



Representação da Rede Elétrica para Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória e Estudos de Sensibilidade quanto à Modelagem de Cargas

Wilker Victor da Silva Azevêdo¹

¹IFPE – Campus Garanhuns. e-mail: wilker.azevedo@garanhuns.ifpe.edu.br

Resumo: Para o aumento da confiabilidade operativa das redes de subtransmissão e distribuição, é essencial a análise da superação de equipamentos por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) e a adoção de medidas mitigadoras para ajuste das solicitações acima dos limites admissíveis. Sob tal foco, neste artigo são apresentadas diretrizes e critérios para diagnóstico das condições transitórias impostas pelos sistemas elétricos aos equipamentos de manobra. Avaliações quanto à sensibilidade do modelo das cargas são realizadas em uma rede real de distribuição de energia elétrica. Estudos exibem as condições mais importantes no âmbito dos procedimentos adotados para exame da adequabilidade de equipamentos, admitindo-se a aplicação e recomendação de modelos que satisfazem ao estudo criterioso do fenômeno.

Palavras-chave: Adequabilidade de equipamentos, tensão de restabelecimento transitória, transitórios eletromagnéticos, redes elétricas.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

No planejamento e operação das concessionárias de energia elétrica, a análise da superação das características nominais dos equipamentos se destaca como tema de grande prioridade. Com a expansão dos sistemas de potência, é plausível constatar-se a superação dos disjuntores e religadores existentes em termos da capacidade nominal de interrupção de correntes de curto-circuito (CNI) e/ou da suportabilidade aos requisitos de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

A execução dos estudos de identificação deve ser cíclica, utilizando metodologias e critérios bem definidos com o intuito de definir soluções de mitigação economicamente viáveis. Neste artigo serão tratados os requisitos de TRT provenientes de manobras em subestações do Regional Mussurê II da ENERGISA-PB. Como etapa imprescindível do planejamento, reporta-se sobre a representação dos componentes da rede elétrica em plataformas digitais, caracterizando casos que se mostram mais severos na análise deste transitório. O presente trabalho sintetiza parte de pesquisa para o aperfeiçoamento dos procedimentos de distribuição geridos no âmbito da ENERGISA, destacando estudos de sensibilidade ao modelo das cargas nos ramais da subestação.

2. DIRETRIZES

2.1 Representação dos Componentes da Rede Elétrica

A busca por maior confiabilidade no diagnóstico da TRT traduz uma exigência contínua ao aprimoramento de modelos e técnicas. Tem-se como perspectiva a minimização de dispêndios financeiros decorrentes do dimensionamento inadequado de equipamentos seccionadores e dispositivos mitigadores, além da representação mais precisa do sistema elétrico em plataformas de simulação do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Como a faixa de frequência de interesse em estudos de TRT pode abranger desde a fundamental até algumas dezenas de kHz, é necessário o uso de modelos apropriados de linhas de transmissão, cabos, transformadores, cargas, bancos de capacitores, equivalentes, disjuntores e chaves, os quais serão discutidos a seguir.

2.1.1 Equivalentes de Redes

Conceitualmente, entende-se por equivalente de um sistema elétrico a representação ou modelagem matemática de um sistema ou de partes desse sistema, através de suas impedâncias de curto-circuito ou, alternativamente, através de impedâncias que reproduzam o comportamento da rede em função da frequência a partir das barras de fronteira (ONS, 2009).

Na análise de fenômenos transitórios, idealmente deve-se modelar a parte do sistema elétrico que será substituído pelo equivalente considerando sua dependência com a frequência. Observa-se, no entanto, que a difundida utilização de programas para cálculo de equivalentes simplificados faz com que estes sejam comumente aplicados no planejamento das concessionárias, sendo considerada a modelagem de um certo número de barras de fronteira. Porém, fixar os limites de redes de grande complexidade com base no número de barramentos representados (CCON, 1991; ONS, 2009; Costa *et al*, 2009) e utilizar, nestes estudos, equivalentes simplificados calculados à frequência fundamental (IEEE WG 15.08, 2009) pode introduzir erro no diagnóstico da tensão de restabelecimento. Estudos recentes mostram discrepâncias consideráveis no cálculo dos parâmetros presumidos empregados no dimensionamento dos equipamentos (Azevêdo *et al*, 2009).

Como proposta, sugere-se que nos estudos em que se fizer uso de equivalentes calculados à frequência fundamental, o ponto escolhido para alocá-los deve ser escolhido de modo que as redes externas sejam suficientemente bem representadas por estes equivalentes. Neste cenário, estudos no domínio da frequência podem prover o comprimento mínimo da rede a ser modelada, admitindo-se para isto a análise da característica ressonante da impedância vista a partir da rede interna que se classifica como de maior interesse para avaliação do evento transitório. Sinteticamente, atinge-se um ponto no sistema para o qual os equipamentos à montante possam ser satisfatoriamente representados por equivalentes simplificados. A superposição das respostas em frequência das componentes modais ou de fases da impedância ratifica esta condição.

2.1.2 Linhas de Transmissão e Cabos

No caso das linhas de transmissão, o modelo a parâmetros distribuídos, conhecido como modelo de Bergeron (Dommel, 1996) apresenta boa precisão no espectro da TRT na representação de circuitos que não se encontram diretamente conectados ao ramal de alimentação da subestação que se pretende realizar as análises (Gustavsen *et al.*, 2005). Este modelo também pode ser estendido aos estudos em que a rede de sequência positiva se mostra predominante tal como na avaliação de faltas trifásicas. Deve-se adotar com critério o passo de tempo da simulação de modo a respeitar o tempo de trânsito das ondas que se propagam no circuito de transmissão de menor comprimento. Quando o evento transitório exibe espectro da ordem de centenas de kHz e os circuitos de transmissão têm comprimento elevado, representar o perfil dependente da frequência dos parâmetros torna-se essencial (Martinez *et al.*, 2005).

Para cabos de comprimento curto ($< 100\text{m}$) que conectam barramentos e equipamentos, tal como é o caso de grande parte das subestações de redes de distribuição, o modelo PI a parâmetros concentrados se mostra suficiente (Gustavsen *et al.*, 2005). Para condições transitórias de espectro inferior a 10 kHz, a representação via modelo RL acarreta boa precisão.

2.1.3 Cargas

Em relação à representação das cargas, diversos modelos reproduzem de modo satisfatório seu perfil ativo e reativo à frequência fundamental. No entanto, na análise de TRT o amortecimento das sobretensões é função de sua representação. O ideal é que aferições sejam avaliadas entre os modelos e registros oscilográficos de campo a fim de analisar que tipo de representação produz maior confiabilidade ao perfil da carga de um ramal ou subestação. Contudo, tais informações nem sempre se mostram disponíveis facilmente e, neste caso, predispõe-se ao uso de modelos conservativos.

Análises sob patamar de leve carregamento proporcionam maiores níveis de sobretensão (Jones, 1988). Além disso, a adoção do modelo RL série (R_s, L_s) provoca maior severidade aos níveis de TRT do que o modelo paralelo (R_p, L_p), justificada pelo comportamento da impedância como função da frequência para cada um destes modelos (Fig. 1).

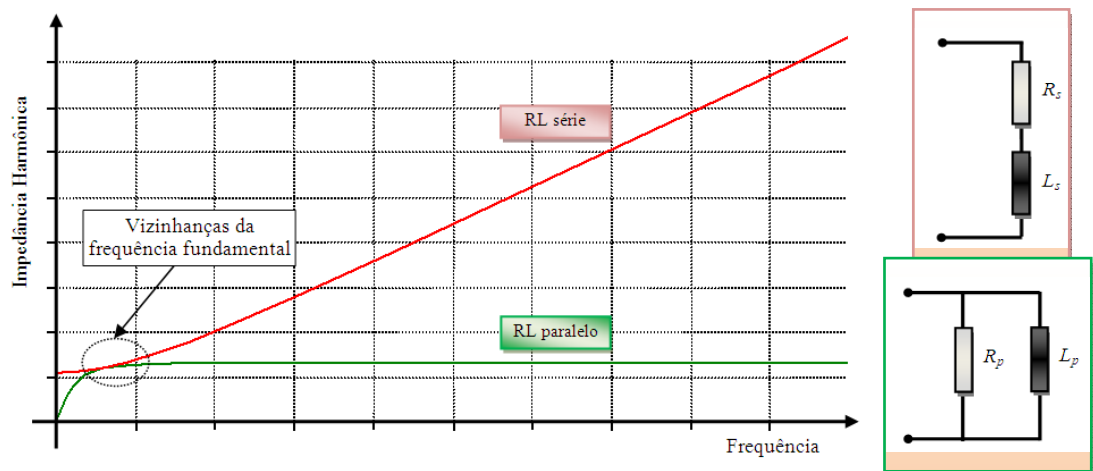


Figura 1 – Perfil dependente da frequência das cargas como função do modelo adotado.

Nota-se da Figura 1 que na presença de componentes de frequência elevada no sinal da rede o elemento série tende a se comportar como um circuito aberto devido ao crescimento da reatância indutiva. Inibe-se, deste modo, parte das atenuações provocadas pela componente resistiva da carga. No modelo RL paralelo a componente resistiva da carga se torna dominante em altas frequências.

Algumas metodologias conservadoras têm sugerido desprezar a representação da carga na subestação sob a qual o transitório está sendo analisado (ONS, 2009; Costa *et al.*, 2009). Em contrapartida, caso estas sejam incluídas, é conveniente representar parte dos ramais de distribuição dos alimentadores uma vez que estudos de curto-circuitos aterrados têm resultados utilizados no dimensionamento dos equipamentos quanto à TRT.

2.1.4 Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores existentes em cada subestação possuem intrinsecamente além de sua própria capacitância (C_b), indutâncias (L_b) e resistências (R_{bp} , R_{bs}) (Whitaker, 1999), tal como apresentado na Figura 2.

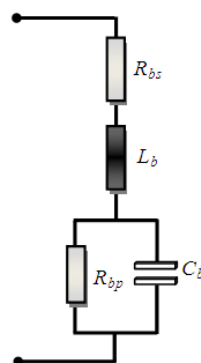


Figura 2 – Circuito equivalente de um banco de capacitores.

A capacitância C_b é determinada diretamente a partir da potência reativa (Q) do banco e do correspondente nível de tensão entre fases na barra em que o mesmo se encontra conectado. A indutância L_b representa o equivalente obtido a partir da indutância interna intrínseca do banco de capacitores e a indutância do reator limitador de corrente, cujos valores típicos adotados são, respectivamente, 5 μH e 100 μH (ANSI C37.0731-1973; Zanetta, 2003). Os elementos R_{bp} e R_{bs} , relacionados à resistência de terminações, eletrodos, resistividade e perdas do meio dielétrico, podem ser acoplados em uma única resistência R_{ESR} (Equivalent Series Resistance), permitindo que as perdas resultantes sejam expressas através de um único resistor no circuito equivalente (Whitaker, 1999). O valor das perdas totais nos bancos de capacitores são da ordem de 0,44 W/kvar (D'Ajuz et al, 1987). Na representação mais conservativa para estudos de TRT, normalmente apenas a capacitância C_b é

incluída nas análises, no entanto, sob condições no qual a margem de segurança relativa ao pico e taxa de crescimento da TRT se encontra reduzida, a modelagem em detalhes é importante para avaliar com maior precisão cenários de operação de curto prazo.

2.1.5 Transformadores

Os transformadores de potência são representados com boa precisão através de elementos RLC. Basicamente dispõe-se de resistências e indutâncias nos lados de baixa (R_L , L_L) e alta (R_H , L_H) tensão com elementos em série sem acoplamento entre as fases. Para transitórios com espectro de frequência de dezenas de kHz, faz-se necessário incluir as capacitâncias dos enrolamentos e buchas, tanto para cada lado do transformador (C_H , C_L) como entre as buchas de primário e secundário (C_{HL}). Estes parâmetros são da ordem de pF ou nF. A topologia descrita é apresentada na Figura 3.

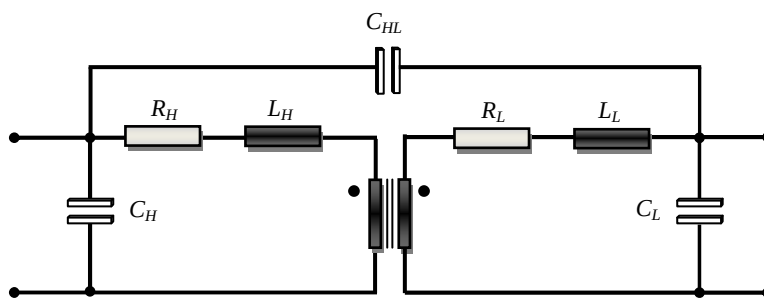


Figura 3 – Representação dos transformadores de potência.

A inclusão das capacitâncias em paralelo incide na representação das frequências naturais de oscilação dos lados de baixa e de alta tensão do transformador (Wang *et al.*, 2005). O elemento que caracteriza a impedância de transferência (C_{HL}) é muito importante para representar a propagação do surto que pode decorrer entre primário e secundário. O cálculo da impedância série é normalmente efetivado a partir de testes de ensaio típicos ou diretamente dos dados de placa do equipamento. Para cálculo das capacitâncias do transformador, devem-se considerar informações relativas ao Nível Básico de Isolamento (NBI) e tensão dos enrolamentos, além de sua potência nominal (Greenwood, 1991). Para análises mais precisas, as capacitâncias parasitas dos transformadores para instrumentos (TCs, TPs) são modeladas (IEEE Std C37.011, 2005).

A característica de saturação do núcleo dos transformadores torna-se dispensável em estudos de TRT (Nobre, 1999). Observa-se que a ocorrência da falta acarreta uma depreciação do perfil de tensão do sistema. Como o fluxo (λ) concatenado é função da tensão, embora ocorra elevação nos níveis de corrente no período anterior à abertura dos contatos do equipamento, os transformadores não operarão em regime de saturação.

2.2.6 Disjuntores e Chaves

As normas técnicas de referência sugerem que os equipamentos de manobra sejam modelados como chaves controladas no tempo. Neste caso, o arco elétrico não deve ser representado (IEEE Std C37.011, 2005; IEC 62271-100, 2006). 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 concentradas dos pólos do disjuntor podem ser consideradas.

2.2 Cenários Avaliados

Os estudos de superação visam a avaliar a suportabilidade dos disjuntores/religadores existentes em relação às solicitações impostas pela evolução da rede elétrica, concedendo indicativos da necessidade da substituir equipamentos superados ou obsoletos tecnologicamente por outros adequados às atuais condições de operação do sistema.

Em face das severas solicitações que provocam, faltas monofásicas quilométricas e faltas trifásicas não aterradas são recomendadas pelas normas de referência (IEC 62271-100, 2007; ANSI/IEEE C37.011, 2005) para a realização de análises determinísticas. Faltas quilométricas proporcionam considerável elevação térmica ao meio de extinção do arco nos primeiros

microssegundos que sucedem a separação dos pólos, com uma forma de onda em geral do tipo dente de serra (Figura 4). Testes realizados pela General Electric (Skeats *et al.*, 1957), Westinhouse (Falk *et al.*, 1959) e Siemens (Habadank & Kugler, 1981) indicam uma elevada taxa de crescimento (TCTRT) quando da supressão deste tipo de falta.

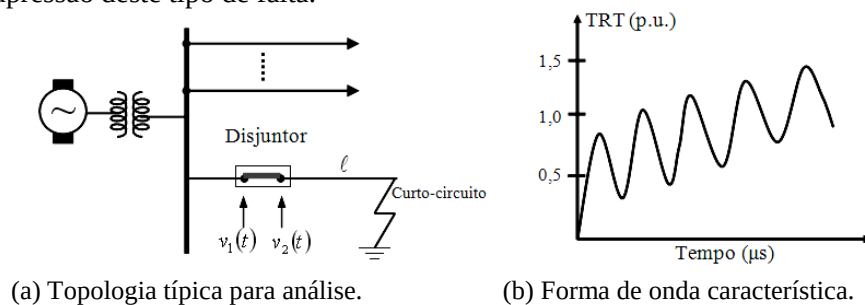


Figura 4 – Característica da TRT para faltas quilométricas.

Apesar da probabilidade de ocorrência de faltas trifásicas não aterradas ser muito baixa, sua análise é realizada por incidir nas mais severas solicitações dielétricas ao meio de extinção do arco. O valor de pico da TRT é superior ao caso das faltas quilométricas. Caso existam transformadores adjacentes ao equipamento seccionador e não se constate um grande número de linhas de transmissão ou cabos na barra sob falta (Figura 5a), sua resposta exibe uma característica oscilatória (Figura 5b).

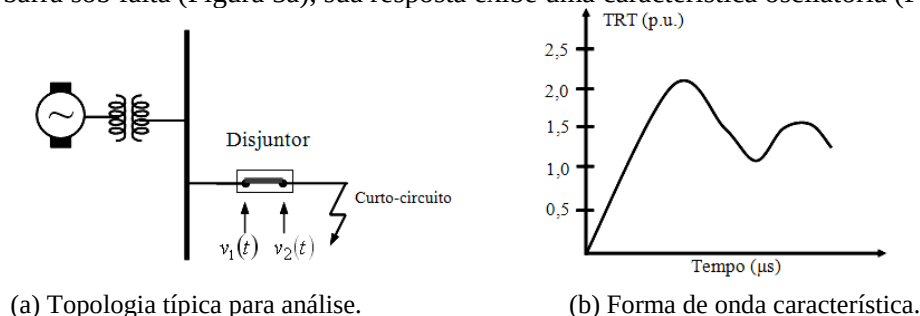


Figura 5 – Característica da TRT para faltas trifásicas não aterradas.

3. CRITÉRIOS PARA ESTUDOS

Os estudos determinísticos devem ser realizados nas situações em que se procede à quantificação das solicitações transitórias com base na simulação de parâmetros e nas características previamente definidas dos equipamentos, notadamente, na operação de abertura de equipamentos de manobra ou reprodução dos piores casos de um estudo estatístico (ONS, 2009). A seguir são indicados os critérios que serão empregados nas análises digitais e suas justificativas:

a) Para análise de faltas, tem-se por conveniência avaliar a TRT no primeiro pólo a suprimir a corrente de curto-circuito, por se caracterizar como o caso mais severo quanto ao valor de pico.

b) Embora alguns estudos venham se desenvolvendo sob a tentativa de determinar a distância do ponto da falta ao disjuntor para o qual a TCTRT é mais severa (Habadank & Kugler, 1981; Saied, 2005), tem-se constatado que este perfil não é linear. Logo, normalmente são avaliados diversos pontos de falta (entre 1 e 5 km) ao longo da linha à jusante do equipamento seccionador.

c) As normas de referência a serem adotadas na aferição dos parâmetros extraídos são aquelas que atendem os requisitos estabelecidos na fabricação do equipamento de manobra.

d) Foram representadas as capacitâncias parasitas de transformadores de potência, TPs e TCs assim como as capacitâncias concentradas de barramentos, chaves e disjuntores.

e) Análises de sensibilidade serão conduzidas em relação à representação das cargas e capacitâncias parasitas, com intuito de especificar índices concernentes à variação da margem de segurança relativa ao pico e taxa de crescimento da TRT.

f) Os estudos realizados para redução da TCTRT e do pico deste transitório devem considerar aspectos técnicos e financeiros quanto às medidas adotadas em casos de superação. Além da adequação aos limites estabelecidos pelas normas de referência, é necessária a avaliação de custos.

4. ANÁLISE PARAMÉTRICA: SIMULAÇÕES EM PLATAFORMA EMTP

Estudos de planejamento para redimensionamento de equipamentos de média tensão foram realizados na subestação Cruz do Peixe (Fig. 6) do Regional Mussurê II da ENERGISA. Serão apresentados resultados inerentes ao estudo de falta trifásica não aterrada e falta quilométrica no disjuntor 12C1, de classe de tensão 72,5 kV, e no religador 21L7, de classe 15 kV, da subestação Cruz do Peixe (Fig. 6). As simulações digitais foram realizadas com o programa ATP (*Alternative Transients Program*) (Leuven, 1987).

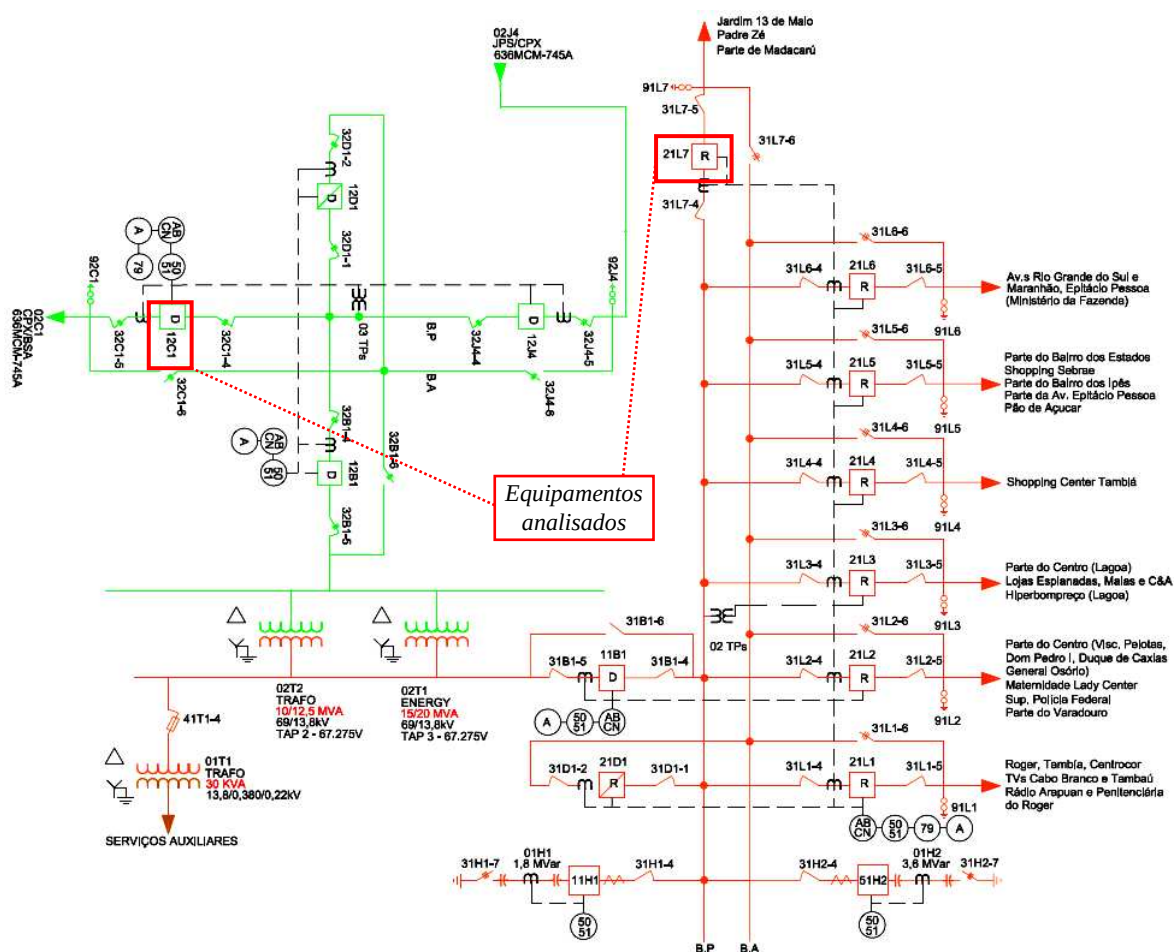
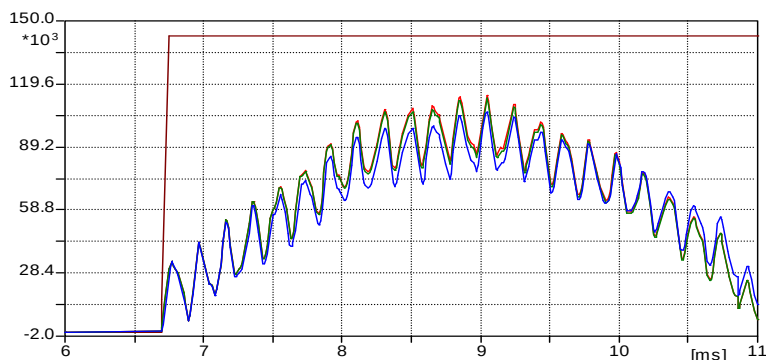


Figura 6 – Subestação Cruz do Peixe (CPX).

Os resultados apresentados nas Figuras de 7 a 10 consideram a existência ou não das cargas da subestação Cruz do Peixe. Quando da presença da carga da subestação (cenário de leve carregamento), são avaliadas as respostas proporcionadas pelos modelos RL série e paralelo. Compara-se a TRT presumida com as especificações da norma de fabricação dos equipamentos. Quanto às condições pré-falta, respeita-se a condição de regime permanente dos estudos de fluxo de carga e de curto-circuito. São expostos os casos correspondentes à análise de curto-circuito trifásico terminal não aterrado e falta monofásica quilométrica. Para este último, considera-se 2 km como distância do equipamento manobrado ao ponto da falta. Índices de superação (IS) negativos reportam a uma margem de segurança em relação aos limiares máximos plausíveis enquanto que valores positivos expressam condições inadequadas de operação.



Valor de pico

Referência:
 $U_c = 142,4 \text{ kV}$

Sem carga:
 $U_c = 114,2 \text{ kV}$

RL série:
 $U_c = 112,6 \text{ kV}$

RL paralelo:
 $U_c = 106,2 \text{ kV}$

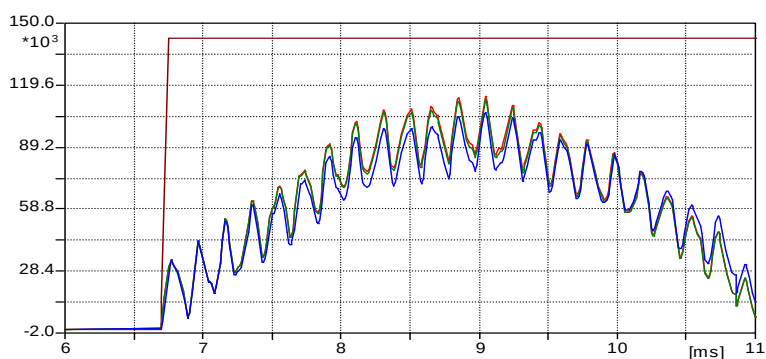
Índice de Superação

IS: - 19,8 %

IS: - 20,9 %

IS: - 25,4 %

Figura 7 – TRT no disjuntor 12C1: Eliminação de falta trifásica terminal não aterrada.



Valor de pico

Referência:
 $U_c = 142,4 \text{ kV}$

Sem carga:
 $U_c = 114,2 \text{ kV}$

RL série:
 $U_c = 112,6 \text{ kV}$

RL paralelo:
 $U_c = 106,2 \text{ kV}$

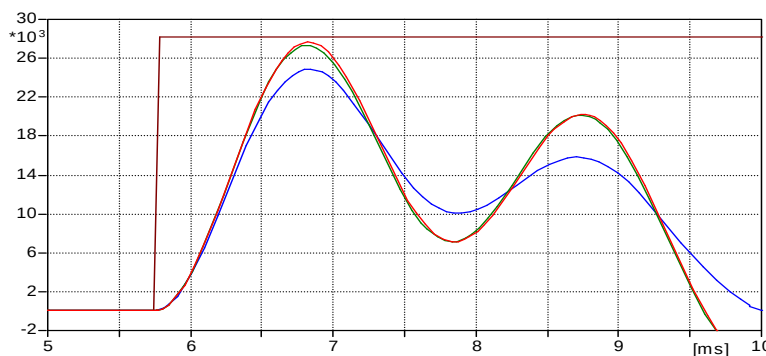
Índice de Superação

IS: - 19,8 %

IS: - 20,9 %

IS: - 25,4 %

Figura 8 – TRT no disjuntor 12C1: Eliminação de falta monofásica quilométrica.



Valor de pico

Referência:
 $U_c = 28,2 \text{ kV}$

Sem carga:
 $U_c = 27,7 \text{ kV}$

RL série:
 $U_c = 27,3 \text{ kV}$

RL paralelo:
 $U_c = 24,9 \text{ kV}$

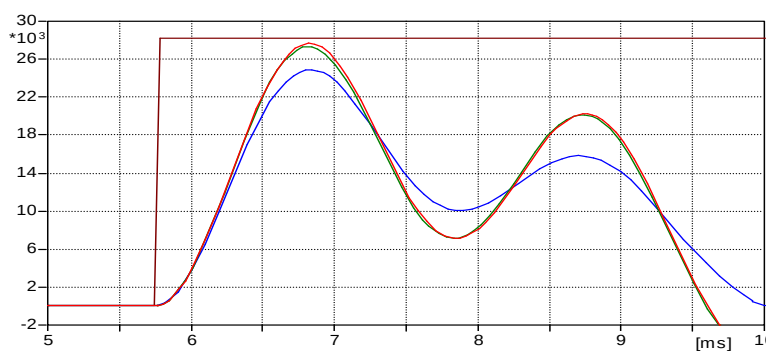
Índice de Superação

IS: - 1,8 %

IS: - 3,2 %

IS: - 11,7 %

Figura 9 – TRT no religador 21L7: Eliminação de falta trifásica terminal não aterrada.



Valor de pico

Referência:
 $U_c = 28,2 \text{ kV}$

Sem carga:
 $U_c = 27,7 \text{ kV}$

RL série:
 $U_c = 27,3 \text{ kV}$

RL paralelo:
 $U_c = 24,9 \text{ kV}$

Índice de Superação

IS: - 1,8 %

IS: - 3,2 %

IS: - 11,7 %

Figura 10 – TRT no religador 21L7: Eliminação de falta monofásica quilométrica.

Os resultados mostram que desprezar a carga da subestação produz respostas mais conservativas para os estudos de TRT, indicando cenários de superação mais brandos (índice de superação mais próximo de zero). O modelo RL série produz respostas mais conservativas que o modelo paralelo uma



vez que, em elevadas frequências, sua impedância indutiva tende a elevar-se. Apesar das respostas, o uso de comparações com registros da rede de oscilografia permite a escolha do modelo mais preciso.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos para redimensionamento de disjuntores e religadores de média tensão foram realizados. Aspectos qualitativos foram expostos para representar apropriadamente redes de distribuição, atendendo às conformidades de segurança quando da simulação da TRT em plataformas de simulação digital.

Transformadores, bancos de capacitores e linhas de transmissão merecem uma atenção especial em virtude da característica dependente da frequência de suas respostas. No domínio do tempo, os estudos realizados comprovam que a modelagem da carga é essencial na representação do fenômeno. Comparar estas informações com registros oscilográficos da resposta das cargas em condições de transitórios eletromagnéticos é a forma mais prudente para investigar ao melhor representação nos ramais. Contudo, na ausência de registros factíveis no espectro do fenômeno sob avaliação, torna-se prudente o uso de modelos conservativos, os quais deverão produzir os cenários mais críticos para a TRT.

REFERÊNCIAS

- ANSI/IEEE C37.011-1979. IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers. New York, Inc., 1979. 34 p.
- CEPEL – ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas.
- CEPEL – ANAREDE – Programa para Análise de Redes.
- 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, E. G. **Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco**. Tese de Doutorado, UFPB, Campina Grande, Brasil, abril, 1999, 177 p.
- DOMMEL, H. W., Electromagnetic Transients Program (EMTP) – Theory Book. Portland: BPA, 1996, 483 p..
- GREENWOOD, A. Electrical Transients in Power Systems, John W. & Sons, New York, 1991, 751 p..
- IEC International Standard 62271-100: High-Voltage Switchgear – Part 100: High-Voltage Alternating-current Circuit-breakers, Edition 1.1, 2001, 561 p.
- Leuven EMTP Center (1987). ATP Alternative Transients Program Rule Book. Belgium.
- NOBRE, D. M. Estudo de Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, Brasil, 85 p., 1999.
- NOBRE, D. M., NEVES, W. L. A., SOUZA, B. A. An Alternative to Reduce Medium-Voltage Transient Recovery Voltage Peaks. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TRANSIENTS (IPST)*, 2001, Rio de Janeiro, Brasil, Paper Nº IPST01-136/2001, p. 1-6.
- WANG, X., WILSON, P., ZHOU, J., MUTHUMUNI, D., KELL, D., LOWIE, K. W. Transient Recovery Voltage Investigation of 15 kV Circuit Breaker Failure. *In: IPST – INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS*, Montreal, Canada, June 2005, p. 1-6.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Procedimentos de Rede. *Sub-módulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*, Resolução 1051/07 – 25-09-2007.
- AZEVEDO, W. V. S., NEVES, W. L. A., FERNANDES JR., D., SOARES, R. M. “Efeitos da Representação de Equivalentes de Redes Elétricas em Análises de TRT: Estudo de Casos”. *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VIII CBQEE)*, Blumenau, agosto, 2009.
- GREENWOOD, A., *Electrical Transients in Power Systems*. John W. and Sons, New York, second ed. 1991.
- WHITAKER, J. C., AC Power Systems Handbook. 2nd Ed., Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 1999.
- ZANNETA JR., L. C. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. São Paulo, SP - Brasil: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- MARTINEZ, J. A. “Parameter Determination for Power System Transients”. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005.
- GUSTAVSEN, B.; MARTINEZ, J. A.; DURBAK, D.. “Parameter Determination for Modeling System Transients - Part II: Insulated Cables”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, July 2005.