

REDUÇÃO DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA: DISCUSSÃO DE MEDIDAS E AVANÇOS

Wilker Victor da Silva AZEVÊDO (1); Washington Luiz Araújo NEVES (2); Damásio FERNANDES Júnior (2); Benemar Alencar SOUZA (2)

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB (Campus Cajazeiras), Rua José Antônio da Silva, s/nº, Jardim Oásis, Cajazeiras - PB, e-mail: wilker_victor@yahoo.com.br,

(2) Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB, e-mails: waneves@dee.ufcg.edu.br, damasio@dee.ufcg.edu.br, benemar@dee.ufcg.edu.br

RESUMO

O aumento da confiabilidade operativa das redes de subtransmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica requer a análise da superação de equipamentos de manobra frente às solicitações térmica e dielétrica provocadas pela supressão de curto-circuitos nos sistemas elétricos. Dentre os requisitos para dimensionamento de disjuntores e religadores, faz-se fundamental avaliar a suportabilidade destes no que concerne à Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) que surge entre seus terminais. Sob tal foco, este trabalho sintetiza os principais desenvolvimentos inerentes à adoção de medidas mitigadoras para ajuste das solicitações que se apresentam acima dos limiares admissíveis. Discutem-se medidas para redução da taxa de crescimento e do valor de pico da TRT, parâmetros essenciais para o sucesso na interrupção de curto-circuitos. Adicionalmente, são expostos avanços recentes relativos à consecução de um dispositivo a base de células de óxido metálico para limitar as solicitações dielétricas no meio de extinção do arco elétrico. Análises realizadas através de simulações digitais mostram perspectivas de minimização dos subsídios financeiros destinados pelas concessionárias para substituição de equipamentos superados.

Palavras-chave: Tensão de Restabelecimento Transitória, Redução da TRT, Dispositivo de ZnO, Medidas de Mitigação, Transitórios Eletromagnéticos

1. INTRODUÇÃO

No contexto das sobretensões de manobra, o caráter cíclico relativo à análise de superação de disjuntores e religadores evidencia a necessidade de especificação dos requisitos impostos a estes equipamentos em face da crescente expansão e reconfiguração das redes elétricas. Este tema é foco de pesquisas por parte de concessionárias do setor elétrico devido à necessidade de maior confiabilidade em análises de planejamento e, conseqüentemente, segurança operativa. Como motivação adicional, reporta-se a minimização de dispêndios financeiros provenientes do tempo de indisponibilidade dos sistemas elétricos devido à falha dos equipamentos além da redução de custos associados com a substituição de disjuntores e religadores por outros de classe de tensão superior.

Tensão de Restabelecimento Transitória é o termo utilizado para especificar a componente transitória da tensão que surge entre os terminais do equipamento de manobra quando da sua abertura sob eliminação de uma falta no sistema elétrico. Na Figura 1 é apresentado o perfil de TRT nos três pólos de um disjuntor de classe de tensão 72,5 kV após a eliminação de uma corrente de curto-circuito decorrente de falta trifásica não aterrada em seus terminais. A tensão no primeiro pólo a suprimir a falta é aquela considerada para análise visto que é a mais elevada quando inexiste discordância entre fases na abertura dos contatos.

Nos instantes iniciais que sucedem a separação mecânica dos contatos dos pólos, se estabelece um caminho ionizado até a passagem da corrente pelo zero. O equipamento é solicitado a suportar termicamente a energia dissipada através do arco de alta intensidade na câmara de extinção. O elevado gradiente da TRT nos primeiros microssegundos após o zero da corrente contribui para a elevação de temperatura e pressão, acarretando no restabelecimento térmico caso sua taxa de crescimento (TCTRT) (medida em kV/μs) seja superior às condições suportáveis pelo dispositivo seccionador durante o resfriamento do arco.

Após a extinção do arco, a condutância da sua coluna residual tende a zero. Os mecanismos internos tentam recuperar as características dielétricas do meio isolante, ao passo que, simultaneamente, a solicitação de

tensão entre os contatos atua em sentido contrário, podendo provocar reignição caso o valor de pico (U_c) da TRT seja superior à tensão disruptiva do meio isolante. Além da falha do equipamento, o reacendimento do arco pode provocar os mesmos danos estruturais irreversíveis.

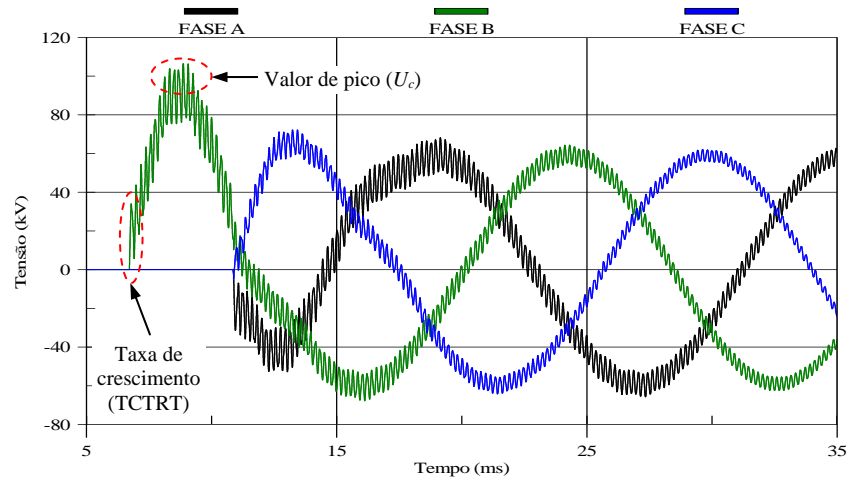


Figura 1 – TRT em um disjuntor de classe de tensão 72,5 kV após a eliminação de falta trifásica não aterrada

Em estudos de adequabilidade de equipamentos quanto à TRT, a abordagem dos analistas responsáveis pelo planejamento envolve normalmente cinco etapas: modelagem, especificação, aferição, mitigação e implementação. Parte do processo é conduzido através de plataformas de simulação digital do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Sinteticamente, tais etapas incluem a representação de componentes do sistema elétrico na faixa de frequência deste fenômeno transitório (que pode atingir até dezenas de kHz), o estudo das normas técnicas vigentes, a comparação entre valores de simulação e limites especificados pelo fabricante do equipamento, a adoção de medidas para reduzir a taxa de crescimento e o pico da TRT, além da implantação destas medidas na subestação. Os dois últimos casos se aplicam aos cenários em que o equipamento sob análise não se encontra apropriado para eliminar determinadas faltas na rede elétrica.

Gerenciar o sistema de potência a fim de que sua operação seja confiável e segura acarreta custos às concessionárias de energia elétrica quando da adoção de medidas mitigadoras. Neste caso, é fundamental que o aporte destinado à aquisição de dispositivos para reduzir a TRT sejam inferiores aos gastos que seriam normalmente aplicados na substituição do equipamento por outro com características térmicas e dielétricas especiais. Na próxima seção, uma sinopse é apresentada com foco a estas medidas.

2. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

No que se refere às propostas para mitigação de cenários de severidade desse tipo de sobretensão, quando a taxa de crescimento (TCTRT) ultrapassa o limite especificado por norma, recomenda-se em geral a instalação de células de surto capacitivas (Figura 2) (COLCLASER *et al*, 1971) para reduzir a frequência de oscilação da TRT (Figura 3).

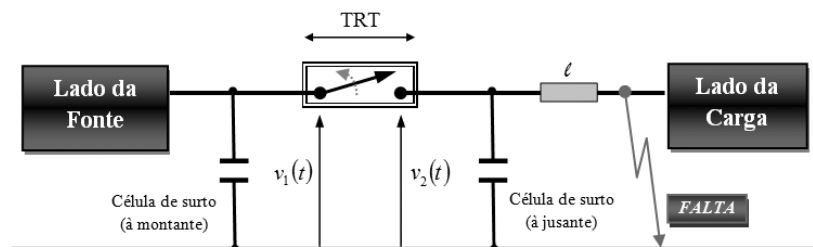


Figura 2 – Célula capacitiva para redução da taxa de crescimento da TRT

A disposição de células capacitivas no terminal mais próximo da falta é recomendada quando o equipamento seccionador se encontra superado por TCTRT sob eliminação de falta quilométrica (curto-circuito fase-terra a alguns quilômetros à jusante do equipamento). Neste cenário, tem-se como foco a minimização das oscilações de alta frequência da tensão $v_2(t)$ à jusante do disjuntor. Por sua vez, a localização das células de surto no lado da fonte é envidada quando se detecta condição de superação na análise de falta terminal trifásica não aterrada, permitindo a redução da frequência de oscilação da tensão $v_1(t)$ no lado da fonte.

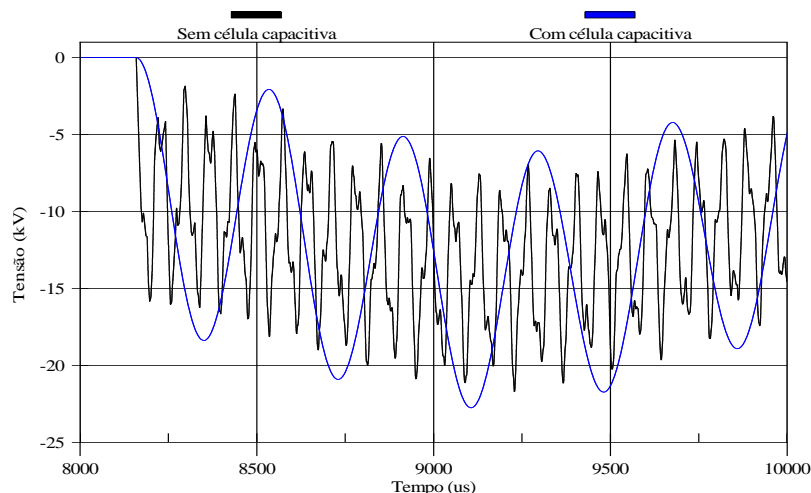
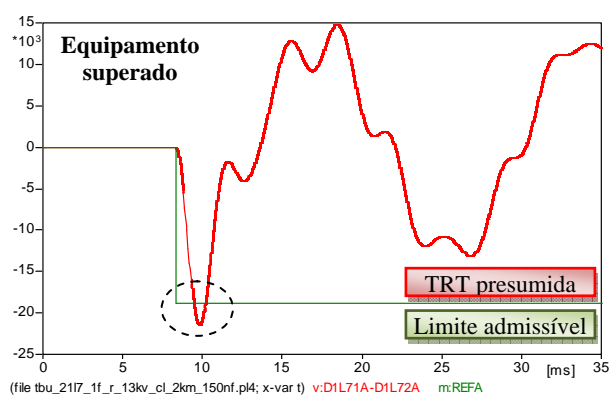


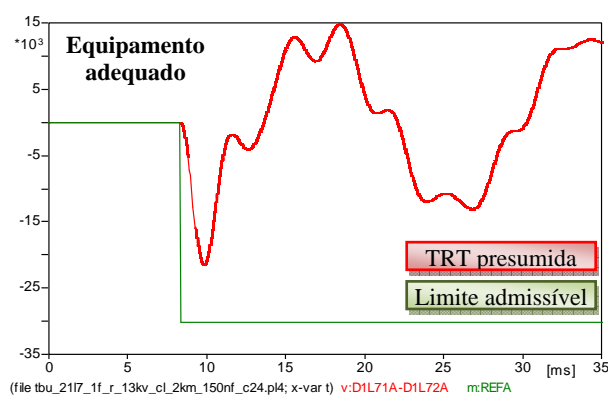
Figura 3 – Efeito de células capacitivas sobre a Taxa de Crescimento da TRT em um religador de classe 15 kV

No que se refere ao arranjo dos barramentos da subestação, observa-se que a depender da disposição esquemática dos disjuntores, pode haver distinção no número (ou potência reativa) das células capacitivas necessárias para minimização da taxa de crescimento de um ou mais equipamentos (COLCLASER *et al*, 1971). Em nível de 13,8 kV normalmente são utilizadas células da ordem de 150 a 250 nF ou, provisoriamente, unidades de bancos de capacitores da ordem de 50 kvar (ALVES, 2006). Este tipo de procedimento em geral não proporciona alterações no valor máximo da TRT.

Em relação aos estresses dielétricos na câmara de extinção, se o valor de pico da TRT é superior ao limite regido por norma, são adotadas restrições relacionadas a patamares específicos de carga, transferência de comando de abertura (*trip*) ou, mais comumente, o equipamento é substituído por outro de classe de tensão superior (WANG *et al*, 2005; ALVES, 2006; COSTA *et al*, 2009), fato apresentado na Figura 4.



(a) Equipamento de classe de tensão 15 kV



(b) Equipamento de classe de tensão 24 kV

Figura 4 – Simulação digital para análise de medida mitigadora: Substituição de equipamento superado por outro de classe de tensão superior - subestação Cruz do Peixe (ENERGISA-PB)

Em termos dos custos apenas com a compra de um novo equipamento (excluídos os custos operacionais para deslocamento de equipe técnica, desligamento da rede, transferência de carga, etc.), dois casos são citados a seguir para fins de exemplo:

- (1) O preço médio de um disjuntor de classe 15,0 kV é de R\$ 45.000,00 (quarenta e cinco mil reais) e o de um disjuntor de classe imediatamente superior é de R\$ 55.000,00 (cinquenta e cinco mil reais), perfazendo uma diferença de R\$ 10.000,00 (dez mil reais).
- (2) O preço médio de um disjuntor de classe 72,5 kV é de cerca de R\$70.000,00 (setenta mil reais), enquanto que um disjuntor de classe imediatamente superior é de R\$ 120.000,00 (cento e vinte mil reais), perfazendo uma diferença de R\$50.000,00 (cinquenta mil reais).

Como pode ser visto, para substituir um equipamento superado por outro de classe de tensão imediatamente superior, as concessionárias devem destinar um elevado aporte financeiro, o que tem suscitado ao longo dos

últimos anos a busca por uma alternativa de viabilidade técnico-econômica para reduzir o pico da TRT (NOBRE *et al*, 2001; AZEVÊDO, 2010; AZEVÊDO *et al*, 2010).

O uso de resistores de abertura é factível para equipamentos de alta e extra-alta tensão, sendo instalados em câmaras auxiliares em paralelo com a câmara principal do disjuntor. Seu uso para reduzir a sobretensão a valores abaixo da suportabilidade do equipamento é efetivo, contudo esta solução não é aplicável em média tensão em virtude do seu elevado custo quando comparado com o custo do disjuntor (ALVES, 2006).

No fim da década de 90, Nobre *et al* (2001) publicaram resultados de estudos sobre o redimensionamento de disjuntores de classe 15 kV na subestação Angelim da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). Em virtude dos cenários de severidade detectados, simulações digitais foram realizadas com o uso de varistores de óxido de zinco em cascata (entre os terminais dos dispositivos) para verificar sua eficácia na redução do pico da TRT. De fato, devido a propriedade não linear entre tensão e corrente, o dispositivo de ZnO utilizado com esta aplicação (Figura 5) se mostrava satisfatório em cenários de elevada sollicitação dielétrica. Foi constatada uma absorção de energia bem abaixo da que o mesmo poderia dissipar na eliminação de falta trifásica com frequência da ordem de dezenas de kHz, no entanto, esta não é a condição mais severa a que o dispositivo estará submetido (AZEVEDO, 2010).

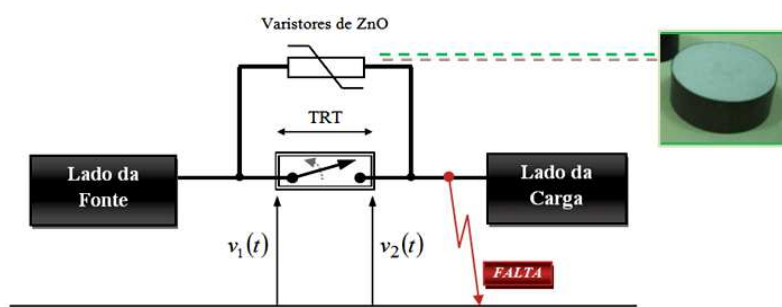


Figura 5 – Dispositivo de ZnO para redução do pico da TRT

Comparado com os custos para substituição dos equipamentos superados e os dispêndios provocados pela energia não suprida quando da ocorrência de falha, o investimento em um dispositivo composto de varistores de ZnO pode mostrar-se atrativo financeiramente face a disponibilidade comercial dos varistores e a simplicidade da estrutura física do dispositivo.

3. AVANÇOS RECENTES

3.1 Varistores de Óxido de Zinco

O uso de limitadores de tensão em sistemas de potência visa impedir que níveis acima de certo patamar especificado na coordenação do isolamento possam alcançar os equipamentos para os quais fornecem proteção. A sua correta seleção pode redundar em diminuição de recursos aplicados, uma vez que o isolamento se constitui em importante parcela no custo do equipamento (D'AJUZ *et al*, 1987).

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. Durante operação normal do sistema, o mesmo exibe um perfil resistivo bastante elevado, inibindo a absorção de corrente, praticamente se comportando 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.

Pesquisas recentes têm avaliado o dimensionamento do número de pastilhas que devem compor o dispositivo, a análise de energia absorvida e a caracterização das condições mais severas, dispondo o dispositivo a base de varistores de ZnO em paralelo com os terminais do equipamento seccionador (Figura 5) (AZEVEDO *et al*, 2010). Além deste caso, um avanço apresentado neste trabalho será a aplicação do dispositivo em um disjuntor de classe 72,5 kV, já prevendo as condições mais críticas quanto à sollicitação dielétrica (AZEVEDO, 2010).

Dois tipos de varistores cilíndricos de uso comercial serão avaliados (Figura 6) através de simulação digital, sendo um para cada nível de tensão. O varistor Tipo 1 tem dimensões de 23 mm de altura por 64 mm de diâmetro com uma tensão nominal de 3,5 kV, presente na composição do dispositivo entre os terminais de

equipamentos classe 15 kV. O varistor Tipo 2 tem altura 45,8 mm e diâmetro 38,3 mm com tensão nominal 7,5 kV, compondo o dispositivo que será usado em equipamentos classe 72,5 kV. São apresentadas nas Figuras 7a e 7b as características Tensão x Corrente para as duas pastilhas de ZnO utilizadas.

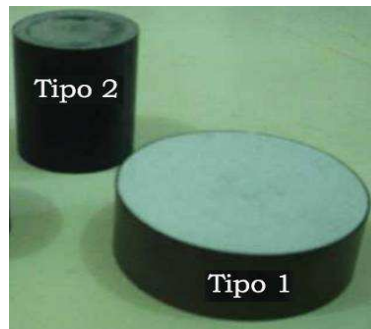


Figura 6 – Fotografia dos tipos de varistores de ZnO utilizados nos estudos

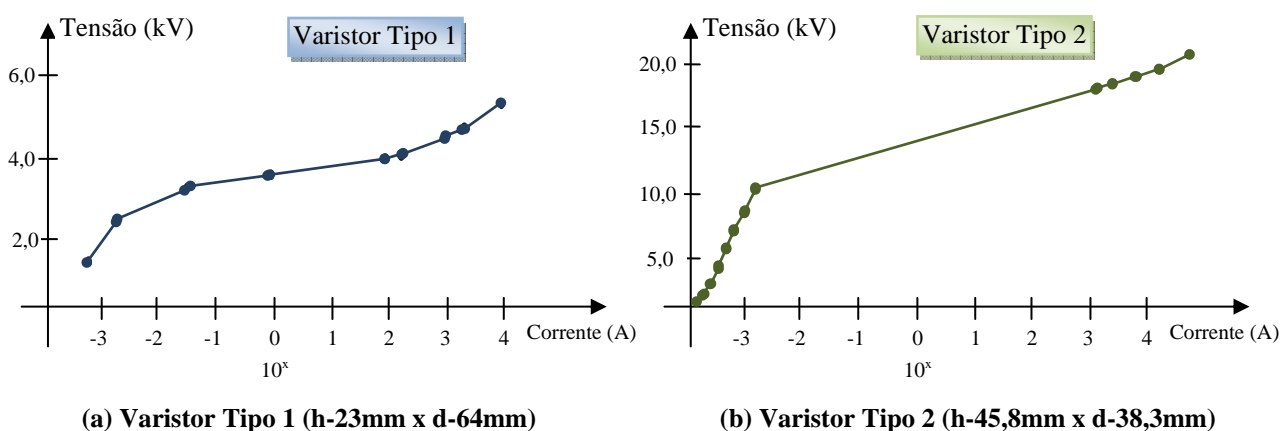


Figura 7 – Característica Tensão x Corrente para varistores de ZnO

A seguir são expostos os resultados do desempenho dispositivo em equipamentos de uma subestação de distribuição real.

3.2 Aplicação do Dispositivo em Equipamentos de Média Tensão

Estudos de planejamento para redimensionamento de equipamentos de média tensão foram realizados na subestação Cruz do Peixe (Figura 8) do Regional Mussurê II da ENERGISA, concessionária que atua na área geoeletrica que inclui o estado da Paraíba. Esta subestação atende às cargas da região da grande João Pessoa.

Serão apresentadas avaliações inerentes à aplicação do dispositivo de ZnO admitindo-se o estudo de falta trifásica não aterrada no disjuntor 12C1 (de classe de tensão 72,5 kV) e no religador 21L7 (de classe 15 kV). O curto-circuito trifásico é avaliado por incidir nas mais severas solicitações dielétricas no meio de extinção do arco, podendo provocar patamares acima da tensão disruptiva do meio isolante (óleo, vácuo, SF₆, etc.) (NOBRE, 1999). As simulações digitais foram realizadas com o programa ATP (*Alternative Transients Program*) (Leuven EMTP Center, 1987). O elemento de ZnO é modelado no programa como uma resistência não linear cuja solução é obtida utilizando o método da compensação (ARAÚJO & NEVES, 2005).

Na modelagem dos transformadores é incluída, além da impedância de dispersão, as capacitâncias parasitas de buchas e enrolamentos. Cargas são representadas por elementos RL série e bancos de capacitores por sua capacitância concentrada. As linhas de transmissão e distribuição à montante e à jusante da subestação Cruz do Peixe (conexão com SEs João Pessoa e Bessa) são modeladas admitindo-se a característica distribuída de seus parâmetros. Incluem-se também as capacitâncias parasitas de barramentos, chaves, disjuntores e dos transformadores para instrumentos (TCs, TP).

Verifica-se como alternativa para redução do pico da TRT o uso de dispositivos compostos por varistores de ZnO entre os terminais dos equipamentos de manobra. Para o religador, o dispositivo de ZnO é composto por 3 pastilhas cilíndricas de ZnO do Tipo 1 (Classe 3,5 kV) (Figura 9a). No caso do disjuntor 12C1, o dispositivo é composto por 8 pastilhas de ZnO do Tipo 2 (Classe 7,5 kV) (Figura 9b). Elementos estruturais

tais como invólucro, hastes e terminais de conexão (D'AJUZ *et al*, 1987) não são descritos, uma vez que para esta aplicação podem apresentar esquema distinto daqueles utilizados nos para-raios convencionais.

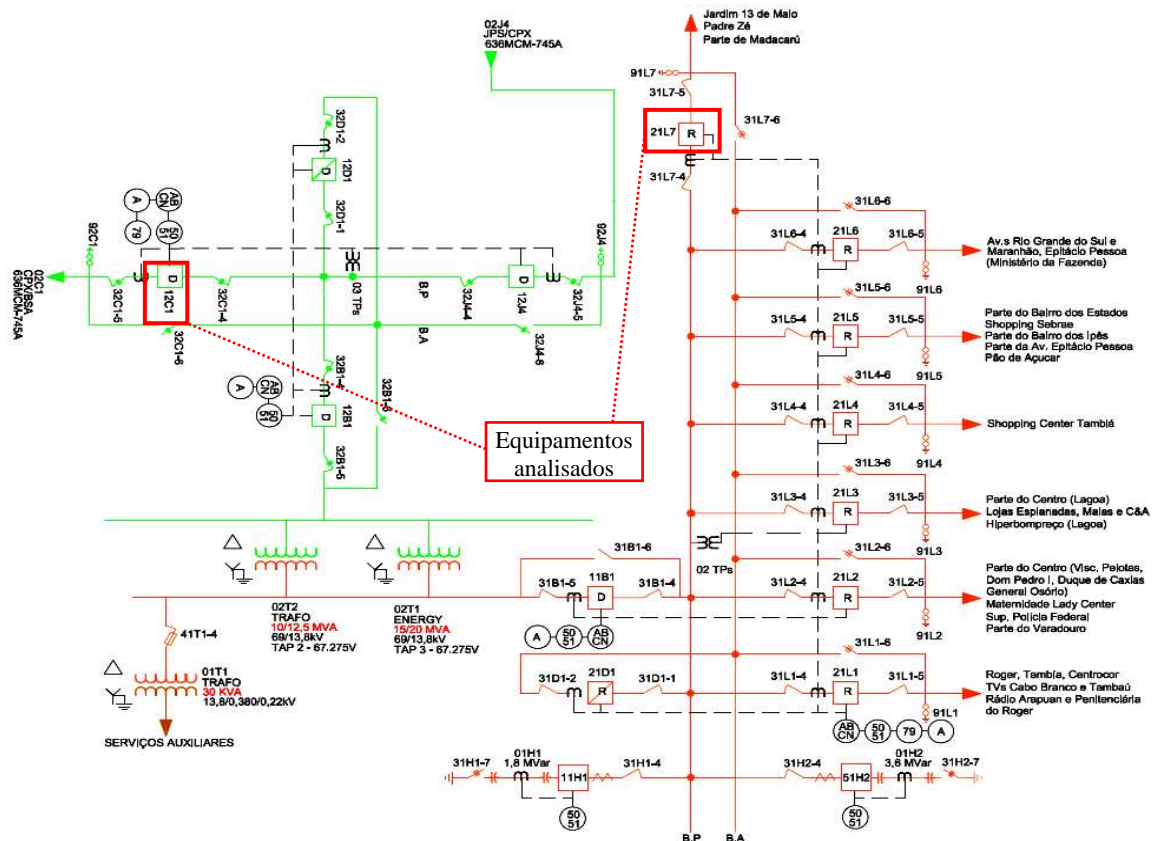


Figura 8 – Subestação Cruz do Peixe (CPX).

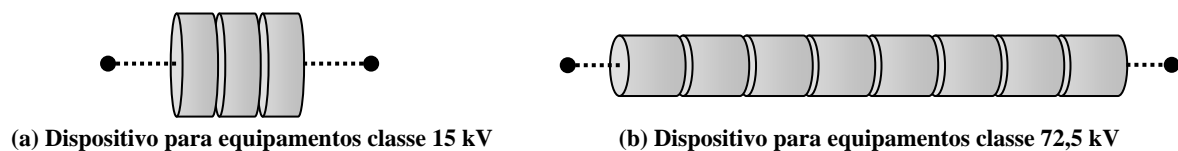


Figura 9 – Descrição dos dispositivos de ZnO avaliados nas simulações digitais

Nas Figuras 10 e 11 é apresentada a forma de onda da TRT, indicando a eficácia do dispositivo mitigador na redução das solicitações dielétricas impostas pelo valor de pico. Mediante análise, constata-se que a margem de segurança quanto à suportabilidade do equipamento de manobra pode aumentar substancialmente, evitando-se a substituição do disjuntor e do religador, podendo inclusive aumentar o número de operações do equipamento e, conseqüentemente, sua vida útil.

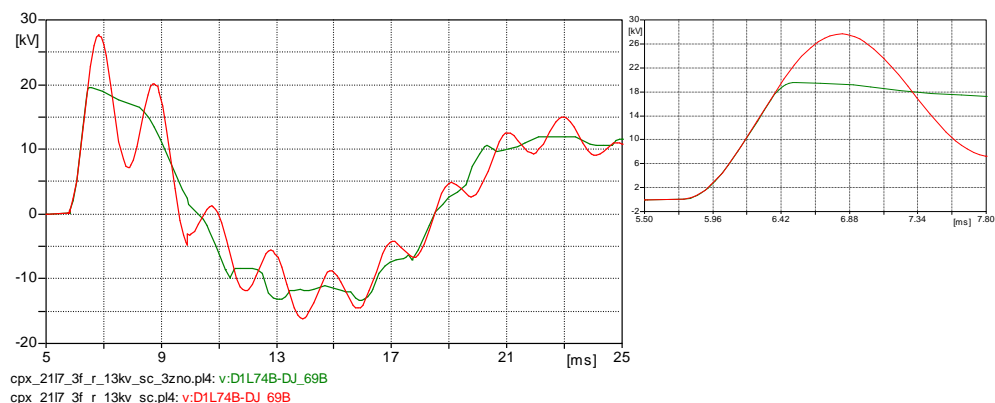


Figura 10 – Eficácia do dispositivo limitador do pico da TRT no religador 21L7: Eliminação de falta trifásica.

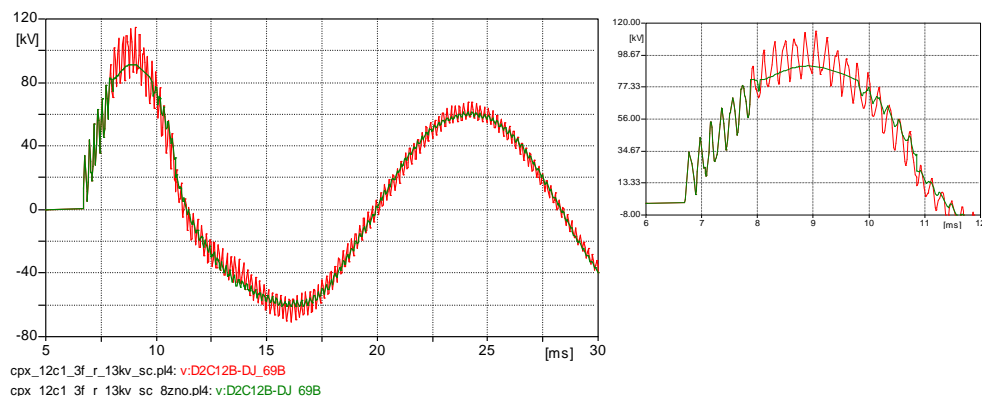
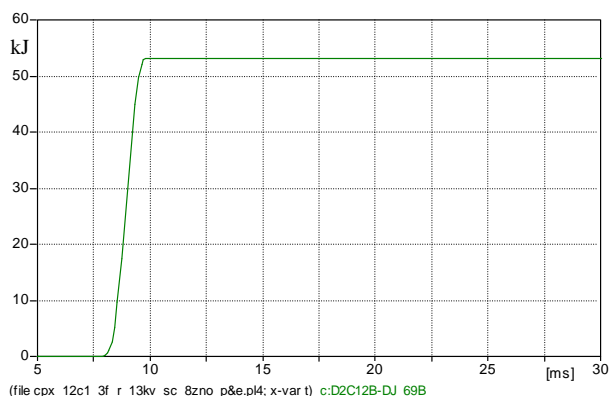
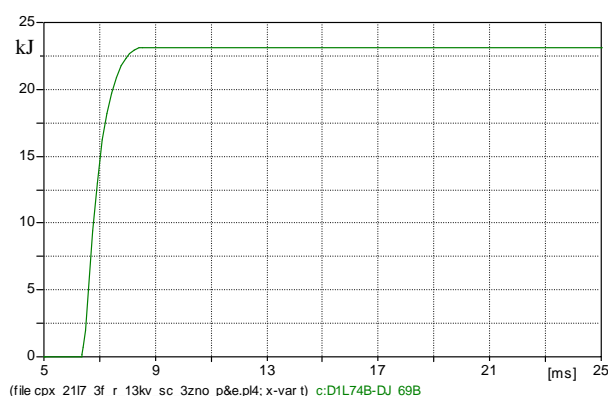


Figura 11 – Eficácia do dispositivo limitador do pico da TRT no disjuntor 12C1: Eliminação de falta trifásica.

Nas Figuras 12a e 12b são expostas as condições de energia absorvida pelo limitador em cada caso.



(a) Religador 21L7



(b) Disjuntor 12C1

Figura 12 – Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO na eliminação de falta trifásica não aterrada

Na Tabela 1 é apresentada uma sinopse dos resultados associados à tensão entre os terminais do equipamento de manobra e a energia absorvida pelo dispositivo mitigador. Caracterizam-se a margem de segurança em relação ao valor de pico da TRT e os patamares de energia para cada varistor da composição.

Tabela 1 – Sinopse dos resultados da análise de Tensão de Restabelecimento Transitória na SE Cruz do Peixe

Equipamento	Valor de pico da TRT (U_c) em kV			Margem de segurança		Energia Absorvida pelo dispositivo de ZnO (kJ)	
	Sem o dispositivo	Com o dispositivo	Valor máximo admissível	Sem o dispositivo	Com o dispositivo	Total	Por varistor
Religador 21L7	27,7	19,6	28,2	1,8%	30,5%	23,1	7,7
Disjuntor 12C1	114,7	91,4	142,0	19,2%	35,6%	53,1	6,6

Através das informações indicadas na Tabela 1, observa-se a eficácia do limitador. Além do aumento da margem de segurança, ratifica-se que a energia absorvida por cada varistor se estabelece dentro dos limiares admissíveis dado que elementos de padrão comercial apresentam uma capacidade de absorção de energia entre 2,0 e 4,0 kV/kJ. Adicionalmente, a análise preliminar dos custos totais demonstra factibilidade na consecução do equipamento, sendo esta financeiramente atrativa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Crítérios de dimensionamento e medidas de mitigação da Tensão de Restabelecimento Transitória foram discutidas no âmbito da adequabilidade de disjuntores e religadores. Sob o foco da mitigação do valor de pico da TRT, dispositivos compostos por varistores de Óxido de Zinco (ZnO) foram modelados e aplicados esquematicamente entre os terminais de equipamentos de manobra de classe 15 e 72,5 kV. Os resultados das análises digitais comprovam a eficácia do limitador, provendo perspectivas para sua implementação.

Constata-se que os patamares de energia absorvida se encontram dentro das especificações de elementos de padrão comercial. O dispositivo pode permitir operações caracterizadas preliminarmente como proibitivas, vislumbrando-se sua aplicação, provendo a redução dos estresses dielétricos na câmara de extinção.

Sob o foco do avanço da pesquisa, a reprodução de condições em laboratório é essencial para validar os cenários descritos nos estudos digitais apresentados. Além disto, a estrutura física dos limitadores deve ser definida. A modelagem do arco elétrico pode permitir aferições mais precisas de resultados de simulações e testes de eliminação de elevadas correntes. Para composição do dispositivo mitigador, outros materiais tais como óxido de estanho (SnO_2) podem ser investigados, visto que apresentam coeficiente de não-linearidade semelhante ao óxido de Zinco (ZnO), no entanto exibem maior resistência a degradação. Almeja-se deste modo a redução do aporte de recursos normalmente destinados para a aquisição de equipamentos de classe de tensão superior e o aumento na vida útil dos equipamentos de manobra.

REFERÊNCIAS

ALVES, F. R. **Características do Disjuntor para Abertura de Linhas de Transmissão em Vazio – Metodologia de Estudo**. 159p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil, 2006.

ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005.

AZEVEDO, W. V. S., NEVES, W. L. A., FERNANDES Jr., D., DANTAS, K. M. C.; CAVALCANTI, R. R. G.; SOARES, R. M.. Mitigação de Tensão de Restabelecimento Transitória em Equipamentos de Média Tensão. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE 2010), Maio, Belém-PA, 2010.

AZEVEDO, W. V. S. **Equivalentes de Redes Elétricas e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória**. 89p., Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, Brasil, 2010.

COLCLASER, R. G.; BERKEBILE, L. E.; BUETTNER, D. E. The Effect of Capacitors on the Short-Line Fault Component of Transient Recovery Voltage. *In*: IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, v. PAS-90, n. 2, March/April, 1971, p. 660-669.

COSTA, J. M. S. C.; MEDEIROS, R. K. D. M.; BALTAR, F. J. A.; BARROS, S. A.; CALHEIROS Jr., E. J. Experiência da Operação da CHESF com a Análise Sistemática de Superação de Equipamentos de Alta Tensão. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (XX SNPTEE), Recife-PE, novembro de 2009.

D'AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; AMON Filho, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; ESMERALDO, P. C. V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S. O. **Transitórios Elétricos e Coordenação do Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão**. FURNAS – UFF, 1987.

LEUVEN EMTP CENTER. **ATP - Alternative Transients Program Rule Book**. Belgium, 1987.

NOBRE, D. M. **Estudo de Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT**. 85p., Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, Brasil, 1999.

NOBRE, D. M.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A. An Alternative to Reduce Medium-Voltage Transient Recovery Voltage Peaks, *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TRANSIENTS (IPST 2001), Rio de Janeiro, Brasil, Paper N° IPST01-136/2001, p. 1-6, 2001.

WANG, X.; WILSON, P.; ZHOU, J.; MUTHUMUNI, D.; KELL, D.; LOWIE, K. W. Transient Recovery Voltage Investigation of 15 kV Circuit Breaker Failure. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS (IPST 2005), Montreal, Canada, June 2005.