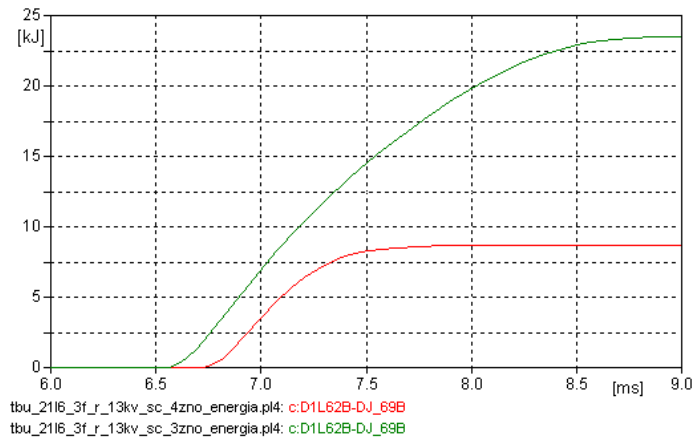


Figura 32 - Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada.

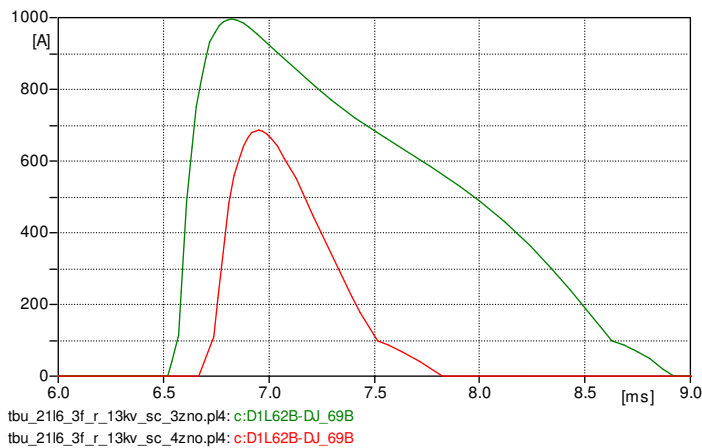


Figura 33 - Corrente no dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do Religador 21L6 (TBU) sob falta trifásica não aterrada.

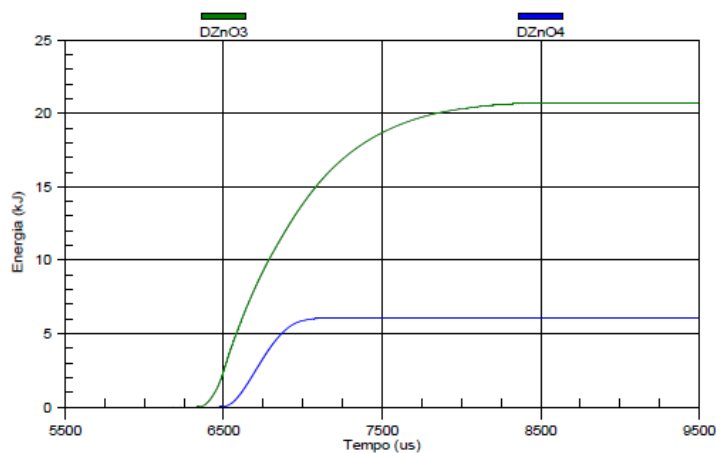


Figura 34 - Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do religador 21L7 (CPX) sob falta trifásica não aterrada.

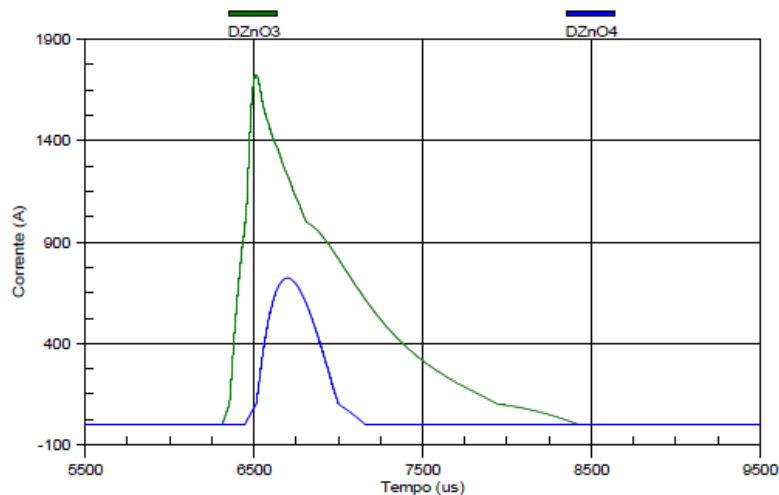


Figura 35 - Corrente no dispositivo de ZnO (3 e 4 pastilhas) em paralelo com os terminais do Religador 21L7 (CPX) sob falta trifásica não aterrada.

A partir dos gráficos, constata-se que a utilização de 4 pastilhas apresenta valores de energia absorvida e corrente inferiores quando comparados aos valores obtidos na aplicação de 3 pastilhas, sendo então mais apropriada e segura sua aplicação no caso de falta trifásica não aterrada.

7 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o uso dos dispositivos de óxido de Zinco (ZnO) bem como a instalação de células capacitivas em disjuntores ou religadores é bastante eficaz para reduzir o valor de pico e a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TRT). Os resultados das simulações digitais comprovam a eficácia do limitador, provendo perspectivas para sua implementação em disjuntores e religadores de média tensão. Na caracterização dos requisitos de dimensionamento, nota-se que embora cenários de faltas quilométricas solicitem baixa corrente e energia ao dispositivo, sua avaliação é essencial para a determinação do número de pastilhas necessárias na composição do dispositivo.

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.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevêdo, W. V. S. *Equivalentes de Redes Elétricas e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- Garzon, R. D. *High Voltage Circuit Breakers Design and Applications*. New York, Marcel Dekker, Inc., 1997.
- GSE/ENERGISA. *Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Média e Alta Tensão Devido às Solicitações de TRT e de Surtos Decorrentes de Manobras em Banco de Capacitores*. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, Relatório do 1º Trimestre, Campina Grande, 2009.
- IEC 62271-100. *High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating Current Circuit-Breaker*. Edition 1.2, October 2006.
- Leuven EMTP Center. *ATP – Alternative Transients Program – Rule Book*, Heverlee, Belgium, July 1987.
- Medeiros, L. D. C. *Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores de Alta Tensão*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- Nobre, D. M. *Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 1999.
- Oleskovicz, M. *Qualidade da Energia Elétrica*. Universidade de São Paulo – USP, 2007.
- Pereira, M. P, Amon Filho, J. *Curso Básico sobre Utilização do ATP*. Novembro, 1996.

