

# Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Média e Alta Tensão Devido às Solicitações de TRT – Procedimentos e Medidas Mitigadoras

Danielly Formiga P. de Moura, Ricardo M. Soares, Wilker Victor da Silva Azevêdo, Washington L. A. Neves, Damásio Fernandes Júnior

**Resumo** – Este artigo tem como enfoque principal o alinhamento das especificações técnicas, modelos e metodologias adotadas em estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória, visando uma maior confiabilidade com descrição de cada etapa de planejamento. Análises foram realizadas via simulações digitais no programa ATP - *Alternative Transient Program*, plataforma computacional disponível para cálculo de transitórios eletromagnéticos. Também são apresentados os principais conceitos relativos ao estudo, decorrendo a partir deste, os regimentos estabelecidos pelas principais normas técnicas específicas em vigência. A representação dos componentes da rede elétrica e o cálculo dos seus parâmetros também são apresentados. Por fim, medidas mitigadoras são recomendadas, provendo as observações mais relevantes na decisão sobre substituir o equipamento ou adotar medidas de segurança plausíveis economicamente.

**Palavras-chave** – Tensão de restabelecimento transitória (TRT), Transitórios eletromagnéticos, Análise paramétrica, Análise de sensibilidade, Medidas mitigadoras.

## I. INTRODUÇÃO

Os estudos de superação de equipamentos são de caráter cíclico e visam avaliar a suportabilidade dos equipamentos existentes em relação às solicitações impostas pela evolução da rede como um todo. Tais estudos são de responsabilidade dos agentes envolvidos e se prestam a indicar a necessidade da substituição de equipamentos de manobra ou de proteção superados ou obsoletos tecnologicamente por outros adequados às condições atuais de operação do sistema [10].

O comportamento dinâmico de um sistema elétrico é descrito por equações diferenciais de solução analítica praticamente inviável devido ao alto grau de complexidade dos sistemas reais. O uso de métodos computacionais é, portanto, bastante atrativo, mas não é uma tarefa simples.

Várias ferramentas têm sido utilizadas ao longo dos anos em estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica. O estudo de fenômenos transitórios em sis-

temas elétricos pode ser realizado através de modelos em escala reduzida, de simuladores analógicos, de simuladores digitais ou de simuladores híbridos.

Atualmente, a simulação digital é a ferramenta mais difundida. O advento dos computadores tem possibilitado o desenvolvimento de metodologias baseadas em técnicas digitais. Devido ao aumento da capacidade de processamento e a disponibilidade dos computadores digitais avançados, a obtenção de modelos matemáticos precisos e eficientes tem crescido em importância, demandando investimentos cada vez mais significativos. Nas análises e simulações aqui descritas foi utilizado o programa ATP – *Alternative Transient Program*, avaliando o desempenho de disjuntores de média e alta tensão instalados em subestações da Energisa Paraíba no que se refere a problemas de suportabilidade às solicitações de TRT.

O planejamento dos sistemas de distribuição de energia requer a execução de uma malha de estudos cujo foco denota a busca por maior confiabilidade operativa das redes elétricas. Dentre os estudos relativos a análise de transitórios eletromagnéticos, é fundamental avaliar a susceptibilidade de falha dos equipamentos frente às condições de manobra. O interesse em particular tratado neste artigo é descrever a experiência da distribuidora Energisa Paraíba no que diz respeito ao estabelecimento de diretrizes e critérios devido às Solicitações de TRT. Como resultado final foi elaborado um Manual de Procedimentos Computacionais reportando estudos e simulações de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) em disjuntores e religadores de média tensão.

O projeto de pesquisa a que se refere este artigo faz parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico — P&D, com código 0377-011-2007, ciclo 2006/2007, do Grupo ENERGISA.

As pesquisas que constituem o objeto deste artigo foram aplicadas ao sistema elétrico da concessionária, tendo como principais objetivos: a representação adequada de equivalentes do sistema elétrico para análise de TRT, a obtenção de modelo de disjuntores para estudos de TRT e a identificação de alternativa de custo econômico baixo para redução do valor de pico da TRT.

## II. TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA (TRT)

Projetar disjuntores e religadores capazes de cumprir suas funções em um sistema elétrico exige uma série de requisitos a serem seguidos pelos fabricantes. Em relação às características nominais, a Capacidade Nominal de Interrupção (CNI) das correntes de curto-circuito e o comportamento térmico e

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

D. F. P. de Moura e R. M. Soares trabalham na ‘Energisa Paraíba’ (e-mails: [danielly@energisa.com.br](mailto:danielly@energisa.com.br) e [ricardosoares@energisa.com.br](mailto:ricardosoares@energisa.com.br)).

W. L. A. Neves, D. Fernandes Jr. e W. V. S. Azevedo trabalham na ‘Universidade Federal de Campina Grande’ (e-mails: {[@dec.ufcg.edu.br](mailto:waneves,damasio); [wilker.azevedo@ee.ufcg.edu.br](mailto:wilker.azevedo@ee.ufcg.edu.br)}).

dielétrico do meio de extinção do arco são fatores relevantes para análise da suportabilidade dos equipamentos [6].

No que concernem as condições de sobretensão, é fundamental avaliar a tensão que surge entre os pólos dos dispositivos seccionadores sob cenário de eliminação de faltas no sistema elétrico. Neste caso, o tipo de curto-circuito e a topologia da rede definem o perfil de oscilação da tensão entre os contatos [2], [5], [9], [13]. Além disso, através de aferições dos valores presumidos com patamares de referência estabelecidos por normas técnicas, é possível prever se as condições impostas pela rede são suportáveis pelo equipamento.

Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é o termo utilizado para especificar a componente transitória da tensão que surge entre os terminais do equipamento quando da sua abertura sob eliminação de uma falta no sistema elétrico. Após a desconexão das duas redes (Figura 1), cada uma delas redistribui sua energia, adequando-se a um novo estado.

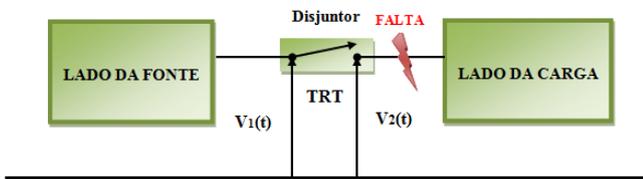


Figura 1. Sistemas conectados por disjuntor.

Como resultado da eliminação da corrente de falta, a tensão de restabelecimento que aparece entre os pólos do disjuntor,  $v_1(t) - v_2(t)$ , apresentará oscilações transitórias até que o regime permanente seja atingido. Na Figura 2 é mostrado ilustrativamente o perfil de TRT para um disjuntor de classe de tensão 72,5 kV após a eliminação de corrente de falta [3].

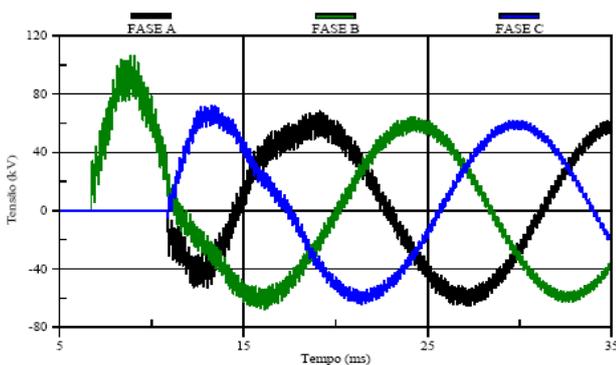


Figura 2. Tensão de Restabelecimento Transitória após eliminação de corrente de falta [3].

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) seja superior às condições suportáveis pelo dispositivo seccionador durante o resfriamento do arco na câmara de extinção.

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 da TRT seja superior a tensão disruptiva do meio isolante. Além da falha do equipamento, o reacendimento do arco pode provocar ao mesmo, danos estruturais irreversíveis.

A seguir são expostas as etapas de planejamento mais relevantes a serem seguidas em um estudo de adequabilidade de disjuntores e religadores quanto às solicitações de TRT.

### III. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS ETAPAS DE PLANEJAMENTO

Devido ao crescimento das redes elétricas, os estudos para dimensionamento de disjuntores e religadores têm sido realizados com o auxílio de plataformas de simulação digital.

Na Figura 3 são apresentadas, de forma sintética, as etapas de planejamento para análise, diagnóstico e adequação de parâmetros quanto a Tensão de Restabelecimento Transitória em equipamentos de manobra:

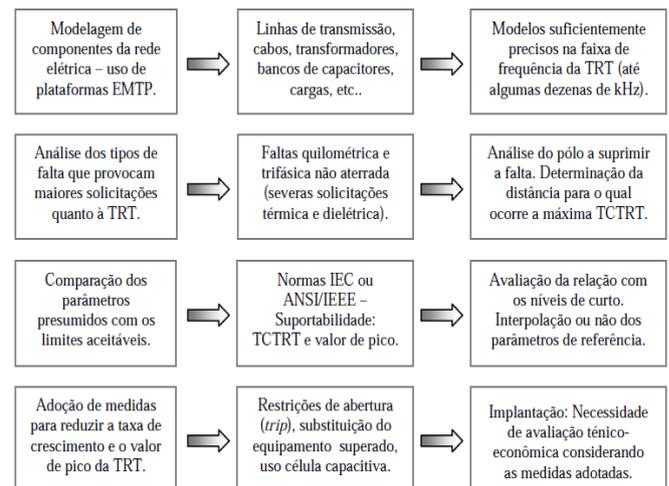


Figura 3. Síntese das etapas de planejamento para estudos de TRT.

As Tabelas I e II apresentam um resumo das diretrizes mais importantes referentes aos modelos tratados, levando em consideração a faixa de frequência deste transitório.

Tabela I. Modelos de Componentes para Estudos de TRT – Linhas e cabos.

| Componentes           | Comentários  |
|-----------------------|--|
| Linhas de Transmissão | Modelo com parâmetros distribuídos se mostra preciso. O passo de tempo da simulação deve ser escolhido de modo a respeitar o tempo de trânsito das ondas no circuito de transmissão de menor comprimento. O Modelo PI a parâmetros concentrados pode ser usado em linhas da ordem de unidades de km. |
| Cabos                 | Modelo PI a parâmetros concentrados se mostra suficiente. Para cabos de comprimento inferior a 100 m, o modelo RL apresenta boa precisão.  |

Tabela II. Modelos de Componentes para Estudos de TRT – Cargas, bancos de capacitores, transformadores, chaves e disjuntores.

| Componentes           | Comentários  |
|-----------------------|--|
| Cargas                | Modelo RL série apresenta respostas conservativas, com maiores níveis de sobretensão. Se disponíveis, análises oscilográficas do evento podem ser aferidas com modelos típicos com o intuito de determinar que tipo de representação produz maior confiabilidade ao perfil da carga de um ramal ou subestação. |
| Bancos de Capacitores | Avaliações preliminares podem contemplar o modelo simplificado com capacitância determinada a partir da potência reativa do banco para um dado patamar de carga. Estudos mais detalhados com baixa margem de segurança quanto a TRT podem incluir resistências e indutância intrínsecas.                       |
| Transformadores       | Caso o espectro da TRT contenha frequências da ordem de dezenas de kHz, se faz necessária a inclusão das capacitâncias de buchas e enrolamentos. A característica de saturação se torna dispensável. No caso de transformadores para instrumentos, e importante modelar as capacitâncias equivalentes.         |
| Disjuntores e chaves  | Para comparação da TRT com as especificações de referência, recomenda-se desprezar a modelagem do arco elétrico. As capacitâncias concentradas podem ser incluídas.  |

#### IV. PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE PARAMÉTRICA E DE SENSIBILIDADE

Os estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória devem partir da parametrização dos componentes do sistema tendo por consequência uma análise preliminar do fenômeno com a adoção de modelos conservativos. Posteriormente, envidam-se esforços para análises de sensibilidade a fim de descrever a intensidade da TRT como função da topologia da rede. Por fim, realiza-se o diagnóstico do equipamento de manobra, sendo então propostas medidas para atenuar eventuais sobretensões acima dos limites plausíveis, os quais resultariam na inadequabilidade dos equipamentos frente a situações de eliminação de curtos-circuitos.

##### A. Análise Paramétrica

Os procedimentos para análise paramétrica devem se estabelecer a partir dos seguintes tópicos:

- Descrição do sistema elétrico a ser analisado e levantamento dos dados notadamente relevantes sobre o mesmo, conforme apresentado na Tabela III.

Tabela III. Tabela para levantamento dos dados para estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória.

| Componente                                  | Dados  |
|---|--|
| Sistema Elétrico                            | Definição de subestações e alimentadores que serão considerados no estudo.<br>Diagrama unifilar.   |
| Componente                                  | Dados  |
| Subestação                                  | Especificação e localização dos equipamentos.<br>Distância típica entre o barramento e os equipamentos da subestação.  |
| Linhas de Transmissão, Distribuição e Cabos | Tipos e características dos cabos.<br>Comprimento.<br>Geometria e estruturas típicas.  |
| Transformadores das Subestações             | Potência nominal.<br>Tensão nominal.<br>Resistência e reatância de curto-circuito.<br>Tipo de ligação.<br>Curva de saturação.<br>Nível Básico de Isolamento (NBI) dos enrolamentos.  |
| Bancos de Capacitores                       | Potência nominal.<br>Tensão nominal.<br>Tipo de ligação.   |
| Disjuntores e Relatores                     | Capacidade Nominal de Interrupção (CNI).<br>Classe de tensão.<br>Fabricante e ano de fabricação (ou norma correspondente).   |
| Equivalentes                                | Parâmetros de sequência zero e positiva de 5 ou 6 subestações a jusante do ponto foco das análises, devendo superar o grau de abrangência mínimo estabelecido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) para análise da rede básica.                            |
| Carregamento do Sistema                     | Valores em MW e Mvar das cargas em diferentes patamares: carregamento leve, médio e pesado.<br>Curvas de carga típicas e horizonte de curto e médio prazo.<br>Quando possível, registros oscilográficos devem ser utilizados para aferir modelo idealizado das cargas. |
| Fontes de Geração                           | Dados do sistema de controle no qual o tempo de resposta seja inferior ao período de duração da TRT.<br>Equivalentes de sequência positiva e zero a frequência fundamental e dados das fontes em regime permanente.  |

- De posse dos dados do sistema, inicia-se a modelagem dos componentes do sistema em plataformas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*).

- Com o sistema modelado, realizam-se simulações digitais admitindo-se a eliminação de faltas trifásicas não aterradas e faltas quilométricas para avaliar a suportabilidade dos equipamentos de manobra frente às solicitações de TRT.

- De posse das condições de curto-circuito e da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores e relatores, devem-se caracterizar as envoltórias especificadas pelas normas técnicas (IEC ou ANSI/IEEE).

- Em seguida realiza-se a aferição das condições ditas presumidas com os limiares de referência, provendo o diagnós-

tico de adequabilidade aos níveis de TRT ou a superação do equipamento por valor de pico ou taxa de crescimento.

- Por fim, identificam-se alternativas para atenuar os surtos decorrentes destas manobras no sistema, destacando-se parecer técnico e econômico.

### B. Análise de Sensibilidade

Os estudos que envolvem a análise de sensibilidade, juntamente com a análise paramétrica, são realizados com o objetivo de identificar a sensibilidade dos níveis de TRT (valor de pico e taxa de crescimento) e de correntes de curto-circuito considerando-se os seguintes aspectos:

A. Uma vez definido o sistema elétrico a ser analisado, realizam-se estudos de sensibilidade quanto à presença ou não das cargas do sistema, a fim de retirar conclusões preliminares que levam a resultados conservativos.

A.1. Um disjuntor ou religador que apresenta níveis de TRT abaixo dos patamares de norma em condições no qual a carga não esta representada no sistema tem uma alta probabilidade de se encontrar adequado a operar sob condições no qual a carga é incluída nas análises.

A.2. Modelos RL série produzem respostas conservativas em relação ao modelo paralelo, com níveis de sobretensão mais elevados, podendo ser testados inicialmente em uma modelagem de partida.

B. Visto que se traduz como um evento determinístico, os estudos de TRT devem ser realizados admitindo-se os tipos de falta que provocam as solicitações mais severas em relação à suportabilidade do meio de extinção do arco elétrico [10]. Neste caso, valem as seguintes considerações:

B.1. Estudos de falta trifásica não aterrada incidem em elevados valores de pico. Neste caso, o primeiro pólo a suprimir a falta exhibe o caso mais severo, se mostrando com dependência intrínseca dos níveis de carga. Deve-se atentar que a análise de sensibilidade das cargas, para tal situação, altera não apenas os níveis de TRT, mas também a corrente de curto-circuito e, possivelmente, as envoltórias de norma que dependem desta corrente.

B.2. Nas análises de faltas monofásicas quilométricas, a distância do ponto de falta ao equipamento de manobra deve ser variada a fim de extrair o pior cenário quanto a taxa de crescimento da TRT. Normalmente são avaliados diversos pontos de 1 a 5 km nos ramais de distribuição. Esta distância pode ser maior na análise de redes de subtransmissão ou alta tensão.

C. O efeito dos dispositivos de mitigação da taxa de crescimento ou do pico da TRT deve ser validado considerando os cenários de operação mais severos, incluindo horizontes de médio prazo, evitando-se o subdimensionamento dos mesmos.

D. Nos eventos que exibirem uma frequência da TRT acima de 20 kHz, uma análise de sensibilidade pode ser conduzida quanto à inclusão das capacitâncias parasitas de equipamentos de manobra (disjuntores e chaves), barramentos, transformadores para instrumentos (TCs, TPs) e as capacitâncias de buchas e enrolamentos de transformadores de potência com o intuito de reproduzir corretamente o transitório.

## V. METODOLOGIAS E CÁLCULO DE PARÂMETROS

A faixa de frequência que envolve os estudos de TRT normalmente se estabelece na ordem de até algumas dezenas de kHz em sistemas aéreos. Neste contexto, a representação apropriada dos diversos componentes da rede elétrica, tais como linhas de transmissão, transformadores, equivalentes de redes, cargas e disjuntores torna-se essencial para reprodução confiável deste fenômeno.

### A. Equivalentes de Rede

A concepção da topologia das redes elétricas a serem modeladas em plataformas de simulação digital é de notável relevância nos estudos de planejamento. Em face da crescente expansão dos sistemas e as interligações inerentes, um grande número de configurações torna-se plausível.

Em análises de regime permanente, o uso de equivalentes de curto-circuito caracteriza-se como prudente, entretanto, no escopo dos transitórios eletromagnéticos, o mesmo pode prover erros nos perfis de reflexão das redes externas, mostrando-se insuficiente a depender da configuração avaliada e do espectro de frequência do fenômeno sob estudo. Devido à dificuldade na síntese de equivalentes dependentes da frequência, equivalentes a frequência fundamental torna-se atrativo, no entanto, sua localização pode definir a confiabilidade ou não dos resultados [3].

Para definição do ponto em que se deve localizar os equivalentes de curto-circuito, é importante avaliar o perfil dependente da frequência visto a partir da subárea no qual o evento transitório justifica maior interesse. Neste escopo, a rede pode ser subdividida em: rede interna, externa e barras de fronteira.

As redes internas podem ser classificadas como linhas e subestações onde será realizada a análise de TRT. As redes externas são delimitadas pelos equivalentes enquanto que os barramentos dispostos entre estas redes são denominadas barras de fronteira (Figura 4).

Para efetuar a síntese do espectro de frequência da impedância via plataformas do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program), é plausível obter a resposta das redes equivalentes (rede externa + fronteira) no domínio modal ou de fases.

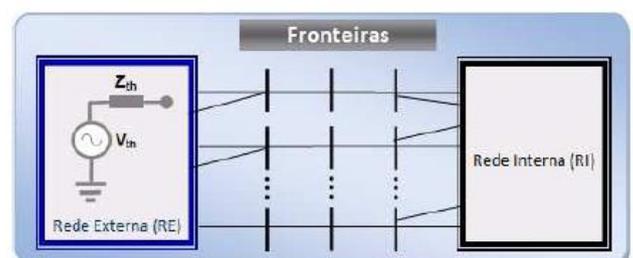


Figura 4. Divisão de um sistema em redes interna, externa e fronteiras.

A aquisição do espectro das redes externas é realizada a partir de uma análise no domínio da frequência. Considerando a injeção de um conjunto de fontes de sequência positiva e zero em casos individuais, segue-se o fluxograma da Figura 5 a fim de definir o ponto de localização do equivalente simplificado.

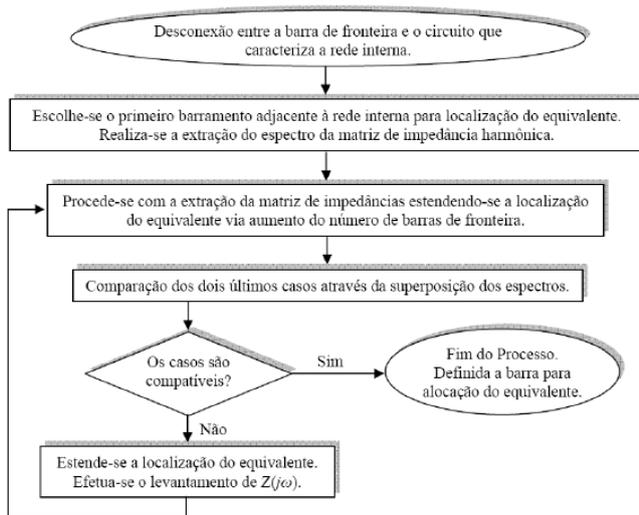


Figura 5. Fluxograma para definição do ponto que se deve alocar o equivalente simplificado.

De acordo com o procedimento, permite-se estabelecer uma configuração mínima da rede no qual as redes externas podem ser suficientemente bem representadas pelo equivalente à frequência fundamental, garantindo confiabilidade aos resultados extraídos das simulações.

No que se refere à fonte de tensão do circuito equivalente, seu valor é normalmente ajustado respeitando-se as condições de regime permanente obtidas por programas computacionais apropriados. Em condições de avaliação extrema, opta-se em alguns casos por efetuar o ajuste da fonte de tensão para condições de pré-falta máxima (1,05 p.u.) acarretando respostas conservativas. Em sistemas com linhas de transmissão da ordem de unidades ou algumas dezenas de quilômetros tal como grande parte das redes de distribuição, este procedimento pode acarretar elevações consideráveis nos níveis de TRT quando comparado com as condições pré-falta reais.

### B. Cabos Aéreos

São normalmente representados por circuito Pi a elementos concentrados uma vez que normalmente os cabos que conectam linhas de transmissão, barramentos e transformadores nas subestações que derivam de sistemas de transmissão aéreos tem comprimento da ordem de algumas unidades ou dezenas de metros. Esta representação é apropriada, principalmente, nos casos em que o tempo de trânsito das ondas que se propagam no cabo for inferior ao passo de integração da simulação.

Em componentes simétricas, uma vez de posse da característica do cabo e da distribuição geométrica das fases, os dados de sequência são obtidos. Em componentes de fase os cabos podem ser representados incluindo os elementos próprios e mútuos da matriz de impedâncias, entretanto, o acoplamento é normalmente desprezado. São obtidos resistência em ohms, reatância indutiva em ohms ( $\omega L$ ) e o inverso da reatância capacitiva em mhos ( $\omega C$ ).

Considere, por exemplo, um sistema em que os valores da tensão base e potência base são, respectivamente,  $V_B$  e  $S_B$ . A impedância de base é calculada conforme a expressão:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \quad (1)$$

$$u_C = k_{pp}^k k_{af} \sqrt{\frac{2}{3}} u_r \quad (2)$$

A partir da equação (2), os parâmetros dos cabos são obtidos usando:

$$R_{ohms} = R_{pu} \times Z_b \quad (3)$$

$$X_{L_{ohms}} = X_{L_{pu}} \times Z_b \quad (4)$$

$$X_{C_{ohms}} = X_{C_{pu}} \times Z_b \quad (5)$$

Em que  $R_{ohms}$  e  $R_{pu}$  são os valores da resistência em ohms e pu, respectivamente.

O valor da admitância de base é igual ao inverso do valor da impedância de base. Ao calcular o inverso da reatância capacitiva em  $\mu$ hos (admitância), normalmente divide-se o valor obtido por dois, dispondo-o nos terminais emissor e receptor do cabo.

### C. Transformadores

São geralmente representados por elementos concentrados RL série sem acoplamento entre fases. Nos estudos de tensão de restabelecimento transitória, também é aconselhável incluir as capacitâncias de buchas e enrolamentos dos transformadores das subestações cujos disjuntores estarão sob análise, assim como é importante representar as capacitâncias de transferência entre primário e secundário [8].

A inclusão das capacitâncias em paralelo ( $C_H$ ,  $C_L$ ) incide na representação das frequências naturais de oscilação dos lados de baixa e de alta tensão do transformador. O elemento que caracteriza a impedância de transferência ( $C_{HL}$ ) entre primário e secundário é muito importante para representar a propagação do surto que pode decorrer entre primário e secundário. Tal fato é proporcionado pela elevação de frequência do transitório nos instantes iniciais após a abertura do disjuntor, levando a redução da impedância capacitiva entre as buchas do transformador.

Estudos de caso realizados por Nobre (1999) via ATP mostraram que a inclusão da característica de saturação do núcleo dos transformadores torna-se dispensável em estudos de TRT. Na realidade, observa-se que a ocorrência da falta acarreta uma depreciação do perfil de tensão do sistema [9]. Como o fluxo ( $\lambda$ ) concatenado no enrolamento é função da tensão sobre o mesmo, embora ocorra elevação nos níveis de corrente, os transformadores não operarão em regime de saturação.

### D. Reatância e Resistência

A impedância série de cada enrolamento é calculada da seguinte forma:

- Obtém-se o valor da reatância do transformador em pu, a partir do valor da reatância percentual (%) contida nos dados de placa do transformador, convertendo-o posteriormente

para a base de 100 MVA;

- Para um transformador de dois enrolamentos, o valor da reatância do transformador em pu é dividida por dois, sendo cada uma disposta para os lados de alta e baixa tensão;

- Calcula-se a reatância (em ohms) no enrolamento de alta tensão. Em grande parte das redes de distribuição, a tensão no lado de alta é normalmente 69 kV. Exemplifica-se para este caso que, no cálculo da impedância de base, os valores de tensão de base e de potência de base usados são iguais a 69 kV e 100 MVA (base do programa utilizado), respectivamente;

- Calcula-se a reatância em ohms no enrolamento de baixa tensão. No cálculo da impedância de base, os valores de tensão de base e de potência de base usados são iguais a 13,8 kV e 100 MVA, respectivamente;

- Nos enrolamentos em que o tipo da ligação é delta, o valor da reatância (em ohms) obtido é multiplicado por três. Isto deve ocorrer nos casos em que se considera a tensão de linha neste lado do transformador para o cálculo da impedância de base;

- Obtêm-se os valores das resistências dos enrolamentos de alta e de baixa tensão, usando o fator adequado que traduza a relação entre as componentes imaginária e real da impedância do transformador de acordo com norma ou referência pertinente.

#### E. Capacitância de Transferência, de Enrolamentos e Buchas

Valores típicos para capacitância são obtidos basicamente a partir da potência nominal do transformador e do Nível Básico de Isolamento (NBI) de cada enrolamento. Para cada enrolamento de um transformador, as capacitâncias são obtidas e posteriormente adicionadas à capacitância de bucha. A partir do valor obtido, da ordem de pF, normalmente calcula-se a admitância  $\omega C$  em  $\mu\text{mhos}$ , conectando um elemento concentrado com o correspondente valor em cada nó da ligação do enrolamento (correspondente a cada fase).

#### F. Chaves Seccionadoras, Religadores e Disjuntores

Estes equipamentos devem ser modelados como chaves controladas no tempo. O arco elétrico não foi representado nestas análises. O disjuntor é modelado como um elemento ideal que apresenta resistência zero quando conduzindo, com passagem de zero a infinito instantaneamente após a abertura de seus contatos. As capacitâncias efetivas de disjuntores e chaves são representadas em modelos que representam de forma mais confiável estes elementos [2].

#### G. Bancos de Capacitores

Podem ser representados por elementos concentrados. Efetua-se o cálculo do inverso da reatância capacitiva de cada banco de capacitores de acordo com a expressão:

$$\omega C = \frac{Q}{V^2} \quad (6)$$

Em que Q é o valor da potência reativa de cada banco de capacitor, V é a tensão entre fases, valor rms, da barra onde o banco esta conectado.

#### H. Cargas

Neste estudo, as cargas foram representadas por elementos RL série tendo em vista que este modelo proporciona respostas conservativas em relação ao modelo paralelo. Nota-se que o elemento série se comporta como um circuito aberto devido ao crescimento da reatância indutiva quando da presença de frequências elevadas no sinal da rede.

Inibe-se, deste modo, eventuais atenuações provocadas pela componente resistiva da carga. As componentes resistiva e reativa denotam, respectivamente, as partes real e imaginária do fasor impedância normalmente obtido através da seguinte relação:

$$Z = \frac{V^2}{S_C} \quad (7)$$

Em que  $S_C$  é o valor da potência aparente da carga, resultante da associação das componentes ativa e reativa.

No modelo paralelo, a fim de encontrar os parâmetros característicos das componentes resistiva e reativa, basta dividir o quadrado da tensão individualmente pelas partes real e imaginária da potência aparente da carga.

#### I. Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão podem ser representadas através do modelo a parâmetros distribuídos, conhecido como modelo de Bergeron [7].

#### J. Aspectos de Projeto Básico

- O estudo de faltas quilométricas deve ser realizado em todos os equipamentos de manobra diretamente conectados às linhas de transmissão ou distribuição aéreas, respeitando-se os princípios da coordenação do isolamento nas redes radiais ou em anel face às correntes de curto-circuito;

- A TRT especificada por norma pode ter seus valores interpolados quando, uma vez determinado pelo fabricante do equipamento, esta condição for permitida;

- O passo de integração deve ser selecionado levando em consideração o tempo de propagação da linha de transmissão de menor comprimento (normalmente 5 a 10 vezes inferior) e a ordem de grandeza das frequências naturais de oscilações decorrentes do processo de interrupção. Sob este último critério, o passo de simulação escolhido é normalmente menor para faltas quilométricas do que para faltas trifásicas não aterradas.

- Nas simulações que envolvem o estudo de curto-circuito quilométrico, os tempos de abertura do pólo do disjuntor cuja fase se encontra sob falta devem ser ajustados de forma a assegurar que o mesmo seja o ultimo a abrir, o que acarreta uma maximização das sobretensões, reduzindo a atenuação da rede;

- Em estudos de faltas monofásicas, os pólos das fases não estão interrompendo correntes de curto circuito, sendo desta forma, incorreto analisá-los utilizando as envoltórias estabelecidas por norma. A prática do setor para avaliação desses pólos é efetuá-la no âmbito de estudos de abertura de linhas em vazio [11];

- Estudos de projeto básico podem ser realizados considerando o estudo de faltas trifásicas aterradas, no entanto, devem ser observadas as condições de fator de primeiro pólo para estabelecer de modo apropriado as aferições com as envoltórias de norma;

- Manobras em discordância de fases devem ser realizadas nos cenários refletidos nas especificações do disjuntor/religador a fim de verificar a sollicitação máxima de tensão através do pólo do equipamento nesta condição.

## VI. MEDIDAS MITIGADORAS

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 6) para reduzir a frequência de oscilação da TRT (Figura 7) [4], [12].

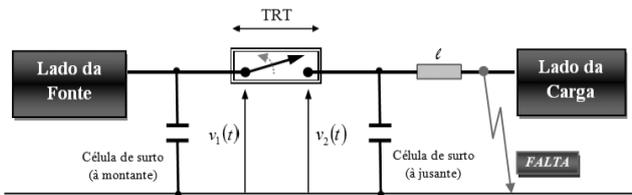


Figura 6. Célula de surto capacitiva para redução da taxa de crescimento da TRT.

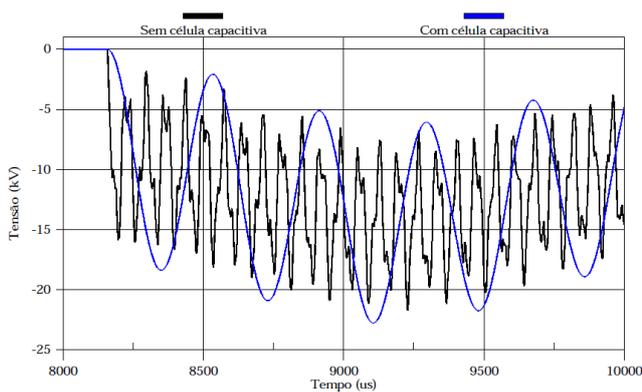


Figura 7. Efeito da inclusão de células capacitivas sobre a taxa de crescimento da TRT: aplicação em um religador de classe 15 kV na eliminação de falta quilométrica.

Deve-se atender aos seguintes cenários para redução da taxa de crescimento:

- 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. Neste cenário, tem-se como foco a minimização das oscilações de alta frequência da tensão a jusante do disjuntor.

- A localização das células de surto capacitivas no lado da fonte é envidada quando se detecta condição de superação na análise de falta trifásica, permitindo a redução da frequência de oscilação da tensão no lado da fonte.

- 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 [3], [4].

- Em nível de 13,8 kV normalmente são utilizadas células da ordem de 150 a 250 nF (padrão comercial) ou, provisori-

amente, unidades de bancos de capacitores da ordem de 50 kvar [1]. Este tipo de procedimento em geral não proporciona alterações no valor de pico da TRT, no entanto é plausível sua análise.

Em relação aos estresses dielétricos na câmara de extinção, quando o valor de pico da TRT se encontra acima da referência normatizada, são adotadas:

- Restrições relacionadas a patamares específicos de carga, transferência de comando de abertura (trip);

- Medidas para substituição do equipamento por outro de classe de tensão superior ou realocação do equipamento, admitindo-se outro com maior capacidade de interrupção da corrente de curto-circuito (CNI). Neste último caso observa-se maior suportabilidade aos níveis de TRT uma vez que a relação entre a corrente de falta e CNI irá aumentar, deslocando a envoltória de norma, provendo uma maior suportabilidade aos valores de pico e taxa de crescimento [1].

Quando o equipamento se encontra sob eminência de superação para patamares de carga de operação de curto prazo, deve-se avaliar horizontes de planejamento futuros para antecipar medidas de substituição do equipamento.

Uma solução investigada para redução do valor de pico da TRT nos equipamentos é a instalação de um dispositivo composto por uma associação série de varistores entre seus terminais (Fig. 8).

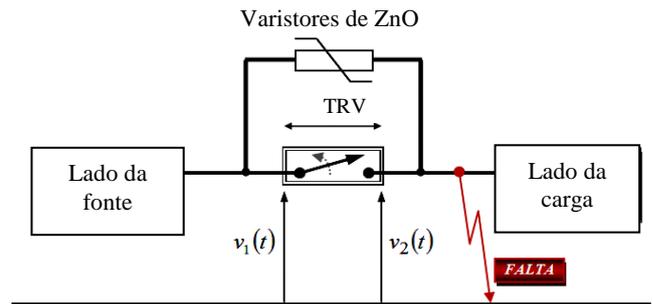


Fig. 8. Disposição esquemática do dispositivo limitador.

As simulações digitais aqui realizadas envolveram a utilização de varistores de óxido de zinco (ZnO) cilíndricos, com espessura de 23 mm e diâmetro de 62 mm (padrão comercial) (Fig. 9).



Fig. 9. Fotografia do varistor modelado para os estudos de TRT.

Foi constatada uma redução razoável do valor de pico da TRT nos terminais do religador 13,8 kV após a utilização, em paralelo, dos varistores de ZnO (Fig. 10). Tal circunstância foi confirmada tanto sob condições de eliminação de curto-circuito trifásico não aterrado como em cenário de

supressão de falta quilométrica. A taxa de crescimento permaneceu praticamente inalterada em ambos os casos. Admite-se o uso de dois, três e quatro varistores entre os terminais dos equipamentos.

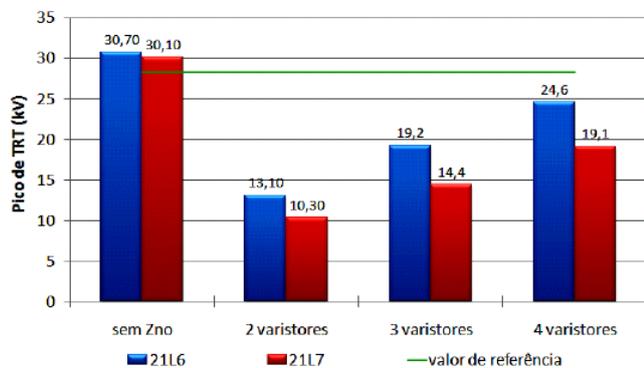


Figura 10. Valor de pico da TRT em condição de falta trifásica não aterrada: Uso de varistores de ZnO entre os terminais de religadores de 13,8 kV de uma das subestações da Energisa.

Em relação aos resultados apresentados na Figura 10, torna-se evidente a importância em dimensionar o número de pastilhas de ZnO a serem utilizadas na redução do valor de crista da TRT em cada caso específico.

## VII. CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos a partir das simulações digitais realizadas, observa-se a importância dos estudos relativos à análise paramétrica e de sensibilidade para correta avaliação das solicitações transitórias as quais o sistema elétrico pode ser submetido devido à TRT.

Foi realizada a fundamentação teórica acerca do fenômeno transitório da TRT e da obtenção dos parâmetros a serem utilizados na modelagem do sistema a ser estudado, destacando-se aperfeiçoamentos a serem implementados na estimação paramétrica durante a realização deste tipo de estudo.

A partir das análises de sensibilidade e paramétricas realizadas, foram realizados procedimentos para identificação de alternativas para atenuar estes tipos de fenômenos no sistema elétrico. Ainda, a partir das constatações obtidas, foram sintetizados procedimentos, modelos e critérios a serem utilizados nestes estudos específicos, propondo-se uma metodologia para estudos de tensão de restabelecimento transitória a ser empregado pela concessionária no âmbito da representação dos componentes da rede elétrica e na caracterização de cenários cuja avaliação torna-se fundamental para o fenômeno.

O diagnóstico de disjuntores e religadores quanto às solicitações de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) foi realizado tendo como cenário duas subestações da Energisa Paraíba. Em face da existência de alguns equipamentos superados em relação a sua taxa de crescimento e valor de pico, avaliações foram conduzidas com o intuito de prover subsídios na inserção de dispositivos mitigadores. A inserção de pastilhas de óxido de zinco em paralelo com os terminais dos equipamentos se mostra como uma alternativa para redução dos estresses dielétricos a que se submete o meio de extinção do arco elétrico. O uso de células de surto

capacitivas foi realizado para reduzir as elevadas taxas de crescimento da TRT em cenários de falta quilométrica, mostrando-se mais efetiva sua localização nos terminais do equipamento localizados no lado da carga.

Destaca-se que todas as análises realizadas caracterizam-se como concepção dos procedimentos computacionais firmados num manual elaborado no fim do projeto voltado para os estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória.

A realização de testes em laboratório com os dispositivos de ZnO, a sua implementação em campo e a análise da aplicabilidade em equipamentos de alta tensão são aspectos que motivam a continuidade da pesquisa.

## VIII. BIBLIOGRAFIA

- [1] Alves, F. R. Características do Disjuntor para Abertura de Linhas de Transmissão em Vazio – Metodologia de Estudo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajuba, Itajuba, Brasil, 159 p., 2006.
- [2] ANSI/IEEE C37.011-2005. IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers. New York, IEEE, Inc., 2005.
- [3] 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”. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2010), Belém-PA, Maio 2010.
- [4] 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, v. PAS-90, n. 2, March/April, 1971.
- [5] Colclaser Jr., R. G., Beehler, J. E., Garrity, T. F. “A Field Study of Bus-Fault Transient Recovery Voltages”. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, VOL PAS 95, no 6, November/December 1976.
- [6] 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.
- [7] Dommel, H. W. EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, B.C., Canada, 1996.
- [8] Greenwood, A. Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons Inc., New York, 751p.
- [9] 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.
- [10] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede: Sub-módulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, 2009.
- [11] 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 Murrur II (Volume 2 – Análise de cada subestação), janeiro 2007.
- [12] Swindler, D. L., Schwartz, P., Hamer, P. S. Lambert, S. R. “Transient Recovery Voltage Considerations in the Application of Medium-voltage Circuit Breakers”. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 33, no. 2, pp. 383-388, March/April 1997.
- [13] Wagner, C. L., Smith, H. M., “Analysis of Transient Recovery Voltage (TRV) Rating Concepts”. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, v. PAS 103-, n° 11, November 1984.