

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Contribuições para Análise e Redução de Tensão de
Restabelecimento Transitória

Wilker Victor da Silva Azevêdo

Campina Grande – Paraíba – Brasil
© Azevêdo, W. V. S., Março de 2010

Wilker Victor da Silva Azevêdo

Contribuições para Análise e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Março de 2010

A994e Azevedo, Wilker Victor da Silva
 Equivalentes de redes elétricas e redução de tensão de
 restabelecimento transitória / Wilker Victor da Silva
 Azevedo. - Campina Grande, 2010.
 75 f. : il.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
 Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
 Engenharia Elétrica e Informática.

 1. Circuitos Equivalentes 2. TRT 3. Estimacao de
 Parametros 4. Equivalente Dependente de Frequencia 5.
 Dispositivo de ZnO 6. Mitigacao 7. Transitorios
 Eletromagneticos 8. Dissertacao I. Neves, Washington Luiz
 Araujo, Dr. II. Fernandes Junior, Damasio, Dr. III.
 Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande
 (PB) IV. Título

CDU 621.3.011.712(043)

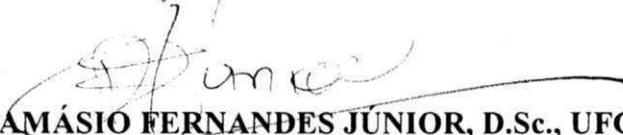
**EQUIVALENTES DE REDES ELÉTRICAS E REDUÇÃO DE TENSÃO DE
RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA**

WILKER VICTOR DA SILVA AZEVEDO

Dissertação Aprovada em 23.03.2010



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador



DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Orientador



ALÉCIO BARRETO FERNANDES, D.Sc., ONS
Componente da Banca



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO - 2010

Aos meus pais, Cláudio e Dulce, e aos meus irmãos, Cláudio Jr., Monelly e Mirelly, pelo incentivo e colaboração incessantes.

Wilker Victor

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me acompanhar e guiar nas decisões mais importantes da minha vida.

Aos meus pais, pelos ensinamentos e compreensão dos momentos que estive ausente enquanto me dedicava aos trabalhos acadêmicos, e cujo exemplo de vida me encoraja e direciona.

Aos meus queridos avós, Artur e Terezinha (*in memorian*), Joaquim e Sebastiana (*in memorian*).

A toda minha família, protagonistas na formação do meu caráter e responsáveis diretos por grande parte da minha educação.

Aos professores Washington Neves e Damásio Fernandes, pela inestimável oportunidade, pela orientação e contribuição ao meu desenvolvimento acadêmico e pelas relevantes sugestões durante a evolução da pesquisa.

À Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (COPELE), em particular ao prof. Benemar Alencar, pela oportunidade na realização de pesquisas correlatas, cujo conhecimento agrega importante parcela dos fundamentos tratados neste trabalho.

Ao professor Edson Guedes, pela colaboração e incentivo durante a realização do curso de mestrado.

Aos amigos Nelson, Célio, Ferdinando, Michelle, Eubis, Gustavo, Ângelo, Karcus, Cícero, Warner, Tiago, André, Francisco e Felipe, pelo companheirismo e contribuições diretas e indiretas na minha vida acadêmica e profissional.

Aos funcionários do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE), pelo excelente convívio.

A CAPES pelo suporte financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

"Pode-se vencer pela inteligência, pela habilidade ou pela sorte, mas nunca sem trabalho".

A. Destoef

RESUMO

Este trabalho apresenta uma técnica para estimação paramétrica de equivalentes dependentes da frequência para aplicação em estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT). Contribuições são apresentadas à representação das redes equivalentes, admitindo-se a extração de atributos das componentes harmônicas nas proximidades dos pontos de ressonância. Uma metodologia é proposta para aquisição precisa do espectro da rede externa real. Rotinas são implementadas para efetivar o cálculo dos elementos que compõem o modelo a parâmetros concentrados, proporcionando boa precisão. A validação é realizada nos domínios da frequência e do tempo, permitindo reduzir o grau de representação dos sistemas elétricos, garantindo boa confiabilidade às avaliações. Adicionalmente, visando minimizar as solicitações dielétricas impostas pela TRT, subsídios são propostos para dimensionar um dispositivo a base de varistores de Óxido de Zinco (ZnO) com a meta de limitar o valor de pico deste transitório. Testes de ensaio são reproduzidos digitalmente. Cenários de baixa frequência exigem maiores solicitações de energia ao dispositivo mitigador, no entanto, é possível caracterizar o número de pastilhas necessárias para reduzir a TRT a patamares seguros regidos pelas normas de fabricação dos equipamentos. Os resultados mostram que o dispositivo pode tornar permissivas operações qualificadas preliminarmente como proibitivas. O aporte financeiro normalmente destinado à aquisição de equipamentos de classe de tensão superior pode ser reduzido.

Palavras-chave: TRT, estimação de parâmetros, equivalente dependente da frequência, dispositivo de ZnO, mitigação, transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

This work presents a parameter estimation technique of Frequency Dependent Network Equivalents (FDNE) for application in Transient Recovery Voltage (TRV) studies. Contributions are presented to represent the network equivalent, assuming the attributes extraction of harmonic impedance components near the resonance points. A methodology is proposed for spectrum acquisition of the real external network. Routines are implemented to calculate the parameters that form a lumped model, providing good accuracy. The validation is performed in frequency and time domains, reducing electrical system modeling, ensuring reliability to assessments. Additionally, to minimize dielectrical stresses imposed by TRV, subsidies are offered to scale a device composed by Zinc Oxide (ZnO) varistors to limit TRV peak. Laboratory conditions are reproduced by digital tests. Low frequency cases require more energy from mitigating device, however, it is possible to characterize the number of discs needed to reduce TRV peak to acceptable levels specified by manufacturer standards. The results obtained in assessment presented good agreement, showing that the device can become permissive operations preliminarily qualified as unsafe. Financial support usually used to replace equipment by another with higher voltage class can be reduced.

Keywords: TRV, parameter estimation, frequency dependent network equivalent, ZnO device, mitigation, electromagnetic transients.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas e Símbolos	xiv
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Justificativas	2
1.3 Objetivos e Contribuições	3
1.4 Organização do Texto.....	4
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica	5
2.1 Tensão de Restabelecimento Transitória.....	5
2.1.1 Definições e Etapas de Planejamento	5
2.1.2 Faltas Avaliadas	8
2.1.3 Especificações Técnicas.....	11
2.1.4 Medidas Mitigadoras.....	17
2.2 Representação de Equivalentes de Redes Elétricas	19
2.2.1 Técnicas no Domínio do Tempo	19
2.2.2 Técnicas no Domínio da Frequência.....	21
2.3 Representação de Componentes da Rede	25
2.4 Sinopse	30
Capítulo 3 – Equivalentes Dependentes da Frequência	32
3.1 Aquisição do Espectro das Redes Externas	32
3.2 Topologias a Parâmetros Concentrados	35

3.3 Propriedades das Componentes Harmônicas.....	36
3.4 Formulação Matemática para Estimação Paramétrica.....	37
3.5 Algoritmos Implementados e Fluxograma do Processo	40
Capítulo 4 – Dispositivo Limitador da TRT	42
4.1 Considerações Preliminares.....	42
4.2 Circuitos para Testes de Ensaio.....	44
4.3 Característica V-I do Dispositivo	45
Capítulo 5 – Resultados e Discussões.....	47
5.1 Rede Teste	47
5.2 Análises no Domínio da Frequência.....	49
5.3 Análises no Domínio do Tempo.....	53
5.3.1 Aplicação de Equivalente Dependente da Frequência	53
5.3.2 Aplicação do Dispositivo de ZnO para Limitar o Pico da TRT.....	56
5.4 Principais Constatações	64
Capítulo 6 – Conclusões	65
Referências Bibliográficas	68

LISTA DE FIGURAS

2.1	–	Sistemas conectados por disjuntor.	6
2.2	–	Tensão de Restabelecimento Transitória após eliminação de corrente de falta.	6
2.3	–	Efeitos do uso de equivalente calculado à frequência fundamental em estudos de TRT.	8
2.4	–	Característica da TRT para faltas quilométricas.	9
2.5	–	Característica da TRT para faltas trifásicas não aterradas.	9
2.6	–	Circuito simplificado para análise da TRT oscilatória.	10
2.7	–	Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC.	11
2.8	–	Circuito trifásico simplificado para análise do fator de primeiro pólo.	12
2.9	–	Referência definida pela ANSI para disjuntores de classe de tensão inferior a 72,5 kV.	14
2.10	–	Representação por dois parâmetros de uma TRT presumida.	15
2.11	–	Envoltória a dois parâmetros: Falta trifásica não aterrada.	16
2.12		Envoltória a dois parâmetros: Falta monofásica quilométrica.	16
2.13		Célula de surto capacitiva para redução da taxa de crescimento da TRT.	17
2.14		Efeito da inclusão de células capacitivas sobre a taxa de crescimento da TRT.	17
2.15	–	Circuito discreto equivalente tipo Norton.	20
2.16	–	Topologia do equivalente Foster.	21
2.17	–	Equivalente RLC paralelo com elementos em série.	22
2.18	–	Impedância: Magnitude (Z_{MAG}), componentes real (Z_{REAL}) e imaginária (Z_{IMAG}).	22
2.19	–	Configurações de circuitos equivalentes RLC.	24
2.20	–	Sinopse temporal: Síntese de equivalentes dependentes da frequência.	25
2.21	–	Representação dos cabos: modelo PI a parâmetros concentrados.	26
2.22	–	Representação das cargas em estudos de transitórios eletromagnéticos.	27
2.23	–	Perfil harmônico das cargas como função do modelo adotado.	27

2.24	– Circuito equivalente de um capacitor.	28
2.25	– Representação dos transformadores de potência.	29
3.1	– Procedimento para localização dos equivalentes à frequência fundamental.	34
3.2	– Especificação de atributos da impedância harmônica.	36
3.3	– Topologia RLC série completa.	37
3.4	– Fluxograma para síntese e validação dos equivalentes dependente da frequência.	41
4.1	– Característica não-linear entre tensão e corrente de um varistor de óxido de zinco.	42
4.2	– Arranjo típico de um pára-raios na subestação.	43
4.3	– Dispositivo de ZnO para redução do valor de pico da TRT.	43
4.4	– Topologia dos circuitos para realização de testes de ensaio.	44
4.5	– Descrição da topologia híbrida para ensaios digitais.	45
5.1	– Regional Mussuré II: Diagrama simplificado da rede de subtransmissão e alta tensão.	48
5.2	– Análise dos efeitos do comprimento da rede externa modelada sobre a amplitude da impedância harmônica própria.	50
5.3	– Aferição das respostas da rede externa real e do equivalente dependente da frequência.	51
5.4	– Aferição das respostas em frequência após a redução da ordem do circuito equivalente.	52
5.5	– Topologia após aplicação do circuito equivalente dependente da frequência.	52
5.6	– Setor de 13,8 kV da subestação Cruz do Peixe.	54
5.7	– Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no religador 21L7: Análise do valor de pico e da taxa de crescimento.	57
5.8	– Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no religador 21L7: Primeiros microssegundos após a abertura dos contatos.	57
5.9	– Componentes da TRT no religador 21L7 antes da inserção das células capacitivas.	58
5.10	– Descrição dos dispositivos de ZnO avaliados.	58
5.11	– TRT no religador 21L7: Eliminação de falta trifásica não aterrada.	59

5.12	– TRT no religador 21L7: Eliminação de falta quilométrica (sem célula capacitiva).	59
5.13	– TRT no religador 21L7: Eliminação de falta quilométrica (com célula capacitiva).	60
5.14	– Corrente no dispositivo de ZnO: Eliminação de falta trifásica não aterrada.	61
5.15	– Energia no dispositivo de ZnO: Eliminação de falta trifásica não aterrada.	61
5.16	– Perfil de tensão no terminal do religador 21L7 localizado no lado da carga: Eliminação de falta monofásica quilométrica.	62
5.17	– TRT entre os terminais do equipamento teste quando submetido à condição transitória de alta frequência.	63
5.18	– Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO na limitação do pico da TRT sob condição transitória de alta frequência.	63

LISTA DE TABELAS

2.1	– Fator de amplitude (k_{af}) para equipamentos com nível de tensão inferior a 100 kV.	13
2.2	– Valores padronizados para parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas: Representação a dois parâmetros (IEC 62271-100/2006).	13
2.3	– Parâmetros de referência da TRT especificada para equipamentos de classe de tensão 15 kV – norma ANSI C37.06 (1979).	14
2.4	– Valores padronizados pela ANSI para parametrização das envoltórias da TRT especificada sob cenário de eliminação de falta trifásica não aterrada.	15
2.5	– Modelos de componentes para estudos de TRT.	30
3.1	– Função de transferência das topologias de arranjo paralelo.	35
4.1	– Informações técnicas dos elementos não-lineares à base de ZnO.	45
4.2	– Relação entre tensão (V) e corrente (I) para a associação série de elementos cilíndricos de varistores de ZnO.	46
5.1	– Atributos da impedância harmônica própria.	51
5.2	– Resultados das análises de falta trifásica não aterrada no disjuntor 12J4.	55
5.3	– Resultados das análises de falta trifásica não aterrada no religador 21L7.	55
5.4	– Resultados das análises de falta quilométrica no religador 21L7.	55
5.5	– Síntese dos resultados obtidos na análise de adequabilidade do religador 21L7.	60

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ANSI	–	American National Standards Institute
ATP	–	Alternative Transients Program.
CAPES	–	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CCON	–	Comitê Coordenador de Operações Norte-Nordeste.
CHESF	–	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CNI	–	Capacidade Nominal de Interrupção.
EDF	–	Equivalente Dependente da Frequência.
EMTP	–	Electromagnetic Transients Program.
FDNE	–	Frequency Dependent Network Equivalent.
GSE	–	Grupo de Sistemas Elétricos.
IEC	–	International Electrotechnical Commission.
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
ONS	–	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
TCTRT	–	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória.
TNA	–	Transient Network Analyzer.
TRT	–	Tensão de Restabelecimento Transitória.
TRV	–	Transient Recovery Voltage.
UFMG	–	Universidade Federal de Campina Grande.
ZnO	–	Óxido de Zinco.

INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Com a crescente expansão e interligação dos sistemas elétricos, a análise de alterações topológicas provocadas por operações de chaveamento torna-se fundamental nos estudos de transitórios eletromagnéticos. No contexto das sobretensões de manobra, a avaliação da superação de disjuntores e religadores por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) tem caráter cíclico e evidencia a necessidade de se determinarem os requisitos impostos a estes equipamentos em face da reconfiguração das redes elétricas.

A busca por maior confiabilidade no diagnóstico da TRT traduz uma exigência contínua ao aprimoramento de modelos e técnicas e suscita o interesse de concessionárias do setor elétrico no desenvolvimento de pesquisas correlatas. Tem-se como perspectiva a minimização de dispêndios financeiros decorrentes do dimensionamento inadequado de equipamentos seccionadores e dispositivos mitigadores além da representação mais precisa de componentes do sistema elétrico em plataformas de simulação digital do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*).

Devido à dificuldade que envolve a solução e modelagem detalhada de sistemas elétricos de grandes dimensões, torna-se essencial identificar áreas no qual o evento transitório justifica maior interesse. O restante do sistema é modelado normalmente via uso de circuitos equivalentes. Na fase de projeto esta é uma solução que tem sido adotada por analistas em estudos de regime permanente e transitório. Contudo, os modelos utilizados na representação dos equivalentes devem reproduzir com critérios mínimos o comportamento da impedância harmônica das redes externas na faixa de frequência do fenômeno sob estudo.

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 Working Group 15.08, 2009) pode introduzir erro no diagnóstico da tensão de

restabelecimento. Neste cenário, estudos recentes mostram discrepâncias consideráveis no cálculo dos parâmetros presumidos empregados no dimensionamento dos equipamentos e de seus dispositivos mitigadores (Azevêdo *et al*, 2009). Em consonância, uma vez que a TRT pode compreender um espectro da ordem de dezenas de kHz (Martinez, 2005), dificuldades surgem em relação à complexidade matemática que envolve a síntese de circuitos dependentes da frequência.

Outro fator importante nas análises de Tensão de Restabelecimento Transitória é a busca pela integridade dos equipamentos durante a eliminação de faltas no sistema elétrico. Neste sentido, deve-se convergir para a consecução de limitadores da corrente de falta (Amon Filho *et al*, 2005), da taxa de crescimento (Colclaser *et al*, 1971) e do valor de pico deste transitório (Nobre, 1999). Tais parâmetros afetam diretamente o comportamento térmico e dielétrico na câmara de extinção dos equipamentos, comprometendo a segurança no processo de abertura. Neste enfoque, embora os estudos sobre TRT venham sendo conduzidos há mais de meio século (Park & Skeats, 1931; Evans & Monteith, 1937), raros têm sido os trabalhos para caracterizar um dispositivo mitigador do seu valor de pico. Adicionalmente, uma vez que os custos para substituição de equipamentos superados dielectricamente são elevados, o desenvolvimento de pesquisas na área é relevante.

Diante do exposto, percebe-se que o cálculo de equivalentes dependentes da frequência se faz fundamental para o correto dimensionamento de disjuntores e religadores. Também se torna imprescindível a caracterização de um dispositivo mitigador do pico da TRT, a fim de limitar cenários de severidade aos níveis estabelecidos pelas normas técnicas de fabricação dos equipamentos, proporcionando maior confiabilidade operativa.

1.2. Justificativas

A aplicação de redes equivalentes dependentes da frequência em estudos sobre TRT é necessária em análises que contemplam sistemas elétricos de grande porte. Estes circuitos podem ser obtidos a partir do espectro das redes externas na faixa de frequência do fenômeno, que se caracteriza não apenas por uma resposta predominantemente indutiva, como geralmente se traduz sua impedância à frequência fundamental. Oscilações entre perfis indutivo, resistivo e capacitivo se alternam ao

longo do espectro. Tal comportamento deve ser registrado na modelagem do equivalente.

Na qualificação do impacto desta sobretensão e no dimensionamento das condições transitórias impostas aos dispositivos de proteção das concessionárias são identificadas normalmente falhas dielétricas que podem comprometer o desempenho dos equipamentos e, conseqüentemente, a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores, tornando plausível inclusive sua interrupção. Justifica-se então a busca por um dispositivo mitigador do pico da TRT (Nobre *et al*, 2001). Como motivação adicional, reporta-se a minimização dos subsídios financeiros relacionados a:

- Aquisição de dispositivos mitigadores em condições nas quais não há necessidade ou erros de projeto e dimensionamento dos mesmos;
- Substituição de equipamentos por outros de classe de tensão superior;
- Custos da energia não suprida a parte dos consumidores, consequência de falha em disjuntores e religadores (resultado de erros de dimensionamento).

1.3. Objetivos e Contribuições

Sintetizam-se como metas desta dissertação a proposição de uma metodologia para síntese de redes equivalentes dependentes da frequência e a caracterização de diretrizes necessárias ao dimensionamento de um dispositivo capaz de reduzir o valor de pico da TRT aos limiares seguros estabelecidos por norma.

As principais contribuições do trabalho são:

- Desenvolver uma metodologia para aquisição adequada do espectro da impedância harmônica das redes externas e propor aperfeiçoamento no processo de estimação paramétrica de equivalentes dependentes da frequência;
- Fornecer subsídios para a consecução de um dispositivo limitador do pico da TRT, expondo cenários de máxima solicitação, sua dependência com os tipos de falta e seu uso em acoplamento com elemento mitigador da taxa de crescimento da TRT.

A dissertação se insere em trabalhos do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), a exemplo de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) com recursos aportados pela ENERGISA.

1.4. Organização do Texto

Os fundamentos teóricos e a revisão bibliográfica sobre Equivalentes Dependentes da Frequência (EDF) e Tensão de Restabelecimento Transitória são tratados no Capítulo 2. Apresenta-se também uma síntese das disposições contidas nas principais normas técnicas que descrevem critérios para suportabilidade de equipamentos quanto à TRT.

Especifica-se no Capítulo 3 o procedimento utilizado para aquisição do espectro das redes externas e uma técnica para estimação dos parâmetros de circuitos equivalentes dependentes da frequência. Acrescenta-se uma breve descrição das rotinas concebidas e o fluxograma do processo.

Aspectos qualitativos relacionados à caracterização de um dispositivo composto de varistores de Óxido de Zinco (ZnO) para limitação do pico da TRT são apresentados no Capítulo 4. Circuitos utilizados na realização de testes digitais são apresentados.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com o uso de equivalentes dependentes da frequência em análises de TRT. O capítulo tece considerações sobre a eficácia do EDF nos domínios da frequência e do tempo. Por fim, são realizadas análises com aplicação do limitador do valor de pico da TRT.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões e sugere diretrizes para pesquisas futuras relacionadas ao tema.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Especial interesse da comunidade científica tem se voltado há algumas décadas para a representação adequada de equivalentes do sistema elétrico em estudos que contemplam um espectro de frequência mais amplo que as vizinhanças da fundamental (Hingorani & Burberry, 1970; Clerici & Marzio, 1970). Apesar dos avanços alcançados desde então, o uso de equivalentes simplificados em estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) ainda é difundido, podendo acarretar o sub ou superdimensionamento dos seus parâmetros presumidos.

A redução da taxa de crescimento da TRT (Colclaser *et al*, 1971) e, mais recentemente, a busca por um dispositivo limitador do seu valor de pico (Nobre *et al*, 2001) também se traduzem como de importância intrínseca. No entanto, para sua efetivação é essencial realizar análises que contemplam as condições transitórias mais severas, evitando o correto dimensionamento dos dispositivos mitigadores.

O capítulo se inicia destacando aspectos relacionados ao fenômeno da TRT, apresentando definições, requisitos para análise, especificações técnicas e a limitação de cenários de severidade aos níveis de segurança estabelecidos pelas normas de referência. Em seguida é apresentada uma síntese dos principais avanços que envolvem a representação de equivalentes de redes dependentes da frequência.

2.1 Tensão de Restabelecimento Transitória

2.1.1 Definições e Etapas de Planejamento

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 de interrupção (CNI) das correntes de curto-circuito e o comportamento térmico e dielétrico do meio de extinção do arco são fatores relevantes para análise da suportabilidade dos equipamentos (D'Ajuz *et al*, 1985).

No que concerne às 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 (Colclaser *et al*, 1976; Wagner & Smith, 1984; Nobre, 1999; ANSI/IEEE C37.011, 2005). 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 2.1), cada uma delas redistribui sua energia, adequando-se a um novo estado.

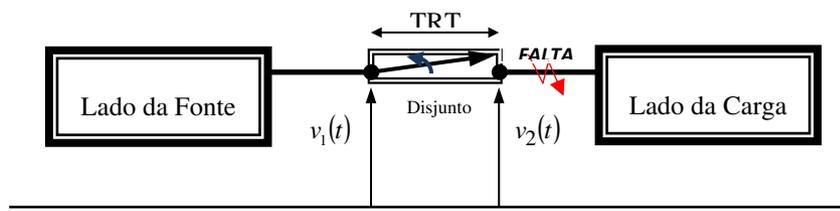


Figura 2.1 – Sistemas conectados por disjuntor.

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 2.2 é mostrado ilustrativamente o perfil de TRT para um disjuntor de classe de tensão 72,5 kV após a eliminação de corrente de falta (Azevedo *et al*, 2010).

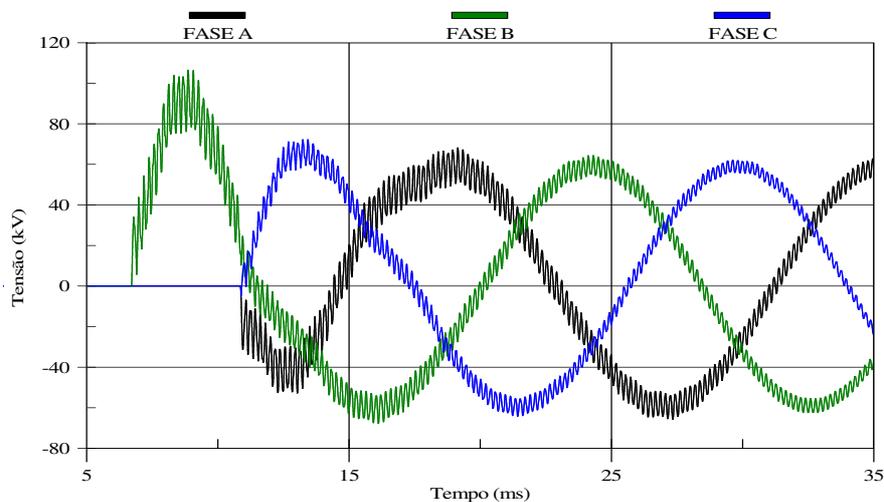


Figura 2.2 – Tensão de Restabelecimento Transitória após eliminação de corrente de falta.

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 (Sinder, 2007). 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 à tensão disruptiva do meio isolante. Além da falha do equipamento, o reacendimento do arco pode provocar os mesmos danos estruturais irreversíveis.

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 (Swindler *et al*, 1997; Wang *et al*, 2005; Zhou *et al*, 2006; Duarte *et al*, 2007).

Dentre as etapas de planejamento para análise e diagnóstico da TRT, destacam-se:

- *Modelagem*: Descrição de modelos suficientemente precisos de componentes do sistema de potência na faixa de frequência do fenômeno;
- *Especificação*: Análise dos tipos de falta que provocam as mais severas solicitações térmicas e dielétricas aos equipamentos, ou seja, que acarretam os patamares mais elevados de valor de pico e taxa de crescimento da TRT;
- *Aferição*: Comparação dos valores presumidos por simulação com as especificações de referência das normas de fabricação dos equipamentos;
- *Mitigação*: Dimensionamento de dispositivos limitadores em conformidade com o tipo de superação do equipamento (taxa de crescimento e/ou valor de pico);
- *Implementação*: Validação, realização de testes (digitais ou em laboratório, quando necessários) e implantação do dispositivo mitigador em campo.

As etapas de mitigação e implementação são desnecessárias quando o equipamento se encontra com parâmetros presumidos abaixo dos limites das referências. Em relação à etapa de modelagem, a utilização de equivalentes

simplificados a 60 Hz na substituição de partes do sistema elétrico pode incidir em sobretensões acima das condições impostas pela rede externa real, ocasionando como diagnóstico a superação do equipamento em cenários para o qual tal fato não ocorre (Figura 2.3). Em função disto, a substituição do disjuntor/religador por outro de classe de tensão superior ou a adoção de medidas mitigadoras ocasionaria dispêndios financeiros notadamente dispensáveis.

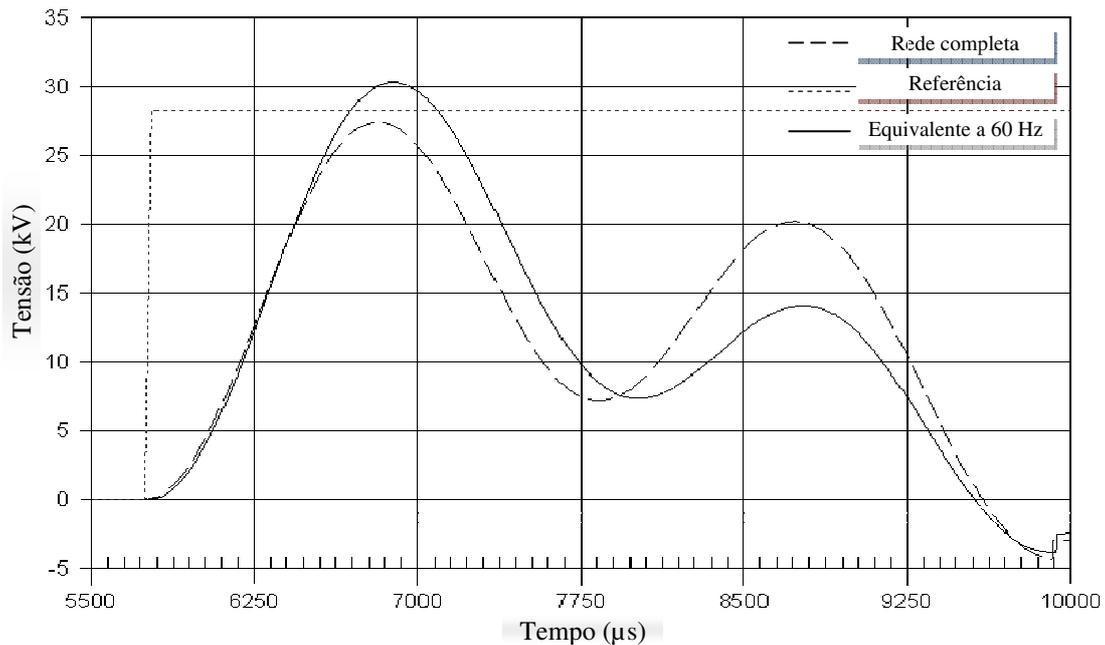


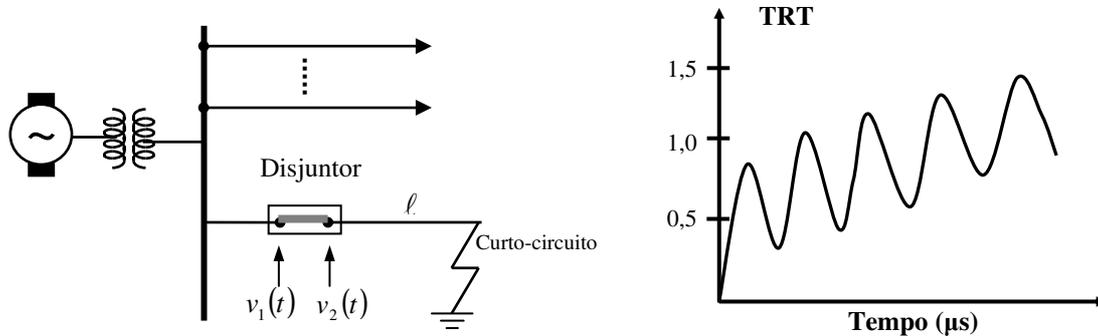
Figura 2.3 – Efeitos do uso de equivalente calculado à frequência fundamental em estudos de TRT.

2.1.2 Faltas Avaliadas

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 análise da suportabilidade de equipamentos quanto à TRT.

Faltas quilométricas são curto-circuitos localizados em linhas de transmissão ou distribuição conectadas aos equipamentos seccionadores, a alguns quilômetros (ℓ) dos mesmos (Figura 2.4a). Este tipo de falta proporciona considerável elevação térmica ao meio de extinção do arco decorrente de um alto gradiente da TRT nos primeiros microssegundos que sucedem a separação dos pólos, com uma forma de onda de característica dente de serra (Figura 2.4b). Em geral, a componente no lado da linha $v_2(t)$ apresenta um perfil oscilatório com frequência superior ao correspondente espectro

$v_I(t)$ no lado da fonte. Testes realizados pela General Electric (Skeats *et al*, 1957), Westinhouse (Falk *et al*, 1959) e Siemens (Habedank & Kugler, 1981) comprovam a elevada taxa de crescimento (TCTRT) quando da supressão deste tipo de falta.



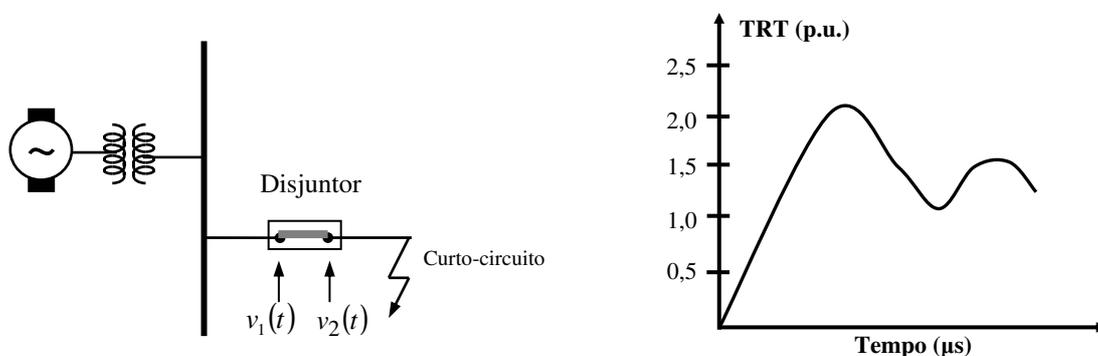
(a) Topologia típica para análise.

(b) Forma de onda característica.

Figura 2.4 – Característica da TRT para faltas quilométricas.

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 (Habedank & Kugler, 1981; Saied, 2005), tem-se constatado que este perfil não é linear. Neste caso, normalmente são avaliados diversos pontos de falta (entre 1 e 5 km) ao longo da linha à jusante do equipamento seccionador.

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 conectados na barra sob falta (Figura 2.5a), sua resposta exibe uma característica oscilatória (Figura 2.5b) (Colclaser *et al*, 1976).



(a) Topologia típica para análise.

(b) Forma de onda característica.

Figura 2.5 – Característica da TRT para faltas trifásicas não aterradas.

Para o circuito simplificado da Figura 2.6, algumas conclusões podem ser extraídas em relação ao perfil da TRT na eliminação de falta terminal pelo disjuntor.

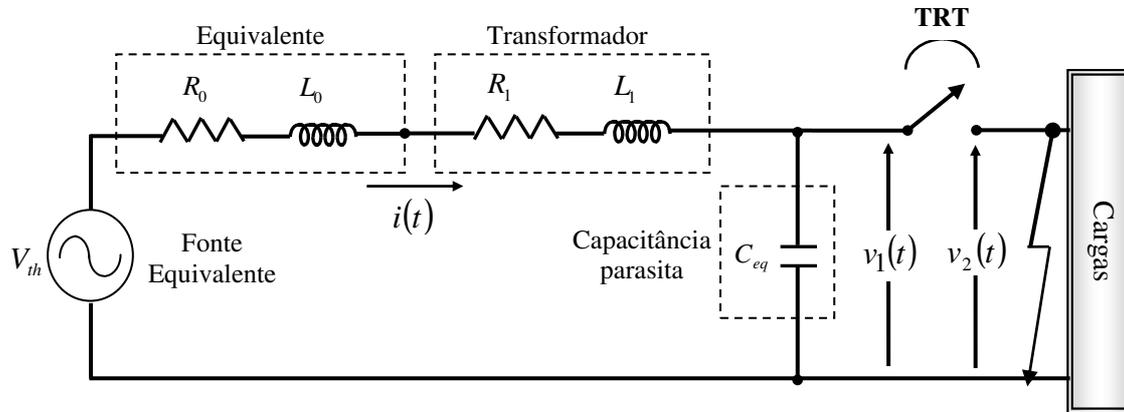


Figura 2.6 – Circuito simplificado para análise da TRT oscilatória.

A TRT para este caso equivale à tensão $V_c(t)$ sob a capacitância parasita C_{eq} (de cabos, bucha do transformador e o do próprio disjuntor), uma vez que a tensão $v_2(t)$ no lado da carga é nula. Considerando $R_{eq} = R_0 + R_1$ e $L_{eq} = L_0 + L_1$ e admitindo o perfil senoidal $V_{th} = V_m \cdot \text{sen}(\omega t)$ da fonte equivalente, tem-se:

$$\frac{d^2 V_c(t)}{dt^2} + \frac{R_{eq}}{L_{eq}} \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{1}{L_{eq} C_{eq}} V_c(t) = \frac{V_m}{L_{eq} C_{eq}} \text{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

Caso as reflexões nos pontos de descontinuidade da rede sejam desprezíveis em relação à TRT, a solução de (2.1) apresentará as seguintes características (Dufournet, 2005):

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

Para o caso em que $R_{eq} \approx 0$, a TRT entre os contatos do disjuntor é dada por:

$$V_{TRT}(t) = V_c(t) = V_m \omega_0^2 \left(\frac{\cos \omega t - \cos \omega_0 t}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (2.2)$$

Em que $\omega_0 = 1/\sqrt{L_{eq} C_{eq}}$ é a frequência natural de oscilação do circuito.

Normalmente $\omega_0 \gg \omega$, o que implica $\omega_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2) \approx 1$. Adicionalmente, constata-se que a defasagem angular ωt é bastante próxima de zero, uma vez que o

tempo de análise da TRT é da ordem de microssegundos ou unidades de milissegundos. A partir destas observações, obtém-se:

$$V_{TRT}(t) = V_m (1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.3)$$

Sinteticamente, a característica da TRT e sua severidade são dependentes do tipo e localização da falta, da topologia da subestação e circuitos de transmissão do sistema, além de sua condição de carregamento.

2.1.3 Especificações Técnicas

Os limiares de solicitação térmica e dielétrica são regidos por normas técnicas e geralmente conduzem fabricantes e concessionárias à realização de ensaios em laboratório e/ou testes digitais considerando os tipos de falta mais severos. Uma síntese dos principais aspectos das normas relacionados à etapa de aferição é conduzida a seguir com foco em equipamentos de classe de tensão inferior a 100 kV.

(a) Norma IEC 62271-100

As normas técnicas vigentes estabelecem requisitos específicos para 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 e a “TRT especificada” é aquela em que seus parâmetros são valores de referência.

As normas IEC definem para equipamentos de classe de tensão igual ou inferior a 100 kV, uma envoltória especificada através de dois segmentos de reta, definida pelo método de dois parâmetros (Figura 2.7). Esta especificação também tem sido aplicada em disjuntores de classe de tensão superior a 100 kV cuja relação entre a corrente de curto-circuito e a capacidade de interrupção simétrica apresenta valores abaixo de 30%.

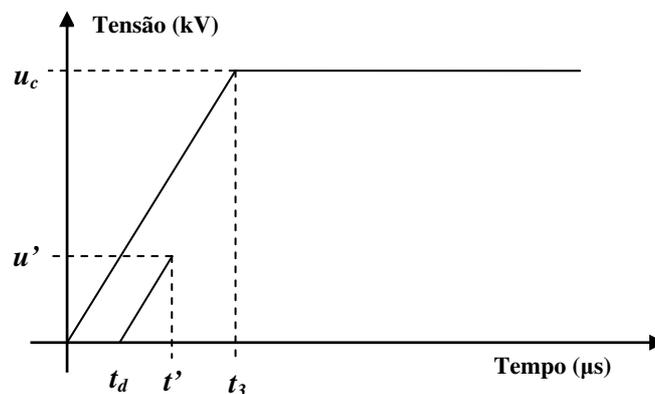


Figura 2.7 – Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC.

Na Figura 2.7, u_c é o maior valor de pico da TRT e t_3 o tempo para atingi-lo. O segmento de reta definindo um retardo é considerado somente para testes de ensaio. Parte de um ponto correspondente ao retardo nominal (t_d) e se desenvolve paralelamente ao primeiro segmento de reta do traçado de referência da TRT até as coordenadas de tensão (u') (correspondente a um terço do valor de pico u_c) e tempo t' .

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

O fator de primeiro pólo (k_{pp}) representa a relação entre a componente fundamental da tensão do primeiro pólo do disjuntor a suprimir a corrente de curto-circuito (antes da eliminação da falta pelos outros pólos) e seu correspondente valor de regime após a supressão da falta por todos os pólos. Para faltas trifásicas não aterradas (Figura 2.8a), a norma IEC 62271-100 (2006) considera $k_{pp} = 1,5$ para disjuntores de classe de tensão inferior a 100 kV. Este parâmetro apresenta valor unitário quando da análise de faltas quilométricas (Figura 2.8b), uma vez que a tensão entre os pólos do disjuntor tem como referência o valor de tensão fase-terra da fase atingida.

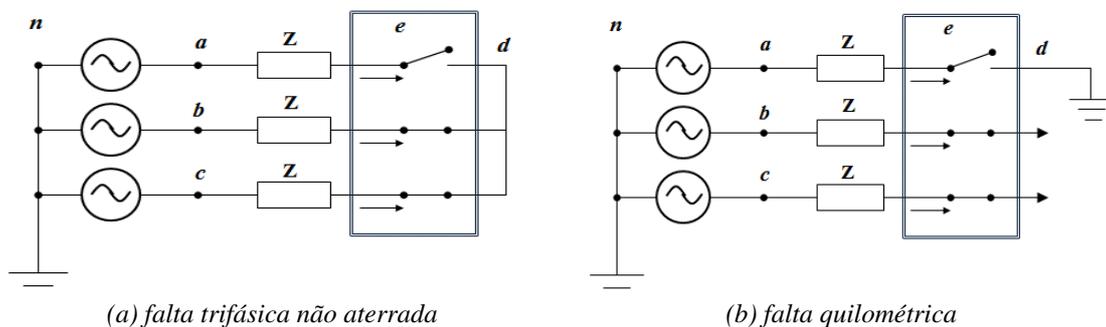


Figura 2.8 - Circuito trifásico simplificado para análise do fator de primeiro pólo.

O fator de amplitude (k_{af}) representa a relação entre o máximo valor fase-terra da TRT e de sua componente à frequência fundamental. Este parâmetro varia de acordo com o tipo de falta e segundo a relação entre a corrente de curto-circuito no ponto da falta e a máxima capacidade de interrupção do disjuntor (%CNI). Os valores atribuídos a k_{af} são apresentados na Tabela 2.1. A especificação apresentada é válida apenas para sistemas cujos cabos que conectam disjuntores e equipamentos adjacentes apresentam um comprimento inferior a 100 m (Dufournet & Montillet, 2005).

Tabela 2.1. Fator de amplitude (k_{af}) para equipamentos 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. O valor de crista da TRT especificada por norma é dado por:

$$u_c = k_{pp} k_{af} \sqrt{\frac{2}{3}} u_r \quad (2.4)$$

A Tabela 2.2 exibe valores de parâmetros para obtenção das envoltórias de norma no caso de equipamentos com classe de tensão 15,0 e 72,5 kV.

Tabela 2.2. Valores padronizados para parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas: Representação a dois parâmetros (IEC 62271-100/2006).

Classe de Tensão 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	0,91
	T60	1,5	1,65	30,3	21,0	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	93,0	1,47
	T60	1,5	1,65	146	62,0	2,35
	T30	1,5	1,74	155	37,0	4,19
	T10	1,5	1,80	160	37,0	4,32

(b) Normas ANSI

A norma ANSI C37.06-1979, com atualização do ano de 2000 (Kirkiland & Dufournet, 2007), define para disjuntores localizados em redes aéreas, de classe de tensão igual ou inferior a 72,5 kV, que a TRT é representada pela tradicional envoltória tipo $(1 - \cos(\omega t))$ com valor de crista E_2 igual a 1,88 vezes a máxima tensão nominal do disjuntor (Figura 2.9).

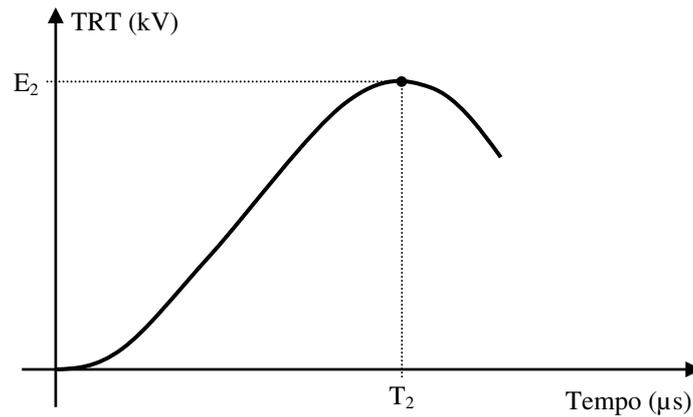


Figura 2.9 – Referência definida pela ANSI para disjuntores de classe de tensão inferior a 72,5 kV.

A TRT é definida, neste caso, como:

$$V_{\text{TRT}}(t) = E_2 [1 - \cos(\omega t)] \quad (2.5)$$

Em que $\omega = \pi/T_2$.

A atribuição do fator 1,88 ao valor de pico (E_2) se assemelha às condições impostas pela norma IEC. O fator de amplitude é considerado constante e igual a 1,54, ou seja, independe da corrente de curto e da capacidade de interrupção do disjuntor (Tabela 2.3). Para aferir as tangentes das envoltórias presumida e especificada, a taxa de crescimento das referências normalizadas é obtida não apenas pela relação direta entre valor de pico (E_2) e tempo (T_2), havendo um fator multiplicativo de 1,138 que traduz a correção referente ao cálculo da tangente da envoltória tipo $(1 - \cos(\omega t))$ (Wagner & Smith, 1984).

Tabela 2.3 - Parâmetros de referência da TRT especificada para equipamentos de classe de tensão 15 kV – norma ANSI C37.06 (1979).

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

Atualizações apresentadas a partir do início da última década (ANSI Std C37.06, 2000) visaram adequar a parametrização das envoltórias como função da corrente de curto-circuito e da capacidade nominal de interrupção do disjuntor. A Tabela 2.4 apresenta o fator multiplicativo (K) adicionado e os parâmetros associados a alguns

disjuntores com classe de tensão inferior a 100 kV. As informações se referem ao caso de falta trifásica não aterrada.

Tabela 2.4. Valores padronizados pela ANSI para parametrização das envoltórias da TRT especificada sob cenário de eliminação de falta trifásica não aterrada.

Tensão nominal u_r (kV)	% CNI	E_2 (kV) C37.06/1979	Fator (K)	E_2 (kV) C37.06/2000	Tempo t_3 (μs)	Valor corrigido (μs)	TCTRT ($kV/\mu s$)	
							C37.06 1979	C37.06 2000
15	T100	28,2	1,00	28,2	36,0	36,0	0,89	0,78
	T60	28,2	1,07	30,2	36,0	24,1	0,89	1,24
	T30	28,2	1,13	31,9	36,0	14,4	0,89	2,19
	T10	28,2	1,17	33,0	36,0	14,4	0,89	2,28
72,5	T100	136,0	1,00	136,0	106,0	106,0	1,46	1,46
	T60	136,0	1,07	145,5	106,0	71,0	1,46	2,33
	T30	136,0	1,13	153,7	106,0	42,4	1,46	4,13
	T10	136,0	1,17	159,1	106,0	42,4	1,46	4,27

(c) TRT Presumida

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 2.10) da forma de onda da TRT obtida da análise por simulação, medição ou teste.

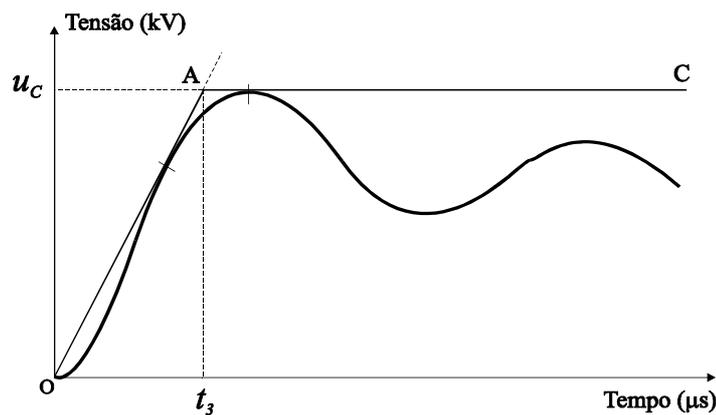


Figura 2.10 - Representação por dois parâmetros de uma TRT presumida.

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 (valores de referência).

(d) Relação entre a Corrente de falta e Capacidade de Interrupção

O nível da corrente de curto-circuito a ser interrompida altera significativamente a capacidade térmica e dielétrica do meio de extinção do arco. Quanto menor a relação entre a corrente de curto e a capacidade nominal de interrupção do equipamento (%CNI), maiores as chances de sucesso na abertura. Em outras palavras, a capacidade de eliminação do defeito por parte dos dispositivos de proteção aumenta de forma inversamente proporcional ao nível da corrente a ser interrompida. Isto se traduz de forma clara nas especificações de referência adotadas pela norma IEC (Figuras 2.11 e 2.12).

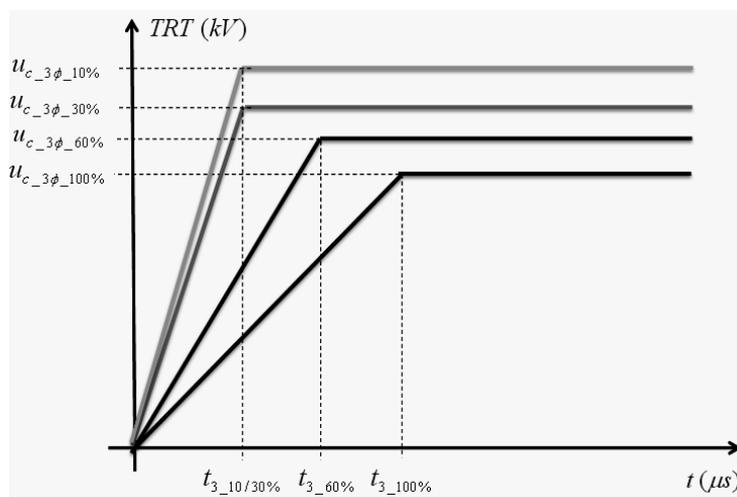


Fig. 2.11 – Envoltória a dois parâmetros: Falta trifásica não aterrada.

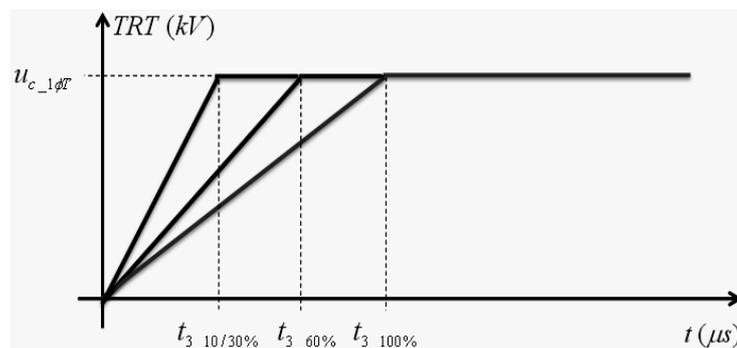


Fig. 2.12 – Envoltória a dois parâmetros: Falta monofásica quilométrica.

O fator de amplitude (k_{af}) tem maior ponderação nas aferições de falta trifásica não aterrada, afetando diretamente as normatizações de valor de pico e taxa de crescimento. Para estudos de falta quilométrica não há ponderação variável em relação ao valor de pico, entretanto, como a referência do eixo dos tempos é a mesma para o

caso de faltas trifásicas, há uma alteração na suportabilidade térmica admissível, relacionada de forma intrínseca ao valor de taxa de crescimento da TRT.

2.1.4 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 2.13) (Colclaser *et al*, 1971; Swindler *et al*, 1997) para reduzir a frequência de oscilação da TRT (Figura 2.14).

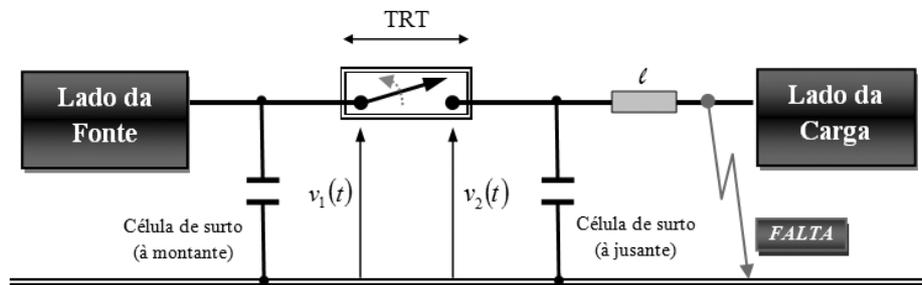


Figura 2.13 – Célula de surto capacitiva para redução da taxa de crescimento da TRT.

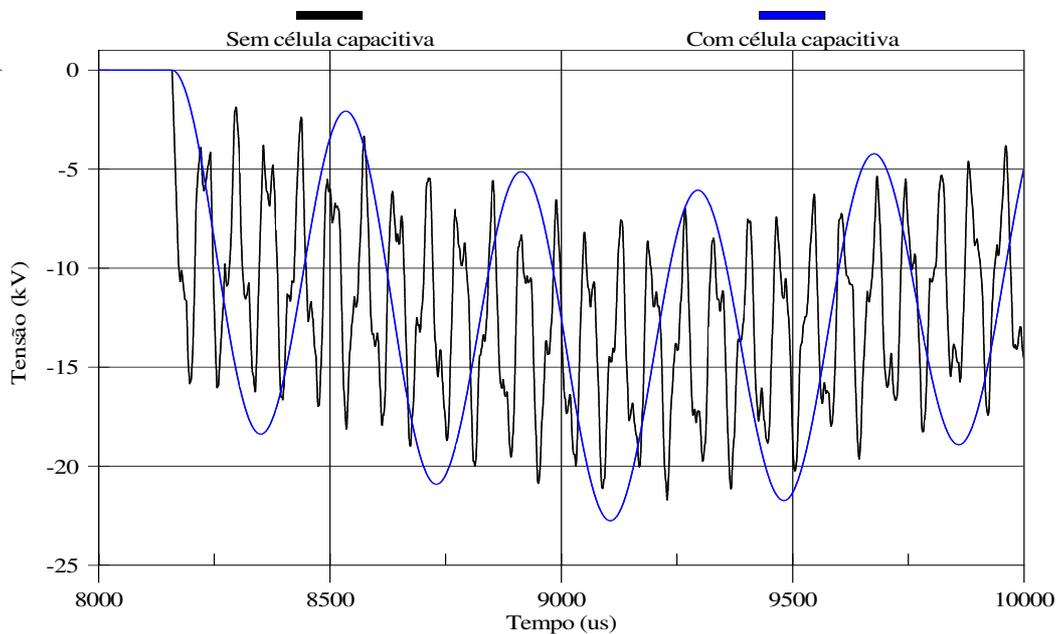


Figura 2.14 – Efeito da inclusão de células capacitivas sobre a taxa de crescimento da TRT: Aplicação em um religador de classe 15 kV na eliminação de falta quilométrica.

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 $v_2(t)$ à jusante do disjuntor. Por sua vez, a localização das células de surto no lado da fonte é evitada quando se detecta condição de superação na análise de falta trifásica, permitindo a redução da frequência de oscilação da tensão $v_1(t)$ 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 (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 de pico da TRT.

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*) ou, mais comumente, a substituição do equipamento por outro de classe de tensão superior (Alves, 2006; Wang *et al*, 2005; Costa *et al*, 2009). Para este último caso, as concessionárias destinam um elevado aporte financeiro, o que tem suscitado a busca por uma alternativa para redução do pico da TRT (Nobre, 1999).

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, a revalidação do dimensionamento de disjuntores de classe 15 kV quanto à TRT foi realizada na subestação Angelim da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco) (CHESF, 1998; Fernandes Jr. *et al*, 1998). 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 (Nobre *et al*, 2000; Nobre *et al*, 2001). De fato, devido a propriedade não linear entre tensão e corrente, o dispositivo de ZnO utilizado com esta aplicação 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.

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 a base de ZnO mostra-se atrativo financeiramente. Em concordância, com o objetivo de fornecer subsídios para a realização de testes e para a futura implantação do dispositivo em campo, é fundamental avaliar seu desempenho frente a transitórios de baixa frequência (<5 kHz) bem como sob eliminação de faltas quilométricas.

Avaliar a utilização simultânea do dispositivo de ZnO com células de surto aplicadas na redução da TCTRTR pode ser fundamental para o correto dimensionamento do mesmo. Reproduzir digitalmente condições de ensaio de laboratório também se mostra importante para descrever cenários que subsidiam as condições de corrente e energia absorvida como função da frequência do transitório e do tipo de falta que o equipamento deve interromper. Ponderações devem ser analisadas sob a ótica da transferência de parte do surto $v_I(t)$ do lado da fonte para o ramal de distribuição das cargas, caso a energia dissipada pelo surto em cenário de faltas aterradas seja absorvida apenas parcialmente por parte do equipamento mitigador.

2.2 Representação de Equivalentes de Redes Elétricas

Estudos de transitórios eletromagnéticos frequentemente requerem a modelagem de sistemas de potência complexos do ponto de vista do número de componentes existentes. Contudo, a representação em detalhes destes sistemas é normalmente evitada em análises conduzidas via plataformas de simulação do tipo EMTP. A fim de reproduzir a resposta das redes externas tanto para operações de regime permanente como transitório, tem-se utilizado métodos diretos e de otimização para resolução do problema. Uma das formas de classificar as técnicas sob uso leva em consideração o domínio em que a abordagem é realizada: tempo ou frequência.

2.2.1 Técnicas no Domínio do Tempo

Abur & Singh (1993) propuseram a representação das redes externas com base em técnicas diretamente aplicáveis ao domínio do tempo, sintetizando um filtro discreto que é convertido em um equivalente Norton. O filtro é conectado na barra de fronteira do sistema para caracterizar a relação entre tensão e corrente:

$$I(s) = k \cdot \frac{N(s)}{D(s)} \cdot V(s). \quad (2.6)$$

Em que k é um escalar, $N(s)$ e $D(s)$ são polinômios de ordem p , para os quais reescrevendo a equação (2.6) no domínio do tempo fornecem o seguinte resultado:

$$\left(d_0 + d_1 \frac{d}{dt} + \dots + d_p \frac{d^p}{dt^p} \right) i(t) = k \left(n_0 + n_1 \frac{d}{dt} + \dots + n_p \frac{d^p}{dt^p} \right) v(t). \quad (2.7)$$

Utilizando o método de Euler regressivo (Araújo & Neves, 2005), a equação (2.7) é convertida em um conjunto de equações de diferenças linear:

$$i(t) + a_1 i(t - \Delta t) + \dots + a_p i(t - p\Delta t) = g_0 v(t) + g_1 v(t - \Delta t) + \dots + g_p v(t - p\Delta t). \quad (2.8)$$

Sendo Δt o passo de integração e os coeficientes a_i e g_i parâmetros estimados pelo método. A ordem p é relacionada com o espectro no qual o modelo será válido.

Agrupando-se os termos históricos em (2.8), obtém-se a expressão (2.9), a qual corresponde o equivalente Norton apresentado na Figura 2.1.

$$\begin{aligned} i(t) &= g_0 v(t) + \sum_{k=1}^p [g_k v(t - k\Delta t) - a_k i(t - k\Delta t)] \\ &= g_0 v(t) + h. \end{aligned} \quad (2.9)$$

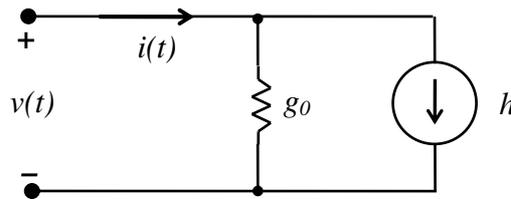


Figura 2.15 – Circuito discreto equivalente tipo Norton.

Para um sistema polifásico, a equação (2.9) é composta por matrizes de corrente e tensão em cada fase. O desacoplamento no domínio modal ocorre via aplicação das componentes de Clarke ou Karrenbauer (Faria & Briceño, 1997). A admitância equivalente é obtida a partir da resposta transitória do sistema no domínio do tempo via excitação por uma fonte de tensão de múltiplas senóides (Nobre, 2004). O método concebido em 1993 foi estendido pouco depois por Singh & Abur (1995) para redes de múltiplas portas, em que a representação das redes externas é realizada com o

acoplamento de circuitos discretos em cascata. Uma das principais contribuições ao modelo foi a inclusão do tempo de trânsito entre as portas.

O trabalho de Hong *et al* (1995) é semelhante ao desenvolvido por Abur & Singh, entretanto utiliza em sua formulação a análise de Prony para extração de atributos da resposta da rede (atenuação, magnitude, fase, frequência). O sistema externo é decomposto em arranjos paralelos de primeira ordem. Emprega-se a transformada z (Pereira *et al*, 2003) e uma análise modal. Wang & Watson (2003) e Watson (2007) também fazem uso da transformada z , no entanto, realizam um processo de ajuste dos parâmetros da função racional via método de mínimos quadrados.

Embora as técnicas no domínio do tempo proporcionem resultados satisfatórios, envolvem uma análise matemática que não é simples (Ibrahim, 2003), recorrendo ao uso de formulações recursivas com elevado número de parâmetros e exigindo geralmente a utilização de técnicas de otimização mesmo na obtenção de modelos equivalentes para sistemas de pequeno porte. Além disso, como a faixa de frequência da TRT envolve um espectro da ordem de unidades a algumas dezenas de kHz, modelos a parâmetros concentrados podem exibir baixa complexidade, tornando viável sua aplicação.

2.2.2 Técnicas no Domínio da Frequência

Grande parte dos esforços dos pesquisadores para consecução de circuitos equivalentes tem se concentrado no uso de técnicas no domínio da frequência.

Clerici & Marzio (1970) tiveram como premissa exprimir com fidelidade o comportamento harmônico das redes equivalentes em estudos de transitórios de chaveamento. Adota-se a topologia de equivalentes do tipo Foster, composta por ramos RL e RC dispostos em paralelo sob forma de unidades em série (Figura 2.16). Seu escopo de aplicação foi conduzido através do uso de analisadores de rede (*Transient Network Analyzers - TNAs*). A complexidade do circuito era definida pela faixa de frequência do fenômeno sob análise, admitindo-se as componentes no domínio modal.

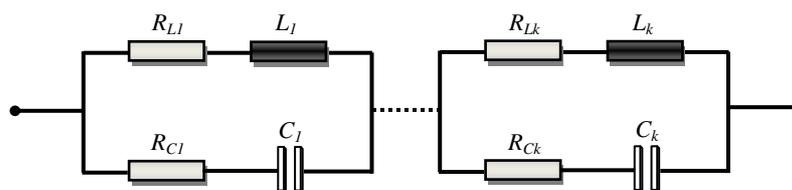


Figura 2.16 – Topologia do equivalente Foster.

O trabalho de Hingorani & Burberry (1970) se destaca historicamente devido a formulação matemática para estimação de parâmetros concentrados de uma topologia formada por uma cascata de ramos em paralelo, compostos por elementos RLC em série (Figura 2.17). Estes elementos procuram reproduzir a característica ressonante da rede. Um ramo adicional (R_0, L_0) foi incluído a fim de caracterizar o perfil predominantemente indutivo do sistema nas proximidades da frequência fundamental. Para cálculo dos parâmetros, admite-se a extração das frequências de ressonância série (f_k) e paralelo (F_k) do espectro e do módulo da impedância nos mínimos locais de sua resposta (Figura 2.18).

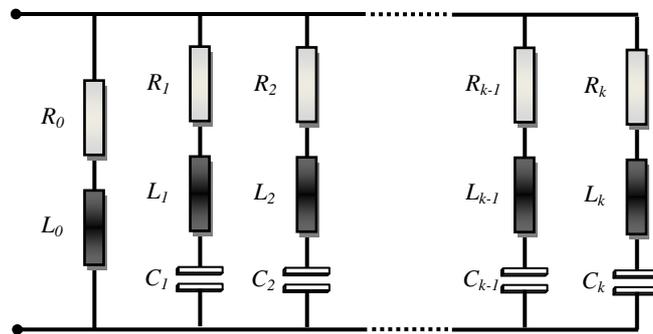


Figura 2.17 – Equivalente RLC paralelo com elementos em série.

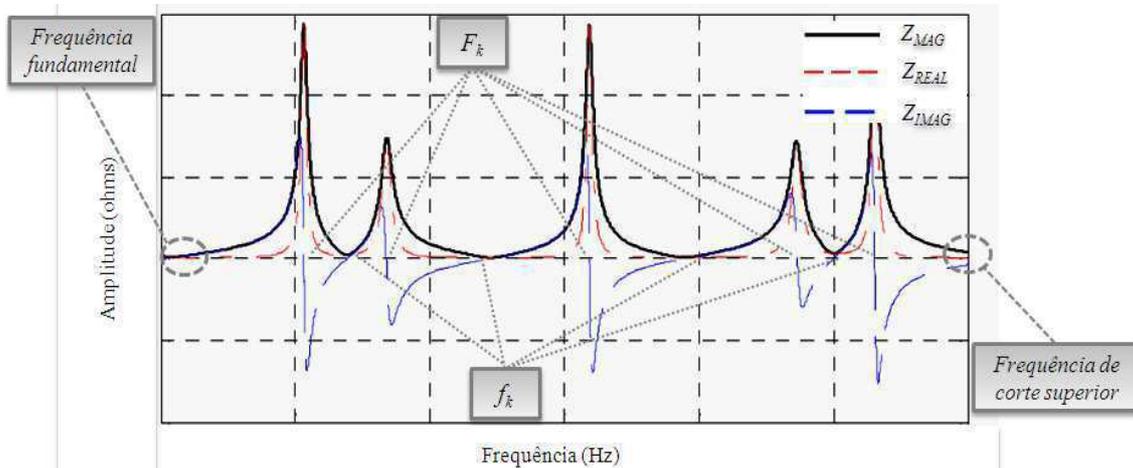


Figura 2.18 – Impedância: Magnitude (Z_{MAG}), componentes real (Z_{REAL}) e imaginária (Z_{IMAG}).

Da metodologia de Hingorani & Burberry (1970), erros têm sido constatados principalmente na estimativa dos elementos indutivos e capacitivos (Oliveira *et al*, 2004) do circuito equivalente. Além disso, a obtenção dos elementos resistivos via mínimos locais da impedância harmônica não se mostra tão precisa.

Morched & Brandwajn (1983) acrescentam um ramo (R_∞, C_∞) ao modelo proposto por Hingorani & Burberry (1970) para reproduzir o comportamento da rede sob altas frequências, no ponto que se classifica como suficiente para delimitar a ordem do equivalente. A metodologia é válida para equivalentes de porta única no domínio modal. A admitância do sistema externo é descrita por matrizes calculadas para cada frequência na faixa de interesse. Admite-se que a parte resistiva de cada ramo é dominante nas vizinhanças da frequência de ressonância. O modelo foi estendido uma década depois a redes de múltiplas portas, mantendo-se a topologia do circuito (Morched *et al*, 1993).

No trabalho de Morched & Brandwajn (1983) discute-se a importância do comprimento da rede externa que deve ser representado para aquisição da base de dados, no entanto não se apresenta uma metodologia para sua determinação.

Nos modelos RLC completos, os elementos resistivos dos ramos ressonantes são obtidos de forma aproximada a partir do módulo da impedância harmônica nos mínimos locais de cada frequência do ramo correspondente (Hingorani & Burberry, 1970) ou através de regressão polinomial (Hosseiniam *et al*, 2006). Para o cálculo dos elementos que formam a parcela reativa, recorre-se normalmente à solução de uma equação matricial do tipo $AX = B$ (Hingorani & Burberry, 1970; Ibrahim & Salama, 1996), formada basicamente por todas as $k-1$ combinações de ω_k^2 e W_{k-1}^2 ¹, tendo como vetor de incógnitas (X) os elementos indutivos (L_k) do circuito. A depender da complexidade da equação, utilizam-se rotinas para decomposição LU e retrosubstituição (Ibrahim & Salama, 1996). Uma vez obtido o vetor solução com os elementos indutivos L_k , as capacitâncias de cada um dos “ n ” ramos ressonantes são calculadas pela seguinte relação:

$$C_k = \frac{1}{2\pi L_k f_k} \quad (2.10)$$

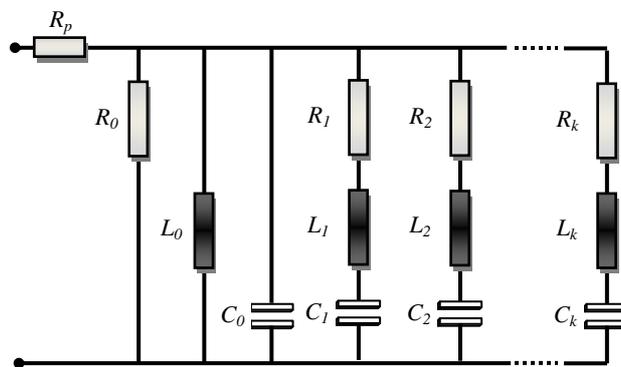
Em que $k = 1, 2, \dots, n$ e f_k é a frequência de ressonância relativa ao k -ésimo ramo.

Nas estimativas dos elementos L e C, geralmente são envidados ajustes utilizando-se um fator λ , a fim de reproduzir com precisão o comportamento da impedância nas proximidades dos pontos de ressonância série. Para isto, os parâmetros L e C são modificados ($L' = L/\lambda$; $C' = \lambda.C$), porém as frequências de ressonância

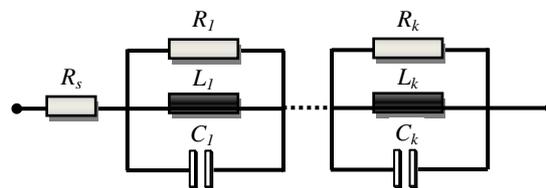
¹ Frequências de ressonância: $\omega_k = 2\pi f_k$ e $W_{k-1} = 2\pi F_{k-1}$.

mantêm-se inalteradas. No cálculo de λ podem ser utilizadas formas diretas (Hingorani & Burberry, 1970) ou métodos de otimização (Oliveira *et al*, 2004; Hosseiniam *et al*, 2006).

A técnica de ajuste utilizada nos trabalhos de Do & Gavrilovic (1984; 1986) se baseia em um método iterativo para remoção de pólos da função de admitância da rede equivalente. As matrizes associadas também são calculadas para cada frequência específica no domínio modal tal como no trabalho de Morched & Brandwajn (1983). A representação é realizada por topologias a parâmetros concentrados compostas por módulos em série (Figura 2.19a) ou paralelo (Figura 2.19b).



(a) Equivalente sintetizado a partir da função de admitância.



(b) Equivalente sintetizado a partir da função de impedância.

Figura 2.19 – Configurações de circuitos equivalentes RLC.

Métodos para obtenção dos elementos RLC admitindo-se processos iterativos para remoção de pólos da função (Do & Gavrilovic, 1986) são associados também com técnicas de ajustes de mínimos quadrados (Noda, 2005; Porkar *et al*, 2005). A principal desvantagem neste caso reside nas avaliações analíticas que requerem a solução de inúmeras integrais.

Recentemente, técnicas de ajuste vetorial (*Vector Fitting*) têm sido aplicadas (Porkar *et al*, 2006; Lin *et al*, 2009; Matar & Irvani, 2010) para a obtenção dos EDFs. Os estudos de Lin *et al* (2009) têm se voltado também para análises de transitórios

eletromecânicos, com modelos desenvolvidos para simuladores em tempo real. Uma sinopse temporal dos principais métodos é apresentada na Figura 2.20.

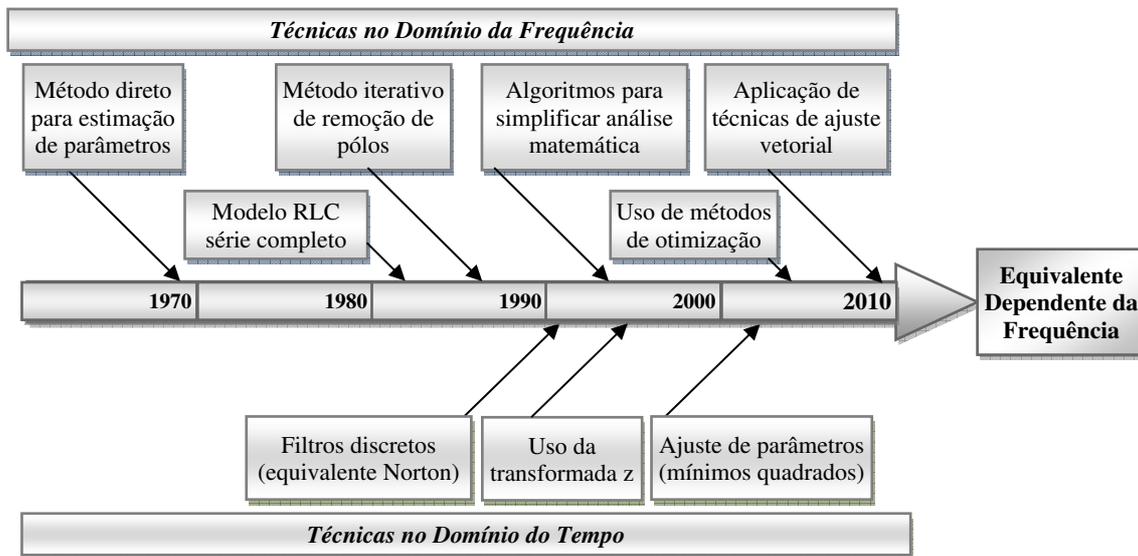


Figura 2.20 – Sinopse temporal: Síntese de equivalentes dependentes da frequência.

Dificuldades têm sido encontradas no processo de estimação paramétrica de modelos dependentes da frequência. Os métodos de otimização têm se mostrado mais flexíveis para eleger a topologia do circuito equivalente, no entanto os requisitos de tempo de processamento reunidos com as dificuldades na implementação de técnicas robustas para ajuste de um grande número de parâmetros não se mostram atrativos. Devido à filosofia simplificada apresentada pelos métodos diretos, seu uso torna-se propenso na especificação de técnicas que permitam o cálculo dos parâmetros dos modelos de forma simples e confiável. Este será o foco do próximo capítulo. Previamente, destacam-se na próxima seção os principais fundamentos em torno dos estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória, justificando-se as etapas de planejamento adotadas no diagnóstico dos equipamentos.

2.3 Representação de Componentes da Rede

A faixa de frequência de interesse em estudos de TRT pode abranger desde a frequência fundamental até algumas dezenas de kHz, o que requer o uso de modelos apropriados dos componentes da rede elétrica, tais como linhas de transmissão, cabos, transformadores, cargas, bancos de capacitores, disjuntores e chaves.

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 (Durbak *et al*, 2009). Este modelo também pode ser estendido aos estudos em que a rede de sequência positiva se mostra predominante tal como a avaliação de faltas trifásicas não aterradas. 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 exhibe espectro da ordem de centenas de kHz e os circuitos de transmissão tem comprimento elevado, representar o perfil dependente da frequência dos seus parâmetros torna-se essencial (Martinez *et al*, 2005).

Para cabos de comprimento curto (< 100m), tal como é o caso de grande parte das subestações de redes de distribuição, o modelo PI a parâmetros concentrados (Figura 2.21) se mostra suficiente (Durbak *et al*, 2009). Para condições transitórias de espectro inferior a 10 kHz, a representação via modelo RL acarreta boa precisão.

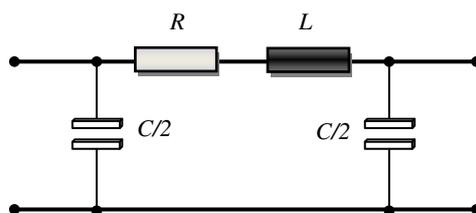


Figura 2.21 – Representação dos cabos: modelo PI a parâmetros concentrados.

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 após o seccionamento de trechos do sistema elétrico (Jones, 1988). Além disso, a adoção do modelo RL (Figura 2.22a) série provoca maior severidade aos níveis de TRT do que o modelo paralelo (Figura 2.22b). Na Figura 2.23 se exhibe ilustrativamente o comportamento harmônico da impedância para cada um destes modelos.

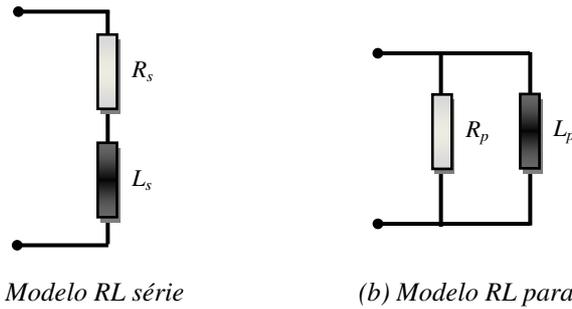


Figura 2.22 – Representação das cargas em estudos de transitórios eletromagnéticos.

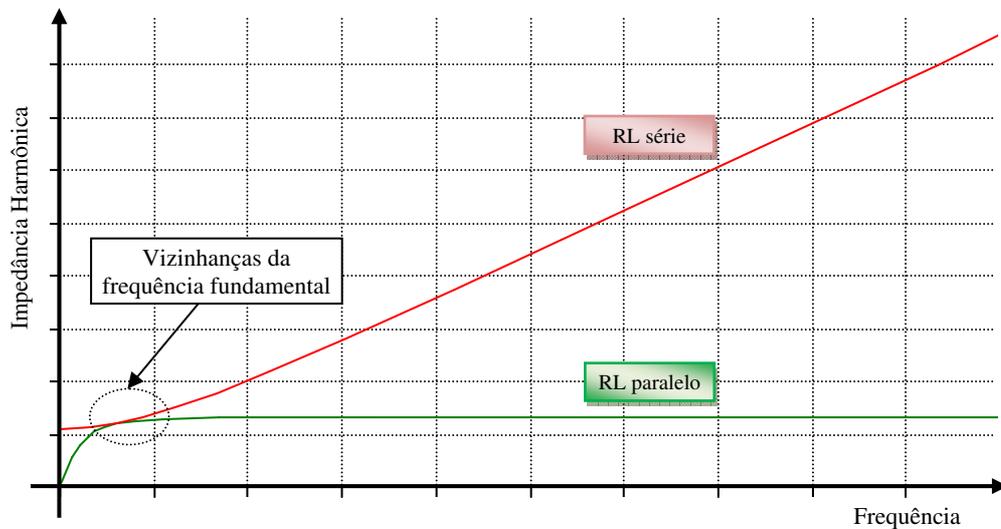


Figura 2.23 – Perfil harmônico das cargas como função do modelo adotado.

Os resultados traduzem o fato de que, na presença de componentes de frequência elevada no sinal da rede, o elemento série se comporta como um circuito aberto devido ao crescimento da reatância indutiva. Inibe-se, deste modo, parte das atenuações provocadas pela componente resistiva da carga. Em relação ao modelo RL paralelo, a componente resistiva da carga se torna dominante em altas frequências.

Algumas metodologias têm sugerido desprezar a representação da carga na subestação sob a qual o transitório está sendo analisado (Costa *et al*, 2009). Em contrapartida, caso estas sejam incluídas, é conveniente representar parte dos ramais de distribuição dos alimentadores (de 1 a 5 km) uma vez que os estudos de curto-circuitos aterrados têm resultados utilizados no dimensionamento dos equipamentos. As diferenças nas avaliações dos modelos se ressaltam sobretudo nas análises de faltas quilométricas, no qual a faixa de frequência da tensão no lado da carga exibe um espectro bem superior ao correspondente no lado da fonte.

Os bancos de capacitores existentes em cada subestação possuem intrinsecamente além de sua própria capacitância (C), indutâncias (L) e resistências (R_p , R_s) (Whitaker, 1999), tal como apresentado na Figura 2.24.

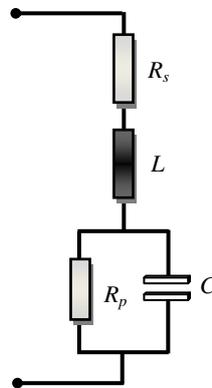


Figura 2.24 – Circuito equivalente de um capacitor.

Sendo:

R_s : resistência série dos fios, terminações e eletrodos;

R_p : resistência resultante da resistividade do meio dielétrico, bem como de suas perdas;

L : indutância intrínseca do capacitor devido aos fios e eletrodos.

A capacitância C é determinada diretamente a partir da potência reativa (Q) do banco e do correspondente nível de tensão entre fases (V) na barra em que o mesmo se encontra conectado. A indutância L 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, $5 \mu\text{H}$ e $100 \mu\text{H}$ (ANSI C37.0731-1973; Zanetta, 2003). Os elementos R_p e R_s podem ser acoplados em uma única resistência R_{ESR} (*Equivalent Series Resistance*), permitindo que as perdas resultantes no banco de capacitores sejam expressas como perdas em um único resistor no circuito equivalente (Whitaker, 1999). O valor das perdas totais nos bancos de capacitores são da ordem de $0,44 \text{ W/kvar}$ (D’Ajuz et al, 1987). Na representação mais conservativa, apenas a capacitância C é incluída nas análises, no entanto, sob condições no qual a margem de segurança relativa ao pico e taxa de crescimento da TRT se encontram reduzidas (abaixo de 10%), a modelagem completa é fundamental para avaliar com maior precisão cenários de operação de curto prazo.

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}). A topologia é apresentada na Figura 2.25.

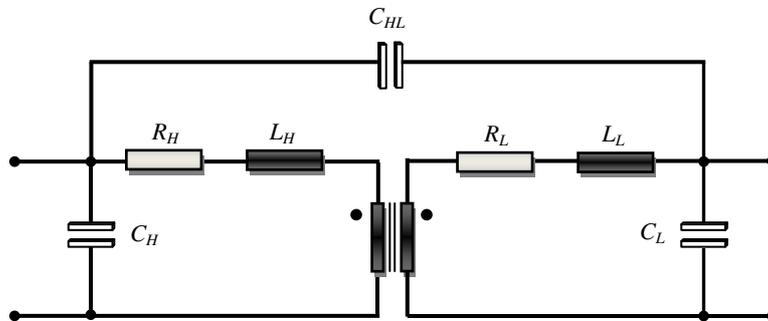


Figura 2.25 – Representação dos transformadores de potência (Martinez *et al*, 2005).

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 (Durbak *et al*, 2009). O cálculo dos parâmetros que descrevem a impedância série é normalmente efetivado a partir de testes de ensaio típicos ou diretamente dos dados de placa do fabricante do equipamento. Para síntese dos dados de capacitância do transformador, deve-se considerar informações relativas ao Nível Básico de Isolamento (NBI) e tensão dos enrolamentos, além de sua potência nominal (Greenwood, 1991). Para uma análise mais precisa do fenômeno, as capacitâncias parasitas dos transformadores para instrumentos (TCs, TPs) devem ser 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.

As normas técnicas de referência sugerem que estes equipamentos 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 de ambos os lados do disjuntor podem ser consideradas.

A Tabela 2.5 apresenta um resumo das diretrizes mais importantes referentes aos modelos tratados, levando em consideração a faixa de frequência deste transitório.

Tabela 2.5 – Modelos de componentes para estudos de TRT.

Componente	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 que se propagam no circuito de transmissão de menor comprimento. O Modelo PI a parâmetros concentrados pode ser usado em linhas de comprimento 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.
Cargas	Modelo RL 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 à 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, é 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.

2.4 Sinopse

Com relação aos estudos conduzidos em torno da representação de redes equivalentes, nota-se que a maioria dos trabalhos se direcionam ao uso de ferramentas de otimização para aperfeiçoar as estimativas iniciais decorrentes da parametrização de circuitos dependente da frequência. Nota-se que o processo de estimação que vem sendo utilizado ao longo das últimas décadas tem se mostrado pouco eficaz quanto a sua precisão (Oliveira *et al*, 2004). Adicionalmente, inexistente uma metodologia para identificar o comprimento da rede externa que deve ser modelada a fim de extrair

satisfatoriamente a base de dados que descreve o perfil da impedância no domínio da frequência.

No que concerne aos subsídios para implantar um dispositivo à base de varistores de ZnO para limitar o pico da TRT em equipamentos de média de tensão, os estudos existentes contemplam apenas a análise de desempenho frente a transitórios de alta frequência (> 25 kHz) para faltas trifásicas não aterradas (Nobre, 1999; Nobre *et al*, 2001). Entretanto, para validar seu dimensionamento, ratifica-se a necessidade de inspeção das solicitações inerentes aos transitórios de baixa frequência (< 5 kHz). Prever os efeitos provocados pela presença do elemento não-linear sobre a eficácia de células de surto capacitivas utilizadas para minimizar a TCTRTR é fundamental. Além disso, a precisão dos equivalentes é relevante na reprodução confiável da TRT quando uma rede elétrica de grande complexidade é reduzida, podendo ter consequência no dimensionamento de dispositivos mitigadores.

EQUIVALENTES DEPENDENTES DA FREQUÊNCIA

A representação do comportamento harmônico das redes externas requer o uso de circuitos que, apropriadamente, reproduzam as condições da impedância no espectro de frequência do fenômeno transitório avaliado. Neste capítulo é proposta uma metodologia para aquisição confiável do espectro dos sistemas que serão substituídos por equivalentes. Sintetiza-se o tratamento matemático para estimação paramétrica de um modelo RLC. Descreve-se no fim do capítulo o fluxograma do procedimento contemplando algoritmos, rotina e metodologia utilizada.

3.1 Aquisição do Espectro das Redes Externas

A delimitação sem critério das redes internas associada ao uso de equivalentes de redes calculados à frequência fundamental amplia o escopo das incertezas quando da realização de estudos sobre tensão de restabelecimento transitória. Alguns procedimentos propostos para análise do fenômeno em redes de transmissão de alta tensão baseiam-se na representação de um número mínimo de barras de fronteira (CCON, 1991; Morched & Brandwajn, 1983; ONS, 2009). De fato, para circuitos de transmissão de comprimento da ordem de centenas de quilômetros, os resultados acarretam boa precisão (Morched & Brandwajn, 1983). Observa-se, no entanto, que este método não pode ser estendido para estudos realizados em grande parte dos sistemas de distribuição, por conterem linhas de curto comprimento, de apenas algumas unidades ou dezenas de km. O uso de circuitos dependentes da frequência, neste caso, se mostra essencial.

Para cálculo dos equivalentes dependentes da frequência é necessário que o espectro das redes externas, que caracteriza a base de dados, seja obtido de forma confiável. Análises no domínio da frequência podem proporcionar indicativos sobre a extensão mínima do sistema para o qual parte da rede externa possa ser substituída por equivalentes à frequência fundamental. A localização da barra de fronteira que

caracteriza o limite dos sistemas externos deve garantir que os componentes adjacentes ao ponto escolhido possam ser representados com boa precisão por equivalentes à 60Hz.

A metodologia proposta para determinar o número de barras de fronteira necessárias à modelagem ou, de outro modo, a distância entre as redes externa e interna, consiste em avaliar o comportamento dos elementos da matriz de impedância harmônica no domínio de fase $[Z_{fase}(j\omega)]$ ou modal $[Z_{mod}(j\omega)]$ a partir da subestação ou sub-área para o qual o evento transitório justifica maior interesse.

O cálculo de cada elemento Z_{ij} da matriz de impedâncias do sistema pode ser realizado via medição da tensão V_i quando da excitação de corrente I_j . Para isto, deve-se admitir que todos os “ $n-1$ ” terminais restantes do sistema para os quais $n \neq j$ se encontram em aberto (correntes injetadas iguais a zero). Analiticamente:

$$Z_{ij} = \frac{V_i}{I_j} \Bigg|_{I_1, I_2, \dots, I_n=0} \quad (3.1)$$

Admitindo-se a representação em componentes de fase, a injeção de uma fonte de corrente $I_j(j\omega)$ caracterizada por amplitude unitária com espectro variável na frequência, decorre na obtenção de cada elemento $Z_{ij}(j\omega)$ como sendo, numericamente, equivalente à tensão obtida na fase “ i ” do sistema. Deve-se observar que sua resposta deve incluir os acoplamentos e assimetrias do sistema (caso existam). Para um sistema trifásico com fases a, b e c:

$$\begin{bmatrix} V_a(j\omega) \\ V_b(j\omega) \\ V_c(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa}(j\omega) & Z_{ab}(j\omega) & Z_{ac}(j\omega) \\ Z_{ba}(j\omega) & Z_{bb}(j\omega) & Z_{bc}(j\omega) \\ Z_{ca}(j\omega) & Z_{cb}(j\omega) & Z_{cc}(j\omega) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a(j\omega) \\ I_b(j\omega) \\ I_c(j\omega) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

O espectro que caracteriza a impedância do sistema é obtido admitindo-se três simulações distintas. Considerando a injeção de uma fonte de corrente unitária (com espectro variável) na fase A, as tensões verificadas nas fases A, B e C referem-se à resposta de cada elemento da primeira coluna da matriz de impedâncias do sistema. Adotando procedimento análogo para as fases B e C, obtém-se a resposta em frequência para os elementos das demais colunas da matriz.

Em relação às análises no domínio da frequência, deve-se obedecer às seguintes regras, de notável necessidade para a confiabilidade dos estudos:

- A representação de cada componente deve satisfazer a faixa de frequência do transitório envolvido, uma vez que a TRT pode abranger um espectro desde a fundamental até algumas dezenas de kHz;
- Na análise de varredura em frequência (*Frequency Scan*), as fontes de tensão devem ser substituídas por pontos aterrados. A fonte de corrente a ser injetada (componentes de fase ou modal) no barramento de fronteira da rede interna deve ter espectro correspondente à faixa de frequência do fenômeno avaliado.

Uma vez respeitadas as diretrizes e premissas apresentadas, realiza-se o seguinte processo (Figura 3.1):

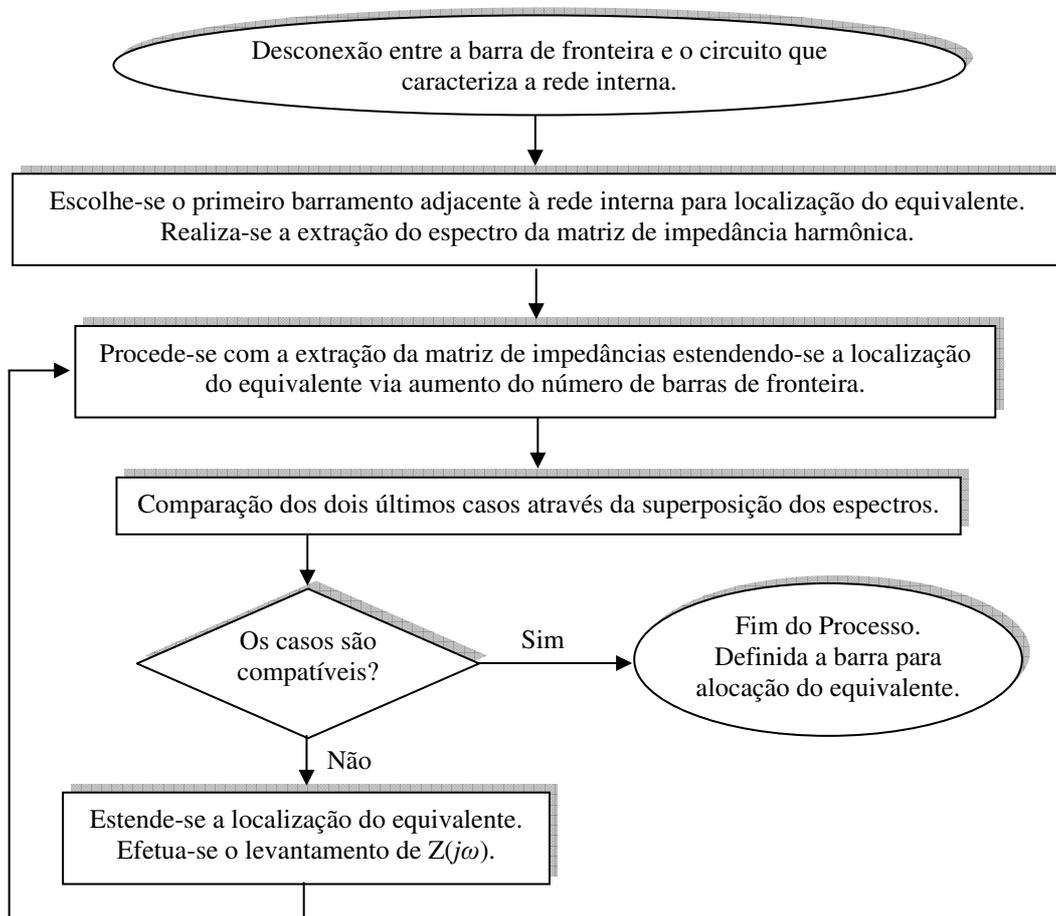


Figura 3.1. Procedimento para localização dos equivalentes à frequência fundamental.

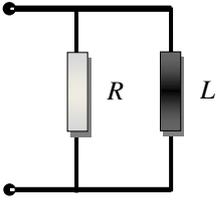
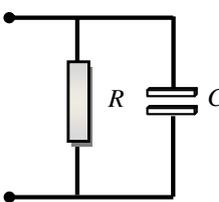
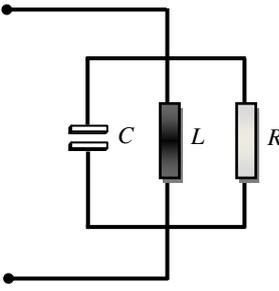
Sinteticamente, atinge-se um ponto no sistema para o qual os equipamentos à montante possam ser suficientemente representados por equivalentes simplificados.

3.2 Topologias a Parâmetros Concentrados

Combinações a parâmetros concentrados são empregadas com o intuito de reproduzir o comportamento harmônico da impedância dos sistemas externos. A adequabilidade dos modelos a um conjunto de pontos depende dos parâmetros que definem seu perfil harmônico no espectro de interesse.

Circuitos do tipo RL e RC denotam filtros passivos que, sob a meta de aplicação adotada, visam reproduzir o comportamento da impedância em baixas e altas frequências, respectivamente. Por sua vez, as associações RLC exibem distintos perfis atenuantes e de oscilação que dependem do arranjo entre os elementos. Sob o contexto das análises a serem conduzidas no domínio da frequência, tem-se como objetivo a reprodução do perfil ressonante da impedância das redes elétricas. Uma síntese das equações que caracterizam as funções de transferência associadas a alguns dos circuitos lineares é apresentada na Tabela 3.1. As descrições apresentadas são importantes para composição dos circuitos completos que serão adotados.

Tabela 3.1 – Função de transferência das topologias de arranjo paralelo.

Topologia	Função de Transferência
	$Z(j\omega) = \frac{R(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2} + j \frac{R^2(\omega L)}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3.3)$
	$Z(j\omega) = \frac{R}{1 + (\omega RC)^2} - j \frac{R^2(\omega C)}{1 + (\omega RC)^2} \quad (3.4)$
	$Y(j\omega) = \frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \quad (3.5)$

3.3 Propriedades das Componentes Harmônicas

Na Figura 3.2 é apresentada a característica da magnitude da impedância (Z_{MAG}) como função da frequência. As componentes real (Z_{REAL}) e imaginária (Z_{IMAG}) são incluídas, destacando-se atributos dos sinais que serão utilizados na formulação matemática para cálculo dos parâmetros que qualificam os circuitos a parâmetros concentrados. Os elementos descritores são:

f_f - frequência fundamental;

f_k - k -ésima frequência de ressonância série;

f_c - frequência de corte superior;

F_k - k -ésima frequência de ressonância em paralelo;

F_k^{Z-up} - k -ésima frequência de transição superior (*upper*);

F_k^{Z-low} - k -ésima frequência de transição inferior (*lower*).

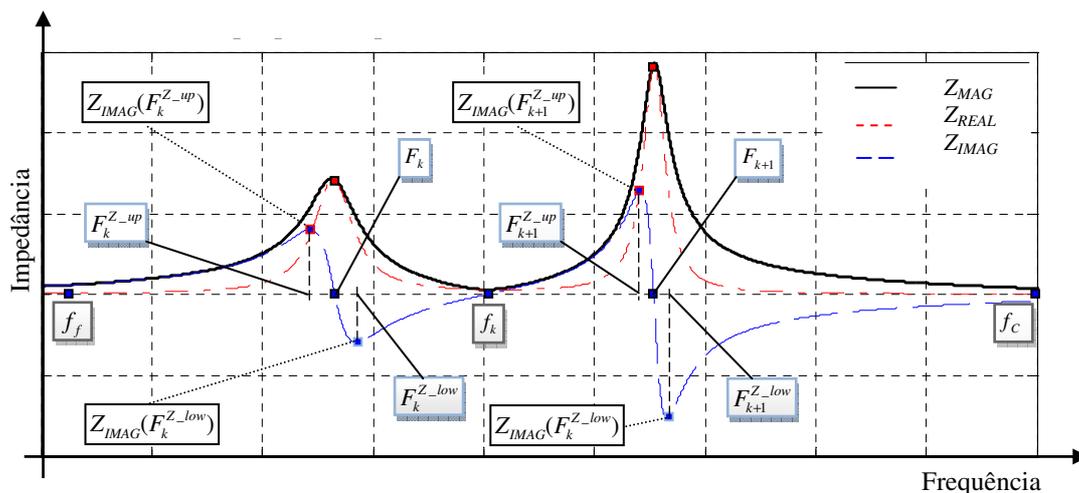


Figura 3.2. Especificação de atributos da impedância harmônica.

Mediante análise do perfil das componentes real e imaginária, destacam-se as seguintes propriedades:

Propriedade 1: Nos pontos f_k e F_k a impedância Z_{MAG} exibe uma característica de predominância resistiva.

Propriedade 2: Nas vizinhanças das frequências de ressonância em paralelo (F_k), o decaimento de Z_{IMAG} ocorre de forma rápida, com derivada dZ_{IMAG}/df elevada e praticamente constante.

Propriedade 3: Nos pontos de transição superior (F_k^{Z-up}), o módulo das componentes imaginária e real se equivalem.

Propriedade 4: Em contrapartida ao perfil de decaimento acelerado nas proximidades de F_k , o comportamento de Z_{IMAG} nas vizinhanças dos pontos de ressonância série (f_k) é suave, com uma faixa de variação de frequência [$F_k^{Z-low}; F_{k+1}^{Z-up}$] superior às condições de contorno no ponto de ressonância em paralelo [$F_k^{Z-up}; F_k^{Z-low}$].

Após a identificação dos principais atributos da impedância harmônica e suas propriedades, o problema é formulado para síntese das redes equivalentes.

3.4 Formulação Matemática para Estimação Paramétrica

A topologia RLC série completa apresenta elementos RLC em paralelo dispostos sob forma de ramos em série (Figura 3.3). Para as análises sob proposição, dois ramos representam a resposta da rede em baixas (R_{0p}, L_{0p}) e altas frequências ($R_{\infty p}, C_{\infty p}$). Além deste parâmetros, coexistem “n” ramos ressonantes RLC que dependem do perfil da impedância harmônica entre a frequência fundamental (f_f) e a frequência de corte superior (f_c).

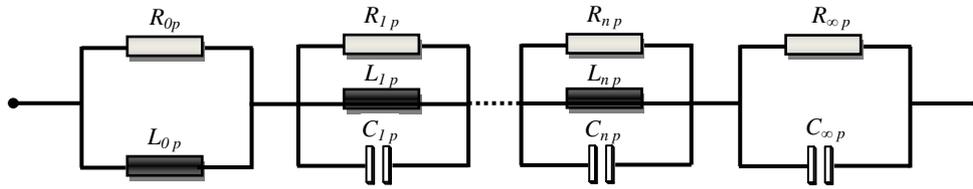


Figura 3.3. Topologia RLC série completa.

Na frequência fundamental, a componente real da impedância é dada por $Z_{REAL}(f_f)$ enquanto que a parte imaginária corresponde a $Z_{IMAG}(f_f)$. A reatância indutiva associada aos ramos ressonantes apresenta valor reduzido em baixas frequências, comportando-se praticamente como um curto-circuito. Neste cenário o ramo RL é dominante em relação ao ramo RC. Portanto, igualando-se $Z_{REAL}(f_f)$ e $Z_{IMAG}(f_f)$ (extraídas graficamente da impedância harmônica) às componentes obtidas da função de transferência do circuito, são válidas as seguintes equivalências:

$$\frac{R_{0p}(2\pi f_f L_{0p})^2}{R_{0p}^2 + (2\pi f_f L_{0p})^2} = Z_{REAL}(f_f) \quad (3.6)$$

$$\frac{R_{0p}^2 (2\pi f_f L_{0p})}{R_{0p}^2 + (2\pi f_f L_{0p})^2} = Z_{IMAG}(f_f) \quad (3.7)$$

A resolução de (3.6) e (3.7) fornece:

$$R_{0p} = \frac{[Z_{IMAG}(f_f)]^2}{Z_{REAL}(f_f)} \cdot \alpha_Z \quad (3.8)$$

$$L_{0p} = \frac{Z_{IMAG}(f_f)}{2\pi f_f} \cdot \alpha_Z \quad (3.9)$$

Em que $\alpha_Z = 1 + [Z_{REAL}(f_f)/Z_{IMAG}(f_f)]^2$.

Para redes elétricas com elevado fator X/R à frequência fundamental, o fator α_Z tende ao valor unitário na barra em que será alocado o equivalente de rede e, neste caso, as equações (3.8) e (3.9) podem ser reescritas como:

$$R_{0p} \Big|_{X/R \rightarrow \infty} = \frac{[Z_{IMAG}(f_f)]^2}{Z_{REAL}(f_f)} \quad (3.10)$$

$$L_{0p} \Big|_{X/R \rightarrow \infty} = \frac{Z_{IMAG}(f_f)}{2\pi f_f} \quad (3.11)$$

Procedendo analiticamente de modo semelhante para o ramo RC, que reproduz a resposta dominante do circuito na frequência de corte superior f_C , são obtidas as seguintes relações:

$$R_{\infty p} = Z_{REAL}(f_C) \cdot \beta_Z \quad (3.12)$$

$$C_{\infty p} = \left[\frac{1}{2\pi f_C} \cdot \frac{Z_{IMAG}(f_C)}{Z_{REAL}(f_C)} \right] \cdot \frac{1}{\beta_Z} \quad (3.13)$$

Em que $\beta_Z = 1 + [Z_{IMAG}(f_C)/Z_{REAL}(f_C)]^2$.

No que concerne aos elementos do k -ésimo ramo ressonante, a função que descreve um conjunto RLC é dada por:

$$Y_{kp}(f) = \frac{1}{R_{kp}} + \frac{1}{j2\pi f L_{kp}} + j2\pi f C_{kp} \quad (3.14)$$

Nos pontos em que a impedância Z_{MAG} tende a infinito verifica-se que sua componente imaginária apresenta valor nulo. Neste cenário, considerando o desacoplamento dos diversos ramos ressonantes, a admitância do circuito é expressa por $1/R_{kp}$. Logo, os valores de resistência correspondem ao pico da impedância nos pontos de ressonância em paralelo (propriedade 1 – seção 3.3):

$$R_{kp} = Z_{REAL}(F_k) \quad (3.15)$$

Para os elementos da componente reativa, uma aproximação pode ser adotada admitindo-se atributos da forma de onda nas vizinhanças do ponto de ressonância. Considerando a propriedade 2 (seção 3.3), o parâmetro F_k pode ser calculado como a média geométrica das frequências de transição superior F_k^{Z-up} e inferior F_k^{Z-low} :

$$F_k = \sqrt{F_k^{Z-up} \cdot F_k^{Z-low}} \quad (3.16)$$

Como consequência de (3.16):

$$W_k^2 = (2\pi F_k^{Z-up})(2\pi F_k^{Z-low}) \quad (3.17)$$

Em que W_k é a frequência natural de ressonância do k -ésimo ramo.

Uma vez que $W_k^2 = 1/(L_{kp}C_{kp})$, a expressão (3.12) pode ser reescrita da seguinte forma no ponto F_k^{Z-up} :

$$Y_{kp}(F_k^{Z-up}) = \frac{1}{R_{kp}} + j \left(\frac{1}{F_k^{Z-up}} - \frac{1}{F_k^{Z-low}} \right) \frac{1}{2\pi L_{kp}} \quad (3.18)$$

Em conformidade com a propriedade 3 (seção 3.3), devido à igualdade, em módulo, das partes real e imaginária na componente de frequência especificada, são sintetizadas as equações que decorrem no cálculo dos elementos indutivos e capacitivos:

$$L_{kp} = \frac{R_{kp}}{2\pi} \cdot \frac{F_k^{Z-low} - F_k^{Z-up}}{F_k^{Z-low} \cdot F_k^{Z-up}} \quad (3.19)$$

$$C_{kp} = \frac{1}{(2\pi F_k)^2 \cdot L_{kp}} \quad (3.20)$$

O problema está então equacionado a partir da decomposição da impedância harmônica e a consequente extração de atributos das componentes real e imaginária. Permite-se deste modo o cálculo dos parâmetros que formam a topologia do circuito equivalente RLC série completo. Os ramos de alta e baixa frequência têm seus parâmetros estimados admitindo-se a dominância em suas vizinhanças. Os elementos reativos dos ramos ressonantes se caracterizam como dependentes das componentes atenuantes e das frequências nas vizinhanças dos pontos de ressonância. Além destes, a capacitância depende também da frequência exata no ponto de ressonância. Procedimento semelhante é realizado na próxima subseção para o condicionamento dos parâmetros do circuito paralelo.

3.5 Algoritmos Implementados e Fluxograma do Processo

Para melhor compreensão da metodologia, é apresentado no diagrama de blocos da Figura 3.4 o fluxograma do processo. Faz-se uso da rotina *Frequency Scan* do ATP (*Alternative Transients Program*) (Leuven EMTP Center, 1987) para determinar a resposta em frequência de cada elemento da matriz equivalente, respeitando-se os procedimentos propostos para o levantamento da impedância harmônica do sistema real vista a partir da barra de fronteira que delimita a rede interna.

Efetiva-se a fragmentação da impedância complexa em componentes real e imaginária utilizando a linguagem MODELS do programa ATP. Os vetores de frequência e componentes de impedância são reconstruídos e definidos em formato pré-especificado.

A rotina principal procede com a leitura dos pontos de ressonância, via algoritmo de detecção de passagem por zero, e captura dos atributos que fomentam o cálculo dos parâmetros resistivos, indutivos e capacitivos do circuito equivalente mediante algoritmos de detecção de máximos e mínimos locais.

Os ramos de baixa e alta frequência têm seus parâmetros obtidos, respectivamente, na frequência fundamental (60 Hz) e no ponto de corte superior, sendo este último definido a partir do espectro do fenômeno transitório que será avaliado ou através do perfil da impedância harmônica. Com os circuitos formados, permite-se a comparação entre as respostas do sistema real e do equivalente deduzido. Após

validação no domínio da frequência, estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória podem ser executados no domínio do tempo.

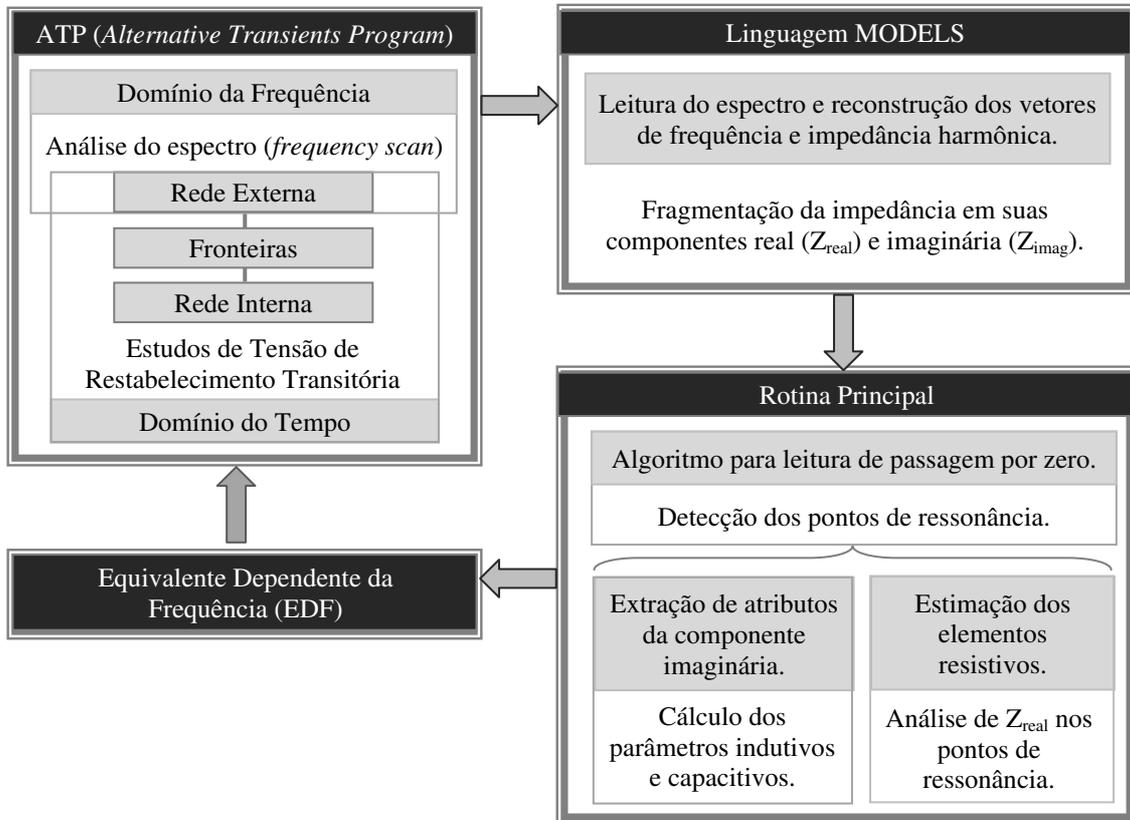


Fig. 3.4 – Fluxograma para síntese e validação dos equivalentes dependente da frequência.

Neste trabalho, a fim de obter as redes equivalentes de modo preciso e confiável, opta-se pela extração de características intrínsecas da forma de onda da impedância de modo a estimar os elementos que compõem um circuito a parâmetros concentrados. Particularidades das componentes real e imaginária se mostram fundamentais na concepção apresentada. Detalhes acerca da aplicação do método e uma proposta para redução da TRT são expostas nos capítulos seguintes.

DISPOSITIVO LIMITADOR DA TRT

4.1 Considerações Preliminares

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*, 1985).

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. Na Figura 4.1 é mostrada a característica V-I para um varistor de Óxido de Zinco (ZnO) de padrão comercial.

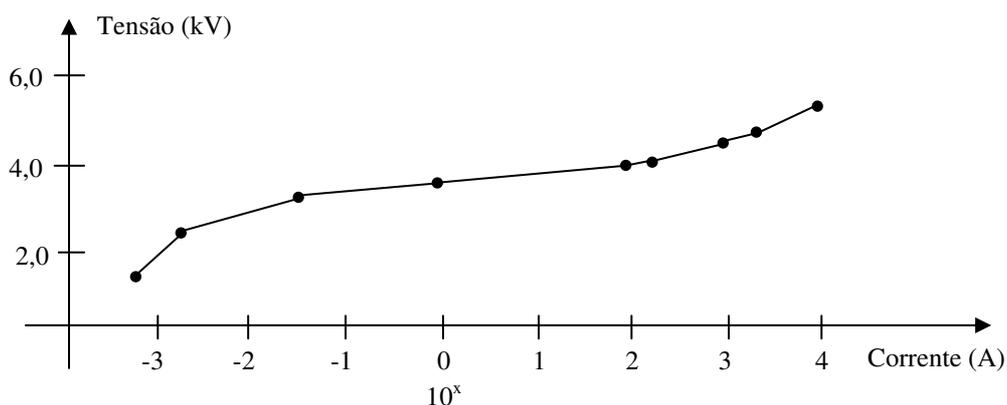


Figura 4.1 – Característica não-linear entre tensão e corrente de um varistor de óxido de zinco.

Sob o foco dos estudos sobre tensão de restabelecimento transitória, a aplicação de um dispositivo formado por varistores em série tem como objetivo limitar os níveis

de sobretensão entre os pólos de disjuntores e religadores que apresentam superação por valor de pico.

Convencionalmente, os pára-raios se dispõem como elementos tipo “shunt” nos sistemas de proteção (Figura 4.2), com ponto de conexão de aterramento.

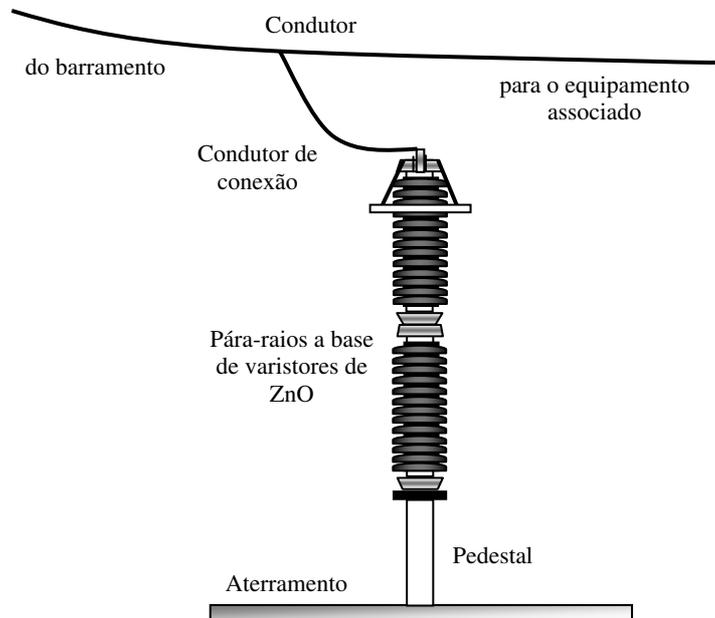


Figura 4.2 – Arranjo típico de um pára-raios na subestação.

Para a análise proposta é previsto o uso de um dispositivo a base de varistores de ZnO localizado em paralelo com os terminais do equipamento seccionador (Figura 4.3). Neste caso, o dimensionamento do número de pastilhas necessárias para reduzir o transitório a patamares seguros requer análises fundamentadas nas características do evento transitório sob estudo.

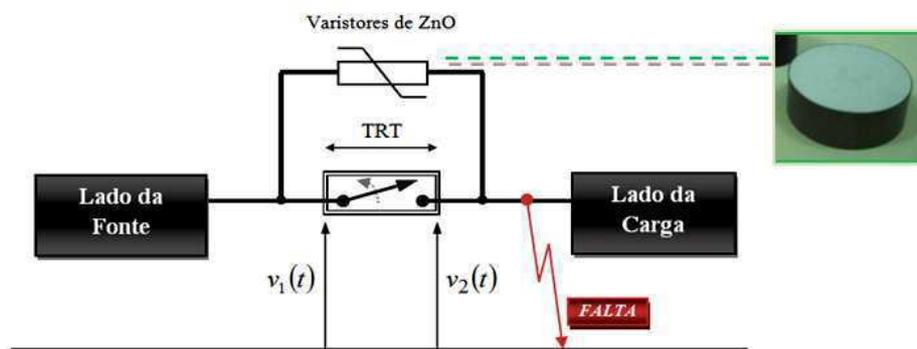


Figura 4.3 – Dispositivo de ZnO para redução do valor de pico da TRT.

Em face das disposições contidas nas normas de fabricação dos equipamentos, deve-se prever, no mínimo, a eficácia de um elemento limitador do pico da TRT em

condições de manobra de eliminação de faltas trifásicas não aterradas e faltas quilométricas. Note que na ocorrência de curto-circuitos aterrados, caso não ocorra absorção total da energia dissipada pelo surto, parte do transitório de tensão no lado da carga pode ser transferido para os ramos de distribuição que alimentam as cargas.

Ressalta-se dentre os requisitos de dimensionamento a análise da energia plausível de ser absorvida por parte do dispositivo mitigador e o perfil da máxima corrente a que o mesmo é submetido. Sob as diretrizes para sua implantação, é necessário considerar também sua atuação em conjunto com células de surto capacitivas utilizadas normalmente para reduzir a taxa de crescimento da TRT. A seguir descrevem-se circuitos típicos utilizados em testes de ensaio.

4.2 Circuitos para Testes de Ensaio

Em circuitos para realização de testes de interrupção de corrente de curto-circuito (Dufournet & Montillet, 2002; Jamnani & Kanitkar, 2006), a forma de onda da TRT pode ser produzida a partir de circuitos com elementos concentrados dispostos em paralelo (Figura 4.4a) ou em série (Figura 4.4b). A principal diferença entre ambos é a taxa de crescimento inicial após a interrupção, visto que o circuito com capacitor em paralelo permite evitar elevados gradientes de tensão nos primeiros microssegundos após a abertura dos contatos.

Na realização de testes em laboratório, a capacitância do arranjo paralelo é disposta próxima ao disjuntor sob teste. Para esta topologia, o banco de resistores dissipa um aporte considerável de energia, entretanto o controle de atenuação do circuito série é mais simples que na topologia em paralelo. Neste caso, uma solução híbrida é o rearranjo do circuito série com um capacitor em paralelo (Figura 4.4c), resultando em uma taxa inicial de crescimento praticamente nula (Smeets *et al*, 2007).

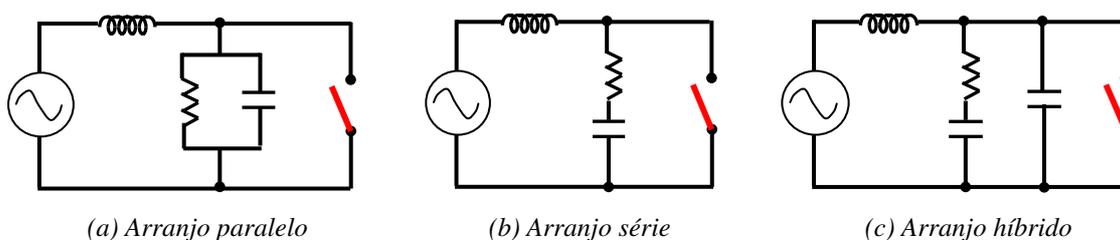


Figura 4.4 – Topologia dos circuitos para realização de testes de ensaio.

Para análise de TRT via simulação digital, o arranjo híbrido da Figura 4.4c pode ser modelado. Os testes a serem realizados devem prover a inclusão do dispositivo de ZnO entre os terminais do disjuntor (Figura 4.5).

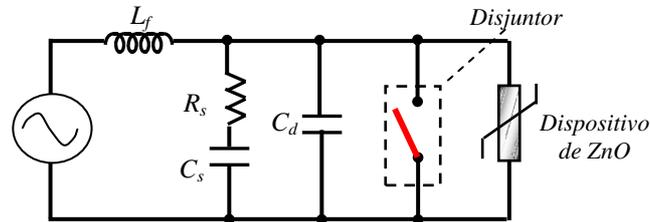


Figura 4.5 – Descrição da topologia híbrida para ensaios digitais.

No circuito da Figura 4.5, o ajuste do elemento indutivo L_f é responsável por alterações na corrente de curto-circuito. Juntamente com o capacitor C_s são responsáveis pela magnitude e frequência de oscilação no período transitório. O elemento em série R_s permite ajustar o nível de atenuação enquanto que C_d está relacionado com a inibição a uma elevada taxa de crescimento inicial da TRT.

4.3 Característica V-I do Dispositivo

Nas simulações digitais que serão conduzidas, serão utilizados varistores de óxido de zinco cilíndricos, com espessura de 23 mm e diâmetro de 62 mm (padrão comercial). As Tabelas 4.1 e 4.2 exibem, respectivamente, dados técnicos de cada elemento não-linear e as informações da curva V-I das seções com três e quatro varistores em série. No espectro de frequência deste transitório de chaveamento, as pastilhas podem ser suficientemente bem representadas sem a dependência de seus parâmetros com a frequência (Martinez & Durbak, 2005).

Tabela 4.1 – Informações técnicas dos elementos não-lineares à base de ZnO (Costa, 1999).

Característica	Dado
Condutividade térmica	23 W/m °C
Calor específico	456 J/kg °C (a 0 °C)
Varição do calor específico com a temperatura	4,4 (J/kg °C)/ °C
Densidade	5258 kg/m ³
Tensão Nominal	3,5 kV
Corrente Nominal de Descarga	10,0 kA

Tabela 4.2 - Relação entre tensão (V) e corrente (I) para a associação série de elementos cilíndricos de varistores de ZnO (Costa, 1999, modificado).

Nº de discos de ZnO (varistores) em série		Três (03)	Quatro (04)
Dados	I (A)	V (kV)	V (kV)
1	0,0008	6,78	9,04
2	0,0030	11,95	15,92
3	0,0700	14,37	19,16
4	1,0000	15,24	20,32
5	100,00	16,80	22,40
6	200,00	17,10	22,80
7	1.000,0	19,20	25,60
8	5.000,0	21,00	28,00
9	10.000,0	22,50	30,00

Embora não tenham sido especificados elementos da estrutura física do dispositivo de ZnO, tais como invólucro, hastes, terminais de conexão ou elementos de manobra para sua manutenção, ratifica-se que os mesmos são essenciais na descrição de um modelo de padrão comercial.

No próximo capítulo são apresentados os resultados e as análises decorrentes da aplicação do dispositivo na redução do valor de pico da TRT. Em seguida, no mesmo capítulo, são feitas comparações admitindo-se a sua composição com números distintos de pastilhas de ZnO.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a metodologia proposta para obtenção de Equivalentes Dependentes da Frequência (EDF) e sua aplicação em estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória. Preliminarmente descreve-se a rede teste e os propósitos dos estudos. São realizadas aferições nos domínios da frequência e do tempo a fim de verificar a eficácia do circuito equivalente deduzido. Além disso, é avaliada a efetividade de um dispositivo composto a base de varistores de óxido de zinco (ZnO) na redução do valor de pico da TRT. Subsídios são evidenciados no que concerne aos requisitos necessários ao dimensionamento do equipamento e os critérios que devem ser seguidos para realização de testes e futura implementação do dispositivo em disjuntores e religadores de média tensão.

5.1 Rede Teste

A Figura 5.1 exibe o diagrama do Regional Mussurú II da ENERGISA-PB contemplando as principais subestações da sua rede de subtransmissão e alta tensão que compõem a área leste do sistema nordeste. 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 Mataraca (MAA).

Para as análises sob proposição, destacam-se como principais objetivos:

- Verificar a eficácia nos domínios da frequência e do tempo de um circuito equivalente dependente da frequência obtido com a metodologia proposta;
- Avaliar 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).

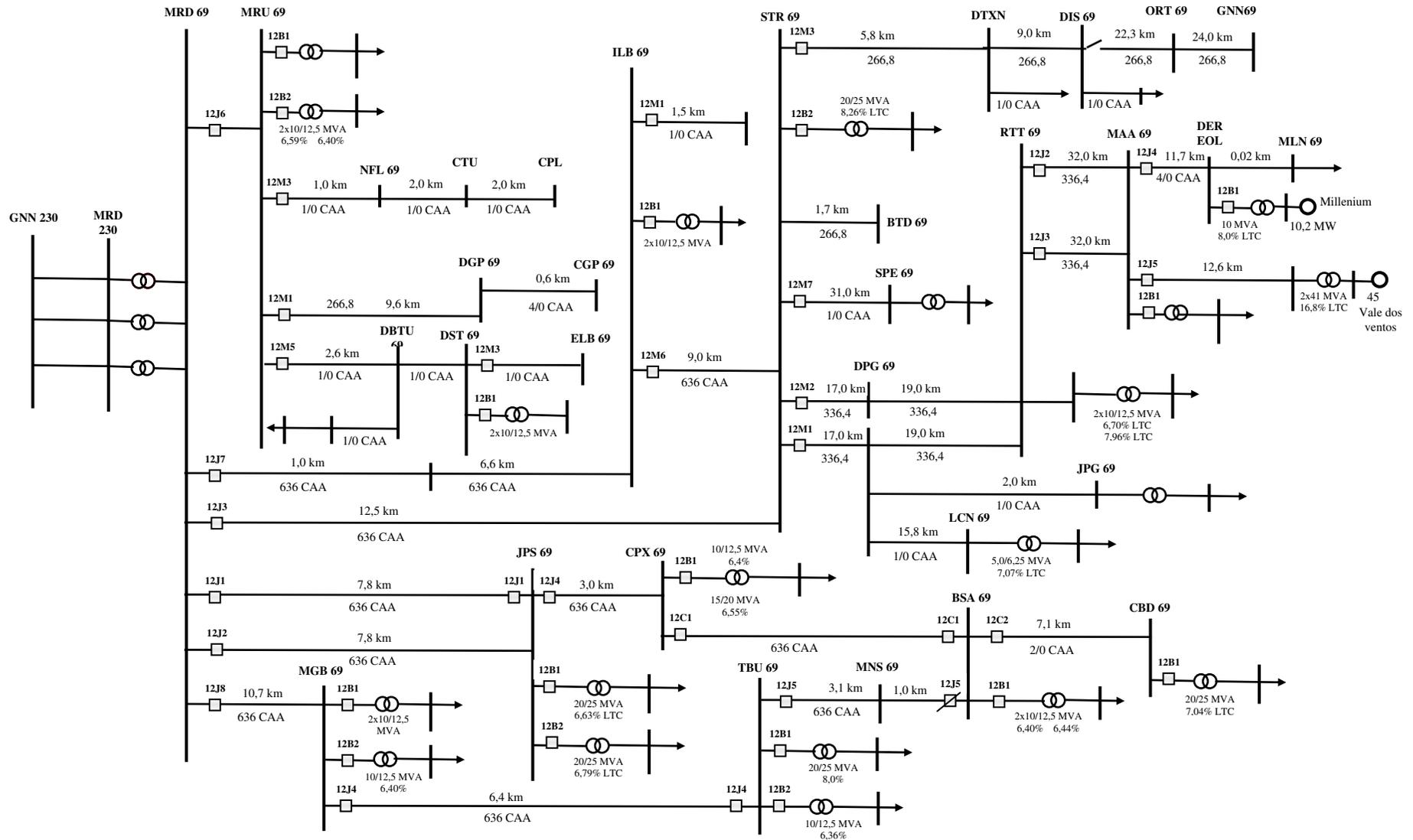


Fig. 5.1 – Regional Mussuré II: Diagrama da rede de subtransmissão e alta tensão.

5.2 Análises no Domínio da Frequência

Os estudos no domínio da frequência contemplam o levantamento da impedância harmônica das redes externas para composição da base de dados e estimação paramétrica do equivalente dependente da frequência. Além disso, realiza-se a aferição das respostas da rede real e do equivalente deduzido considerando também a possibilidade de reduzir a ordem do circuito equivalente.

Admitindo-se a metodologia proposta para aquisição do espectro das redes externas, a linha de transmissão que conecta as subestações João Pessoa (JPS) e Cruz do Peixe (CPX) é desligada (abertura do disjuntor 12J4). O barramento principal de 69 kV da SE JPS indica o ponto de injeção da fonte de corrente de amplitude unitária cuja frequência é variada através da rotina *Frequency Scan* do ATP. Realiza-se uma varredura na faixa de 1 a 6 kHz com passo de frequência (Δf) de 1 Hz. Foram avaliadas quatro condições para localização do equivalente simplificado a 60 Hz:

- Caso 1: No Barramento Principal (BP) de 69 kV da SE João Pessoa (JPS 69);
- Caso 2: No BP de 69 kV da SE Mussuré (MRD 69);
- Caso 3: No BP de 230 kV da SE Mussuré (MRD 230);
- Caso 4: No BP de 230 kV da SE Goianinha (GNN 230).

Nas simulações realizadas a fontes de tensão do equivalente é retirada e o ponto de conexão desta aterrado. Na Figura 5.2 é apresentado o perfil harmônico de um elemento próprio da fase A da matriz de impedâncias. Superpõe-se o comportamento da amplitude harmônica de cada um dos quatro casos descritos. As cargas em 69 kV foram modeladas em delta, sendo também observadas as características das eólicas Vale dos Ventos e Millenium, que se comportam como fontes de corrente, necessitando serem definidas como um circuito aberto na análise de resposta em frequência.

A partir dos espectros extraídos, observa-se a compatibilidade das formas de onda para os casos 2, 3 e 4, ou seja, quando o equivalente é alocado na barra de 69 kV da subestação Mussuré ou a sua montante. Tal fato é constatado pela superposição das curvas em vermelho (MRD69), azul (MRD230) e preto (GNN230).

No caso em que o equivalente é alocado na SE João Pessoa, o módulo da impedância harmônica exibe um perfil linear crescente (resistência associada a indutância), o que pode incidir na redução do amortecimento inerente à rede externa,

acarretando condições transitórias mais severas. Logo, a escolha do barramento de 69 kV da SE Mussuré para localização do equivalente de curto-circuito da rede externa mostra-se suficiente.

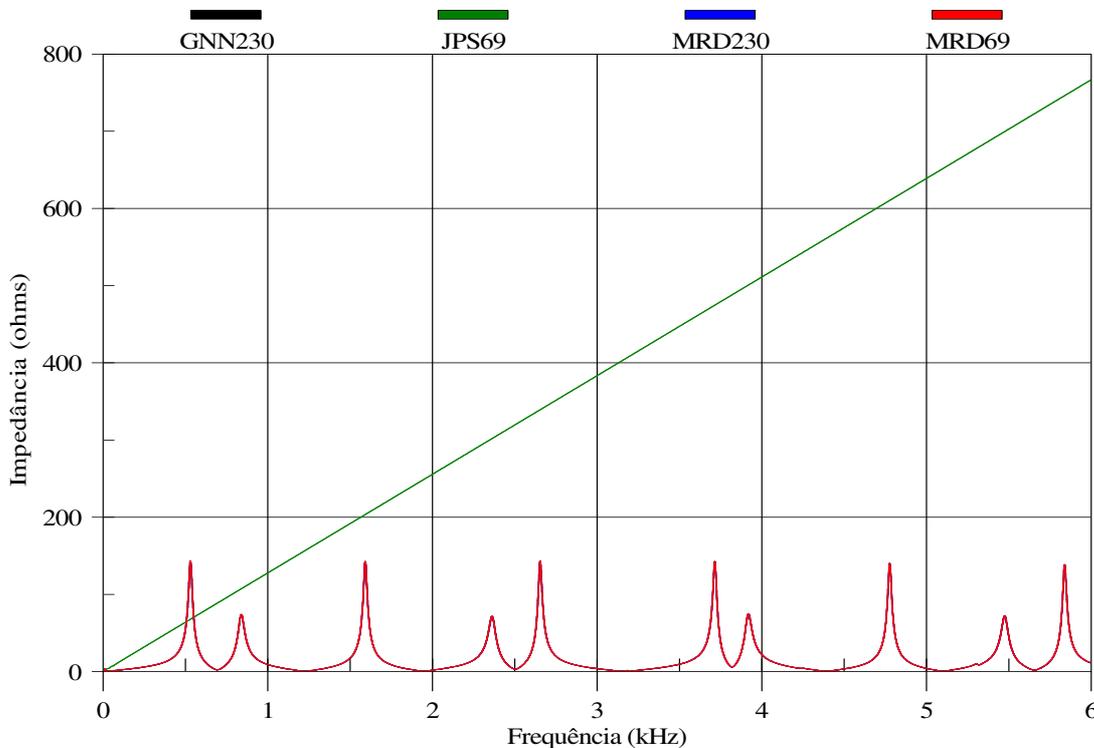


Figura 5.2 – Análise dos efeitos do comprimento da rede externa modelada sobre a amplitude da impedância harmônica própria.

Uma vez definido o limiar das redes externas, emprega-se a técnica proposta para estimação paramétrica do circuito equivalente dependente da frequência visto a partir da subestação João Pessoa.

Inicialmente se conduz à fragmentação das componentes real e imaginária do espectro. Rotinas constituídas de algoritmos para detecção de passagem por zero e localização de máximos e mínimos locais efetuam a extração dos atributos necessários ao cálculo dos parâmetros que compõem os modelos.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as componentes de frequência obtidas com as rotinas implementadas e os correspondentes parâmetros calculados para um elemento próprio da matriz de impedâncias. O ponto de corte considerado foi de 6 kHz, delimitado pelo espectro da TRT de maior frequência da rede teste.

Tabela 5.1 – Atributos da impedância harmônica própria.

Ramo	Frequências (kHz)			Parâmetros do modelo		
	$F_k^{Z_up}$	F_k	$F_k^{Z_low}$	$R_k (\Omega)$	$L_k (mH)$	$C_k (\mu F)$
0		0,060		1,7161	3,5706	
1	0,519	0,532	0,543	140,7650	1,907914	46,90922
2	0,820	0,838	0,858	73,9803	0,635944	56,71964
3	1,581	1,594	1,605	138,7986	0,208934	47,71490
4	2,343	2,366	2,385	70,1602	0,0839265	53,91524
5	2,642	2,654	2,666	141,9471	0,0769777	46,71684
6	3,704	3,717	3,728	138,7416	0,0383788	47,77096
7	3,897	3,915	3,937	73,9763	0,0306956	53,83937
8	4,765	4,778	4,789	137,4310	0,0230043	48,23247
9	5,456	5,478	5,498	71,0928	0,0158422	53,28194
10	5,828	5,840	5,851	136,2377	0,0146250	50,78308
∞		6,000		0,5925		7,8029

Na Figura 5.3 se exibe a superposição das respostas no domínio da frequência para o elemento próprio da fase A da rede externa real e do circuito equivalente dependente da frequência ao qual correspondem os parâmetros da Tabela 5.1. Analisando-se a Figura 5.3, observa-se que ocorre praticamente a superposição dos espectros, provendo uma boa aproximação principalmente nos pontos de ressonância em paralelo do espectro, para o qual a impedância tende a infinito. A reduzida discrepância entre as respostas mostra a robustez do método na estimação paramétrica do modelo.

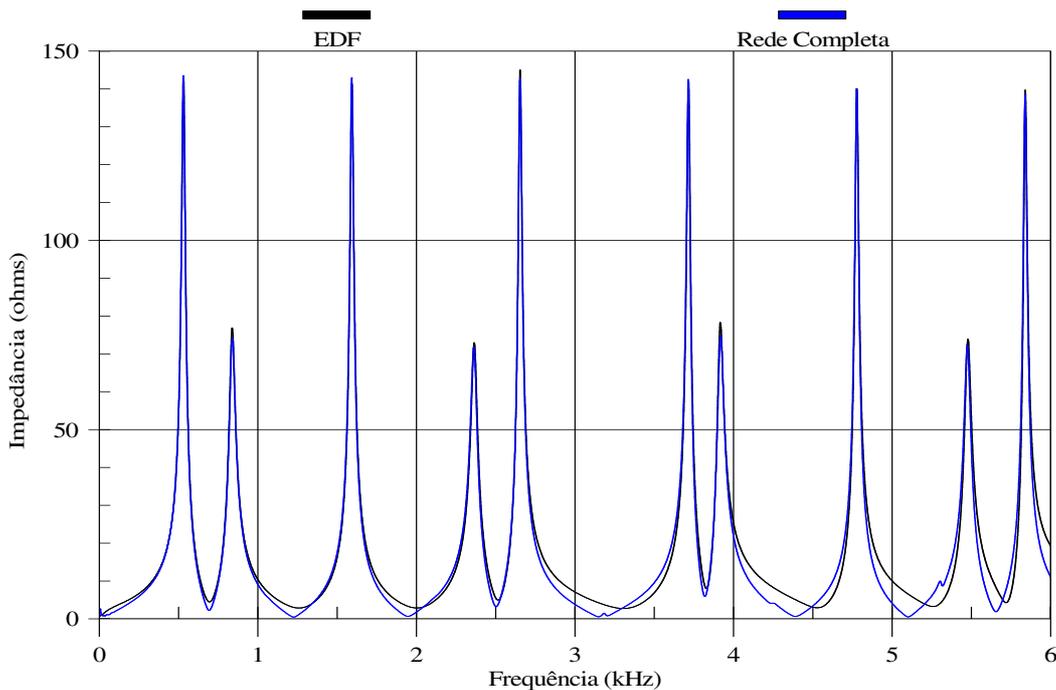


Figura 5.3 – Aferição das respostas da rede externa real e do equivalente dependente da frequência.

Devido à dominância dos ramos RLC nas vizinhanças dos pontos de ressonância, com a topologia escolhida para o EDF permite-se de forma simples a redução da ordem do circuito equivalente por meio da eliminação de ramos que representam as componentes de menor amplitude do espectro. Um exemplo é apresentado na Figura 5.4. Este tipo de aplicação pode se tornar importante em estudos que demandam elevado tempo de processamento nas simulações.

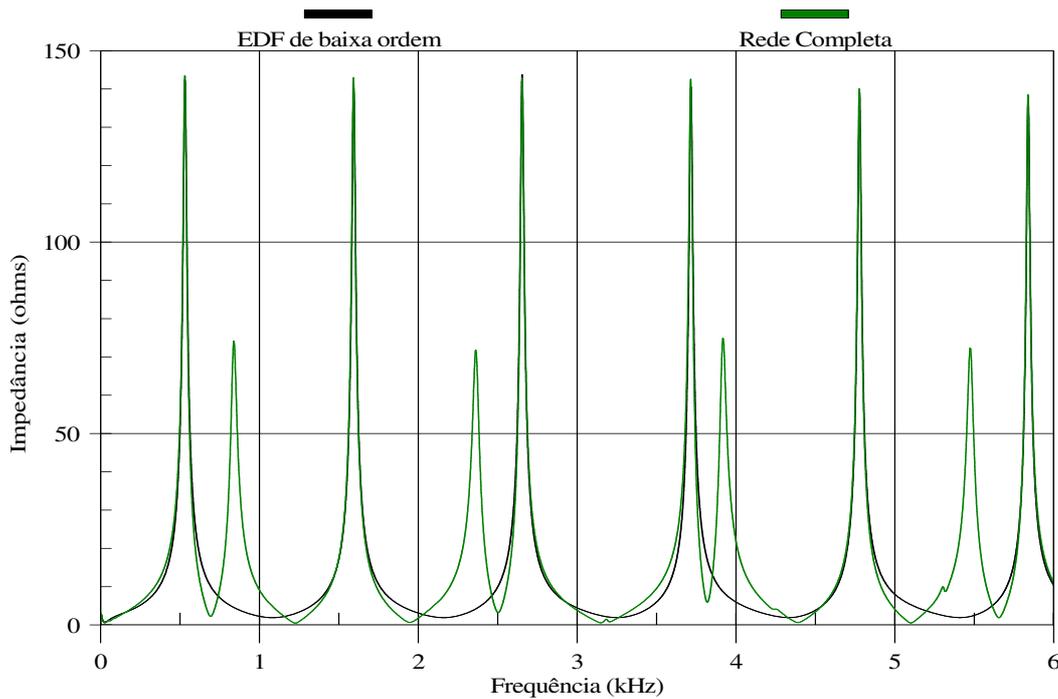


Figura 5.4 – Aferição das respostas em frequência após a redução da ordem do circuito equivalente.

A topologia correspondente à rede elétrica com aplicação do equivalente é mostrada na Figura 5.5.

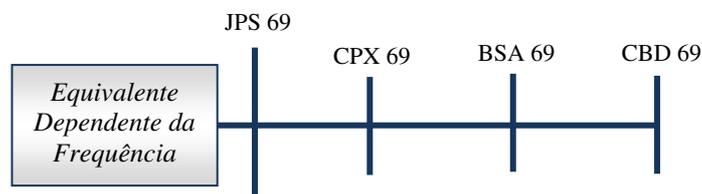


Figura 5.5 – Topologia após aplicação do circuito equivalente dependente da frequência.

A fim de validar a eficácia do EDF, análises serão realizadas no domínio do tempo, condicionando o cálculo dos parâmetros presumidos da TRT empregados no dimensionamento de disjuntores e religadores. Estudos serão realizados nas subestações João Pessoa e Cruz do Peixe.

5.3 Análises no Domínio do Tempo

No âmbito do Planejamento da Expansão e da Operação, de modo similar à necessidade de avaliar a evolução dos requisitos da capacidade de interrupção de disjuntores e religadores, também é essencial efetuar análise análoga para a evolução dos requisitos de suportabilidade à TRT. Como meta, identificar eventuais casos de superação dos equipamentos existentes bem como assegurar a correta especificação/aquisição de equipamentos novos. Na realização destes estudos, no que concerne às especificidades tratadas para a modelagem do sistema elétrico, a representação precisa dos equivalentes caracteriza aspecto fundamental. Quanto aos cenários em que se detecta superação ou reduzida margem de segurança dos parâmetros presumidos, a adoção de medidas mitigadoras mostra-se propícia uma vez que os custos para aquisição de equipamentos de classe de tensão superior é bastante elevado.

5.3.1 Aplicação de Equivalente Dependente da Frequência

Para efetivar a validação do equivalente em frequência através de estudos de TRT no domínio do tempo, a fonte de tensão do circuito equivalente tem seu valor ajustado respeitando-se às condições de regime permanente. Será avaliado o cenário de carga leve do sistema, que se caracteriza por condições transitórias mais severas (Jones, 1988; Costa *et al*, 2009).

Simulações digitais contemplando a eliminação de faltas serão avaliados para dois equipamentos. O disjuntor 12J4 da SE João Pessoa (JPS), disposto na linha que conecta esta subestação à SE Cruz do Peixe (CPX) (Figura 5.1), será submetido à eliminação de falta trifásica não aterrada. Este disjuntor apresenta classe de tensão 72,5 kV, Capacidade Nominal de Interrupção (CNI) de 25 kA e tem sua parametrização regida pela norma IEC. O disjuntor é de fabricação SCHNEIDER, tipo SB6-72 do ano de 2002.

O religador 21L7 da SE CPX (Figura 5.6) também foi avaliado sob cenário de curto-circuito trifásico. Além desta condição, foram realizados testes para o referido religador considerando a supressão de faltas quilométricas na linha de distribuição que alimenta as cargas. O religador é de classe de tensão 15 kV, CNI de 16 kA e exhibe normatização em consonância com as especificações da norma ANSI. É de fabricação COOPER POWER, modelo ESV-1516 do ano de 1998.

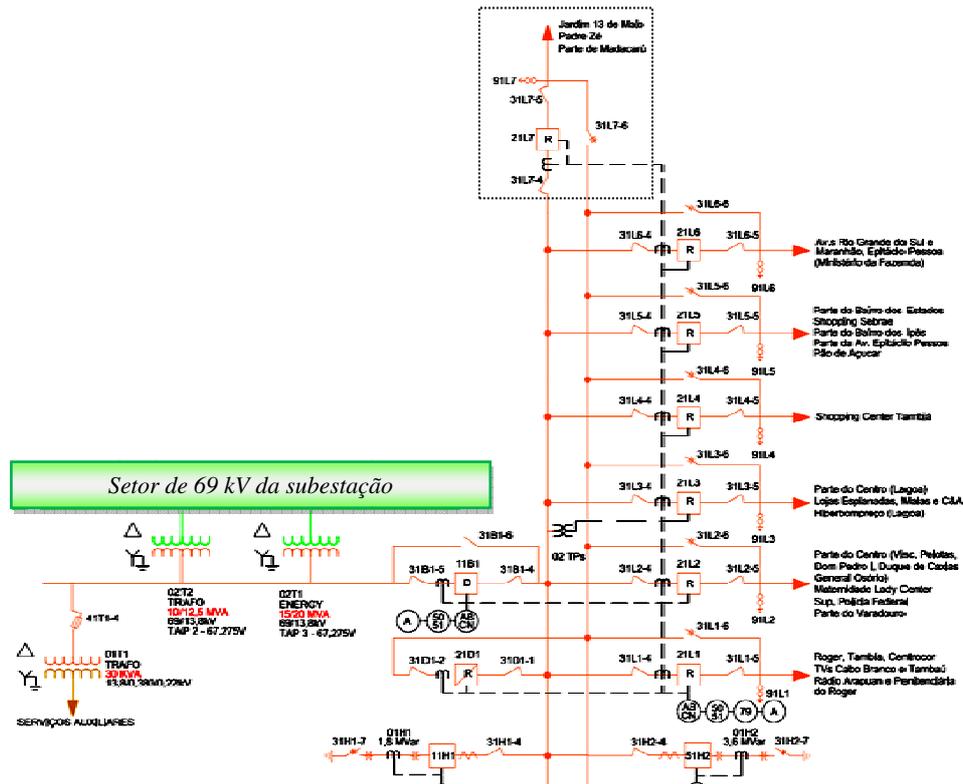


Figura 5.6 – Setor de 13,8 kV da subestação Cruz do Peixe.

Sinteticamente, três cenários foram efetivados para o cálculo da taxa de crescimento e do valor de pico da TRT:

- Cenário 1: Eliminação de falta trifásica não aterrada pelo disjuntor 12J4.
- Cenário 2: Eliminação de falta trifásica não aterrada pelo religador 21L7.
- Cenário 3: Eliminação de falta quilométrica pelo religador 21L7.

Nos estudos de curto-circuitos monofásicos, as condições mais adversas para a taxa de crescimento foram obtidas para faltas localizadas a 2 km de distância do equipamento, no ramal de distribuição que alimenta as cargas.

Para todos os cenários comparam-se as respostas obtidas admitindo-se a representação da rede completa (RC), do Equivalente Dependente da Frequência (EDF), além do Equivalente Simplificado (ES) calculado a 60 Hz. Adicionalmente, o fenômeno é diagnosticado mediante comparação dos parâmetros presumidos com as especificações estabelecidas pela norma de fabricação dos equipamentos.

De acordo com as normas de referência, os valores de máximos suportáveis pelo disjuntor 12J4 são de 146 kV para o valor de pico e 2,35 kV/μs para a taxa de crescimento da TRT. Para o religador 21L7, os patamares são 28,2 kV e 0,89 kV/μs sob

supressão de faltas trifásicas enquanto que para faltas quilométricas são 18,8 kV e 0,59 kV/ μ s. As Tabelas 5.2 a 5.4 mostram os resultados obtidos considerando o desempenho dos modelos utilizados na representação da rede equivalente. Índices de superação negativos indicam a margem de segurança. Dados positivos resultam na indicação de níveis acima dos patamares de referência.

Tabela 5.2 – Resultados das análises de falta trifásica não aterrada no disjuntor 12J4.

Parâmetros		RC	EDF	ES
Valor de pico - U_c (kV)		110,3	110,2	135,0
Taxa de Crescimento - TCTRT (kV/ μ s)		0,05	0,07	0,10
Erros em relação ao caso base	U_c	---	-0,1%	22,4%
	TCTRT	---	40 %	100%
Índice de superação	Dielétrica	-24,4%	-24,5%	-7,5%
	Térmica	-97,9%	-97,0%	-95,7%

Tabela 5.3 – Resultados das análises de falta trifásica não aterrada no religador 21L7.

Parâmetros		RC	EDF	ES
Valor de pico - U_c (kV)		27,3	29,1	30,3
Taxa de Crescimento - TCTRT (kV/ μ s)		0,02	0,02	0,03
Erros em relação ao caso base	U_c	---	6,6%	11,0%
	TCTRT	---	-3,7%	1,9%
Índice de superação	Dielétrica	-3,2%	3,2%	7,4%
	Térmica	-97,8%	-97,8%	-96,6

Tabela 5.4 – Resultados das análises de falta quilométrica no religador 21L7.

Parâmetros		RC	EDF	ES
Valor de pico - U_c (kV)		21,8	21,6	22,1
Taxa de Crescimento - TCTRT (kV/ μ s)		1,87	1,65	2,13
Erros em relação ao caso base	U_c	---	-0,9%	1,4%
	TCTRT	---	-11,8 %	13,9%
Índice de superação	Dielétrica	16,0%	14,9%	17,6%
	Térmica	216,9%	179,7%	261,0%

Mediante avaliação das informações apresentadas nas Tabelas 5.2 a 5.4, constata-se que a utilização do equivalente dependente da frequência (EDF) propicia discrepâncias inferiores às repostas proporcionadas pelo equivalente de curto-circuito simplificado (ES) calculado à frequência fundamental, envidando resultados satisfatórios.

Na utilização do EDF os erros correspondentes ao valor de pico foram todos inferiores a 6,6% quando comparados com o caso base. Nas análises dos dados de taxa de crescimento, embora discrepâncias mais acentuadas tenham sido constatadas, as margens de segurança associadas com os índices de superação foram bastante elevadas.

Como esperado, o equivalente simplificado (ES) incide na redução do amortecimento inerente à rede externa, ocasionando condições transitórias mais severas uma vez que o espectro de frequência associado mostra que há amplificação das amplitudes das componentes harmônicas (Figura 5.2). Para o disjuntor 12J4, os erros provocados pelo uso do circuito simplificado superam em mais 20% os patamares reais.

Comparando a rede completa e o EDF, foi constatado que o número de nós e ramos representados nos arquivos de entrada foi reduzido em cerca de 60%. O tempo de processamento das simulações apresentou uma redução entre 35 e 50% admitindo-se a monitoração entre 25 e 30 variáveis de saída.

Resumidamente, a metodologia empregada na síntese de Equivalentes Dependentes da Frequência propiciou bons resultados nos domínios da frequência e do tempo, fornecendo subsídios para a minimização dos erros decorrentes do difundido uso de modelos simplificados em estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória. Esta é uma etapa importante do processo, caracterizada como intermediária na consecução de um modelo para representar equivalentes de redes elétricas de múltiplas portas assim como para aplicações envolvendo análises em tempo real.

5.3.2 Aplicação do Dispositivo de ZnO para Limitar o Pico da TRT

A fim de evitar a substituição do religador 21L7 por outro com classe de tensão superior ou algum equipamento que apresente características térmica e dielétrica que suportem as sobretensões provocadas durante sua abertura, investiga-se a instalação de um dispositivo de ZnO entre seus terminais para reduzir o pico da TRT. Este equipamento também apresentou superação por taxa de crescimento nos estudos de falta quilométrica, além de exibir uma margem de segurança abaixo de 5% quanto ao valor de pico no cenário de falta trifásica não aterrada.

Como etapa preliminar ao uso do dispositivo de ZnO, é analisada uma alternativa para reduzir a taxa de crescimento da TRT, visto que o religador apresentou superação térmica. Simulações digitais são realizadas com o uso de células de surto capacitivas de

150 nF nos terminais do equipamento (Figuras 5.7 e 5.8). Para sua eficácia, as células devem estar conectadas no terminal mais próximo à linha de distribuição que alimenta as cargas, visto que a frequência de oscilação desta componente de tensão apresenta uma frequência muito superior ao correspondente espectro no lado da fonte (Figura 5.9).

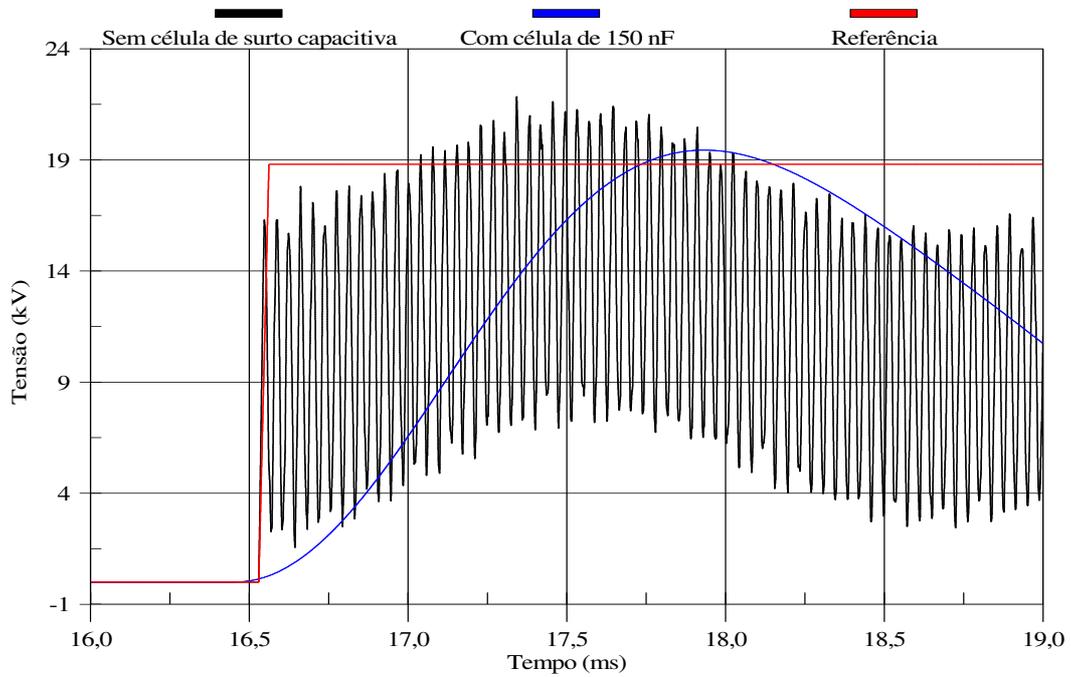


Figura 5.7 – Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no religador 21L7: Análise do valor de pico e da taxa de crescimento.

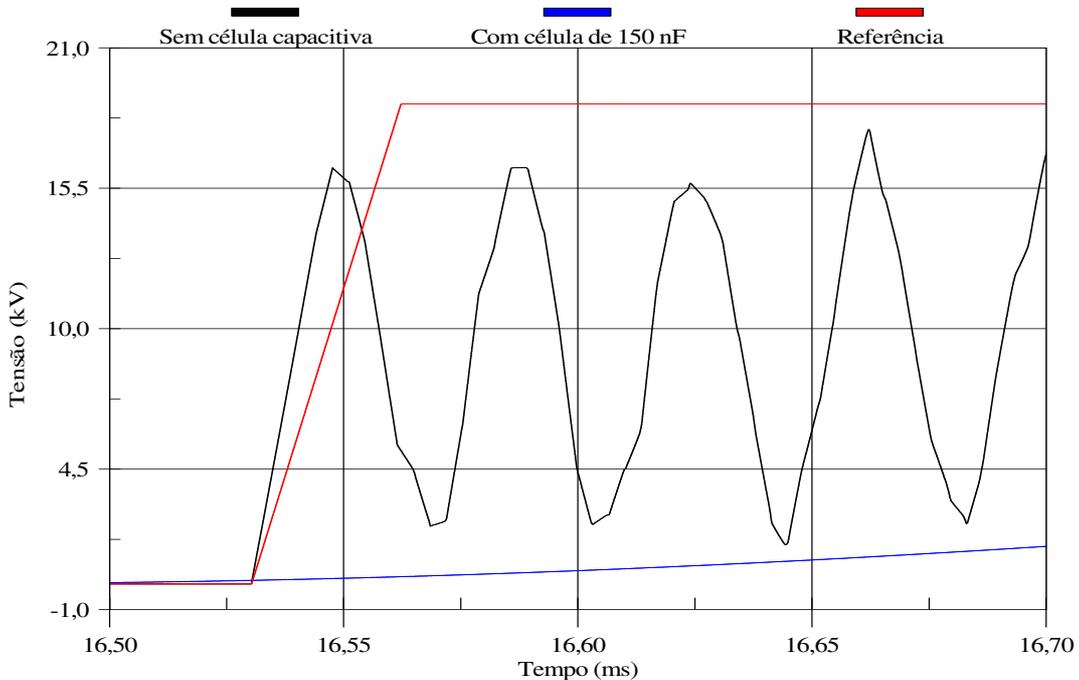


Figura 5.8 – Efeitos da célula de surto capacitiva sobre a TRT no religador 21L7: Primeiros microssegundos após a abertura dos contatos.

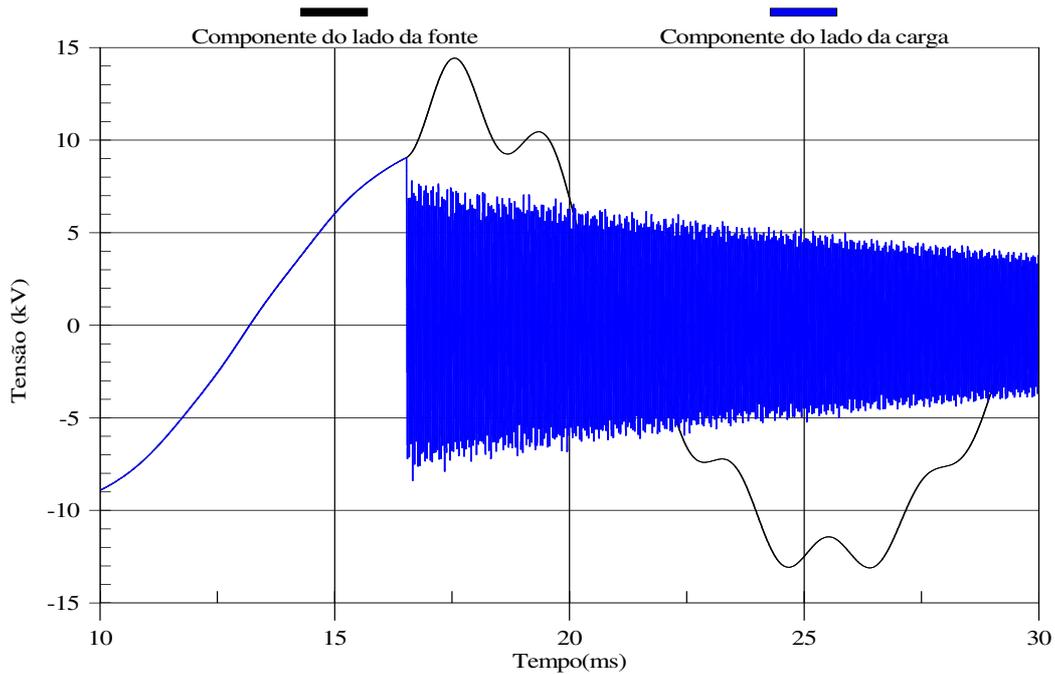


Figura 5.9 – Componentes da TRT no religador 21L7 antes da inserção das células capacitivas.

Nos estudos de falta quilométrica, nota-se que o uso das células capacitivas reduz a taxa de crescimento da TRT, no entanto, o máximo valor de pico (U_c) obtido ainda permanece acima do limite admissível (Figura 5.7), o que acarretaria em sua substituição por outro de classe de tensão superior. Em face disto, verifica-se como alternativa o uso de dispositivos compostos por varistores de ZnO entre os terminais do religador para reduzir o valor de pico da TRT. Os dispositivos denominados DZnO3 e DZnO4 são compostos, respectivamente, por três e quatro pastilhas em série (Figura 5.10), cuja característica $V \times I$ foi destacada na Tabela 4.2 do Capítulo 4. Elementos estruturais tais como invólucro, hastes e terminais de conexão (D’Ajuz *et al*, 1985) não são descritos, uma vez que para esta aplicação podem apresentar esquema distinto daqueles utilizados nos pára-raios convencionais.

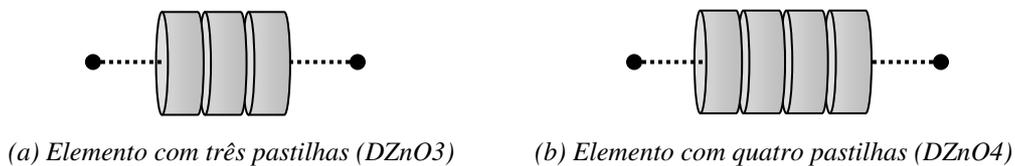


Figura 5.10 – Descrição dos dispositivos de ZnO avaliados.

O resultado mostrado na Figura 5.11 corresponde ao perfil da TRT nos contatos do religador 21L7, no primeiro pólo a abrir na eliminação de falta terminal trifásica não

aterrada. O valor de pico neste caso é mais severo, justificado pelo fator de primeiro pólo.

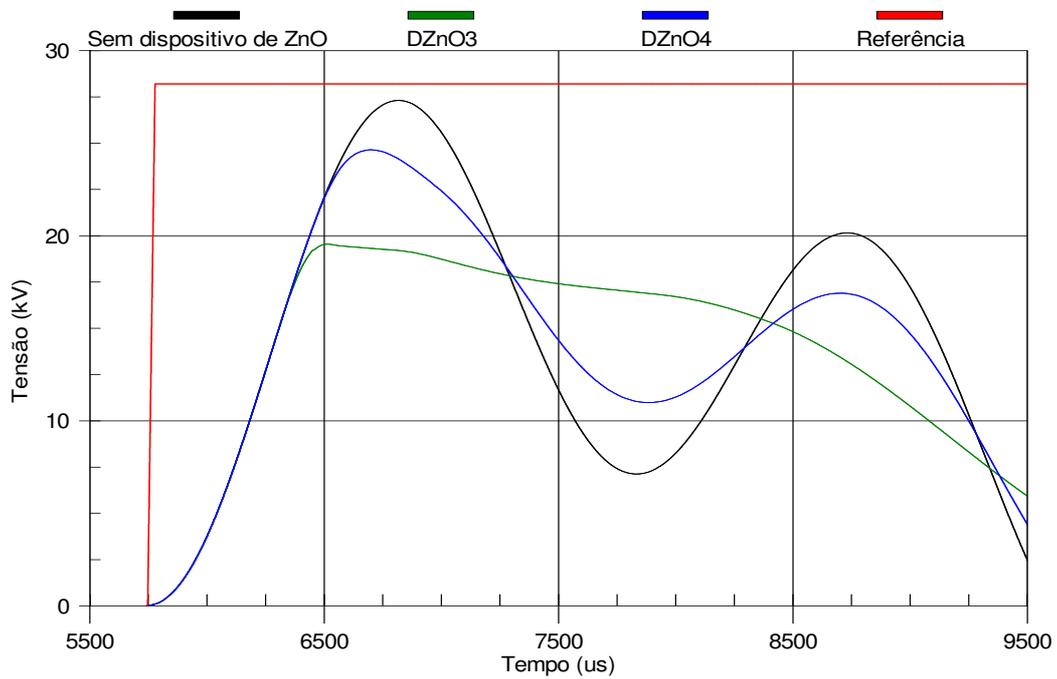


Figura 5.11 – TRT no religador 21L7: Eliminação de falta trifásica não aterrada.

Nas Figuras 5.12 e 5.13 é apresentada a TRT presumida entre os contatos do religador 21L7 na eliminação de falta quilométrica. Admite-se a existência ou não de células capacitivas para reduzir a TCTRT.

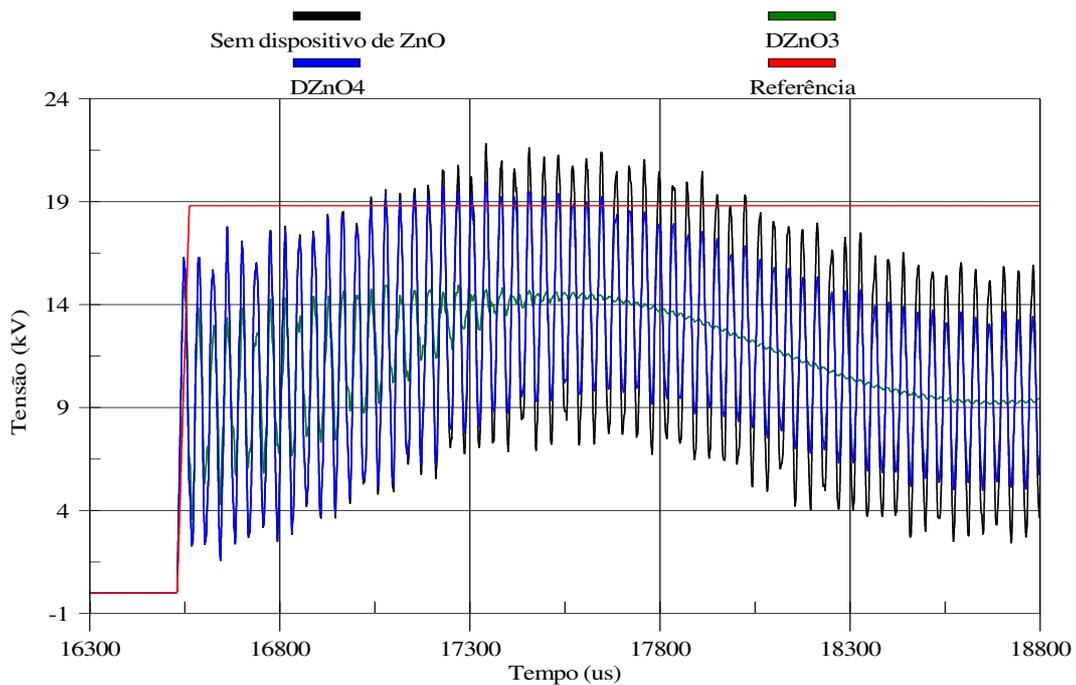


Figura 5.12 – TRT no religador 21L7: Eliminação de falta quilométrica (sem célula capacitiva).

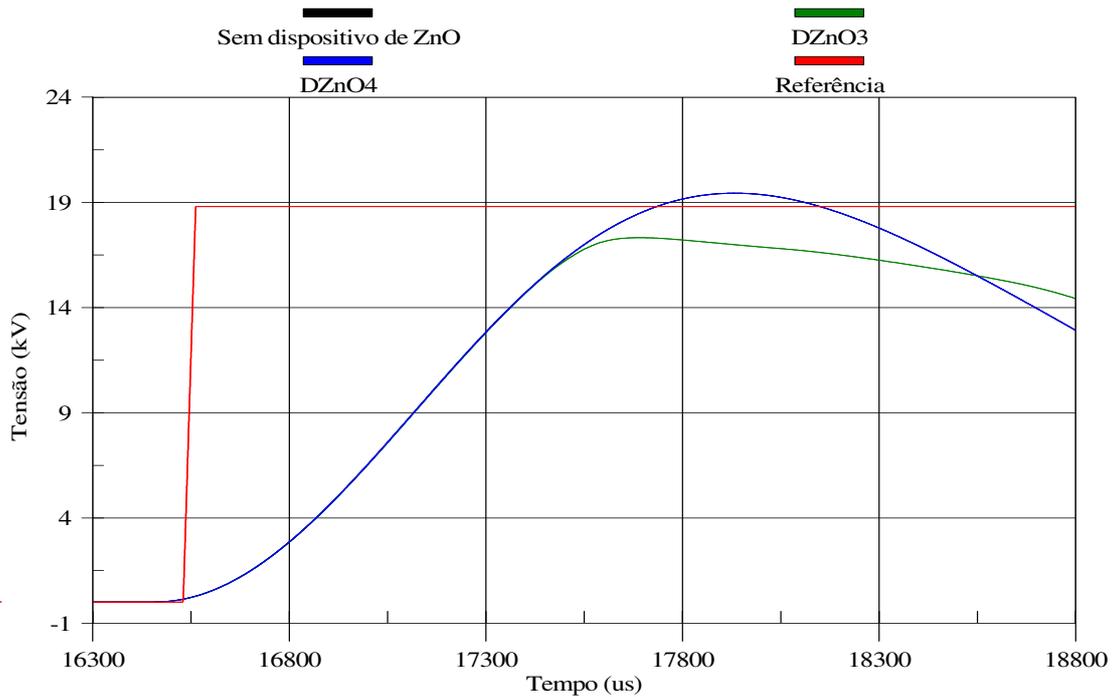


Figura 5.13 – TRT no religador 21L7: Eliminação de falta quilométrica (com célula capacitiva).

Uma síntese dos casos é apresentada na Tabela 5.5. O equipamento é classificado como “superado” quando qualquer dos seus parâmetros presumidos se encontra acima das especificações de norma. O mesmo é denominado “inseguro” sob condições em que a margem de segurança se encontra com nível abaixo de 5%. Nas demais situações o equipamento pode ser classificado como “adequado” quanto à suportabilidade a TRT.

Tabela 5.5 – Síntese dos resultados obtidos na análise de adequabilidade do religador 21L7.

Caso	Falta trifásica não aterrada		Falta quilométrica		Classificação
	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	U_c (kV)	TCTRT (kV/ μ s)	
Valor de referência	28,2	0,89	18,8	0,59	---
Sem dispositivos mitigadores	27,3	0,02	21,8	1,87	Superado
DZnO4	24,6	0,02	19,9	1,32	Superado
DZnO3	19,5	0,02	14,9	1,76	Superado
DZnO4 + células capacitivas	24,6	0,02	19,4	0,18	Superado
DZnO3 + células capacitivas	19,5	0,02	17,3	0,18	Adequado

Com base na Tabela 5.5, pode-se afirmar que a única solução avaliada que torna admissíveis as operações de abertura requer o uso de células de surto de 150 nF e o uso do dispositivo composto por três pastilhas de ZnO (DZnO3). Para os demais casos, o equipamento se encontra superado por valor de pico, por TCTRT ou por ambos.

Energia e corrente solicitadas ao dispositivo de ZnO na supressão de faltas quilométricas assumem patamares muito baixos, não se mostrando fundamentais ao seu dimensionamento neste cenário. Contudo, na análise de falta terminal trifásica não aterrada sua avaliação é necessária. Resultados para este caso são apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15.

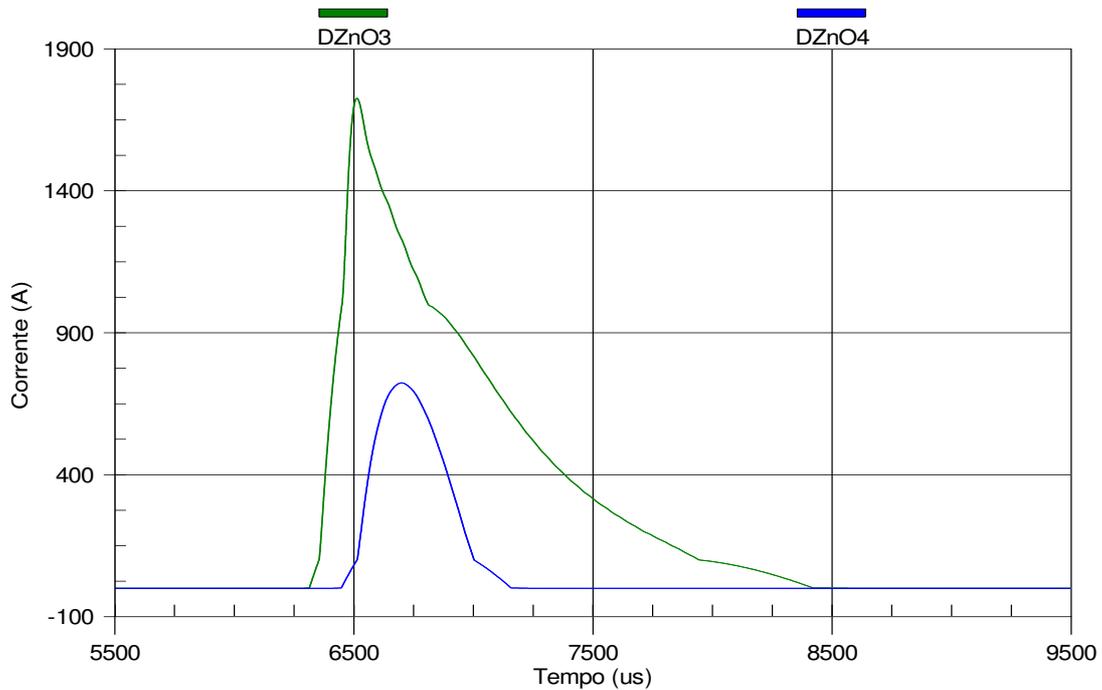


Figura 5.14 – Corrente no dispositivo de ZnO: Eliminação de falta trifásica não aterrada.

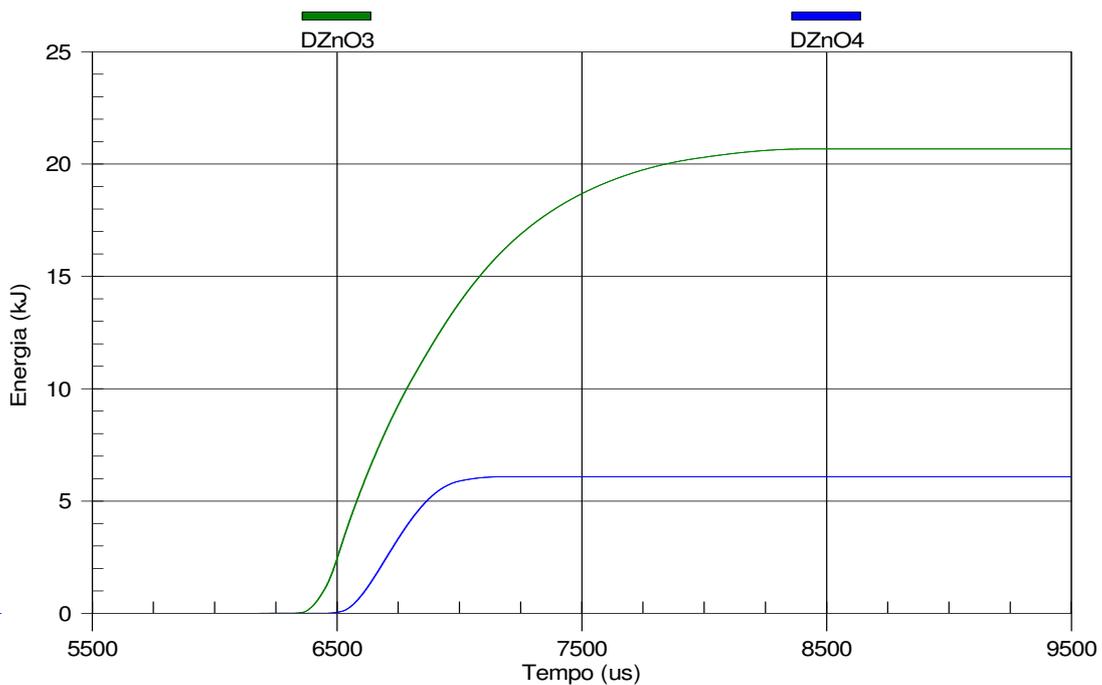


Figura 5.15 – Energia no dispositivo de ZnO: Eliminação de falta trifásica não aterrada.

Constata-se que o dispositivo DZnO4 apresenta corrente e energia abaixo das condições verificadas para o dispositivo DZnO3. É evidente que um menor número de discos na composição do dispositivo mitigador acarreta menor resistência equivalente, ocasionando um cenário mais propício à absorção da energia dissipada pelo surto. Logo, para o pior caso, cada pastilha que compõe o dispositivo DZnO3 deve ser capaz de absorver aproximadamente 7,0 kJ, o que corresponde a uma característica intrínseca entre 1 a 2 kJ/kV, padrão disponível comercialmente.

Pára-raios convencionais possuem um de seus terminais aterrado. No caso da operação do dispositivo de ZnO tratado neste trabalho, para faltas aterradas parte do surto é transferido aos ramais de distribuição. Isto ocorre devido a sua localização entre os terminais do religador. A existência de células de surto neste caso inibe a variação brusca da tensão ($v_2(t)$) no terminal localizado mais próximo da carga (Figura 5.16).

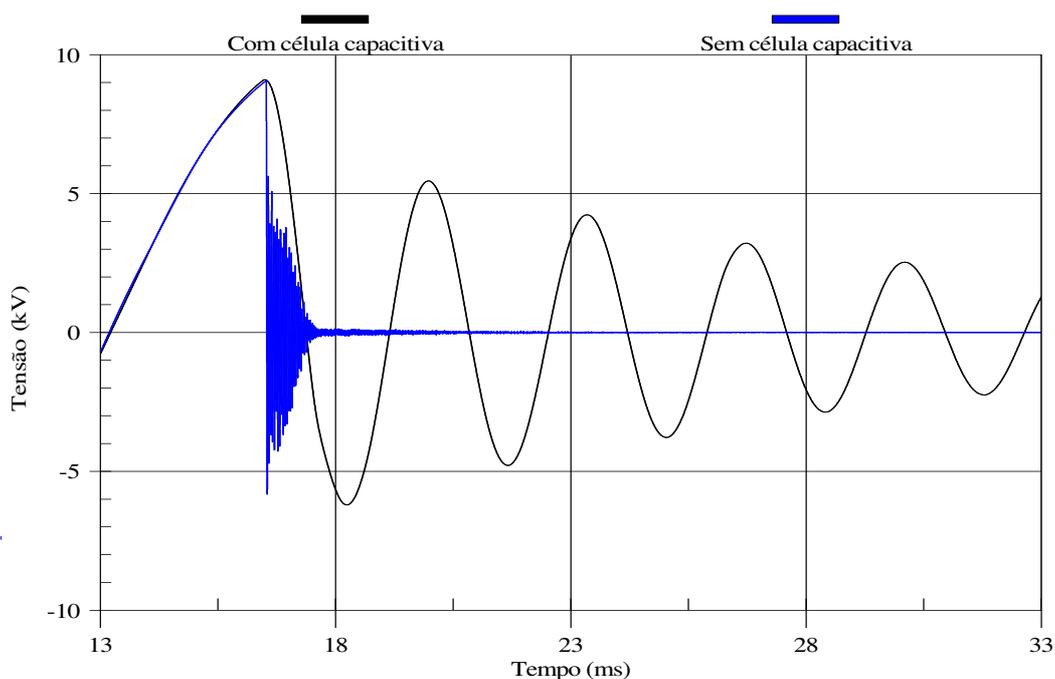


Figura 5.16 – Perfil de tensão no terminal do religador 21L7 localizado no lado da carga: Eliminação de falta monofásica quilométrica.

Da Figura 5.16, verifica-se que é essencial dispor de um elemento dissipador em paralelo com a célula capacitiva utilizada para reduzir o alto gradiente de tensão que surge entre os terminais do religador. Idealmente, a tensão $v_2(t)$ assumiria valor nulo caso inexistisse o dispositivo utilizado para limitar o pico da TRT.

Quanto ao desempenho e a eficácia do dispositivo de ZnO na eliminação de curto-circuitos trifásicos de alta frequência, condições de laboratório foram reproduzidas

através de testes digitais. A topologia adotada é idêntica ao circuito apresentado na Figura 4.3 do capítulo anterior. Foi considerada a geração de uma forma de onda de pico máximo de 30 kV com frequência em torno de 30 kHz no período transitório. A corrente de falta tem valor 15 kA. A seguir são mostradas, respectivamente, a TRT com e sem o dispositivo limitador e a sua energia absorvida.

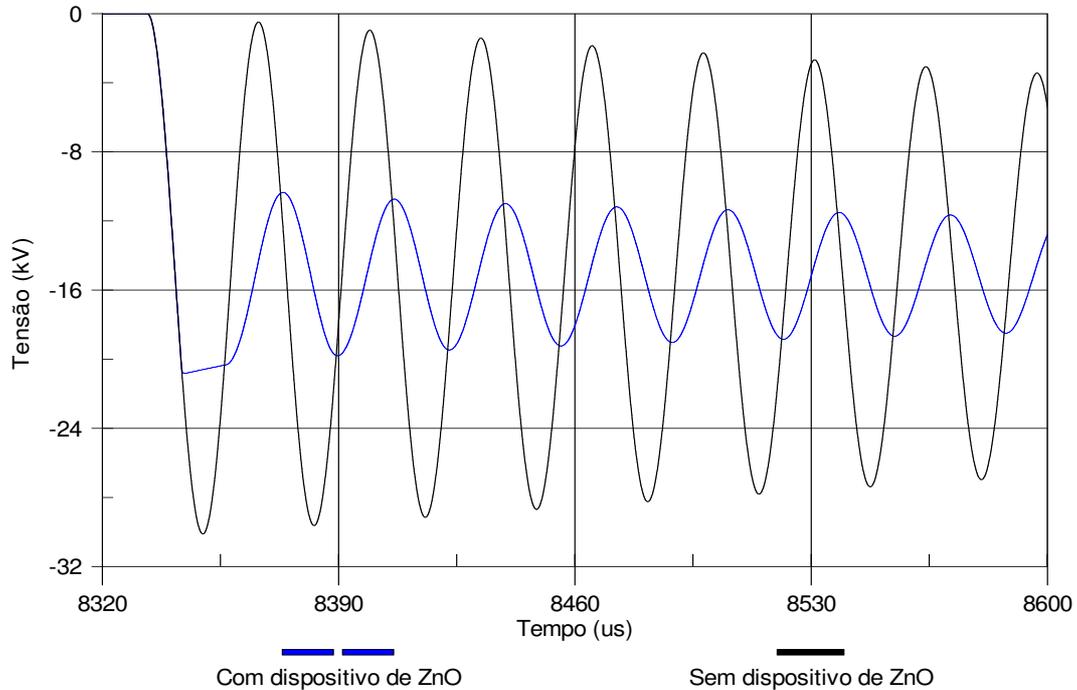


Figura 5.17 – TRT entre os terminais do equipamento teste quando submetido à condição transitória de alta frequência.

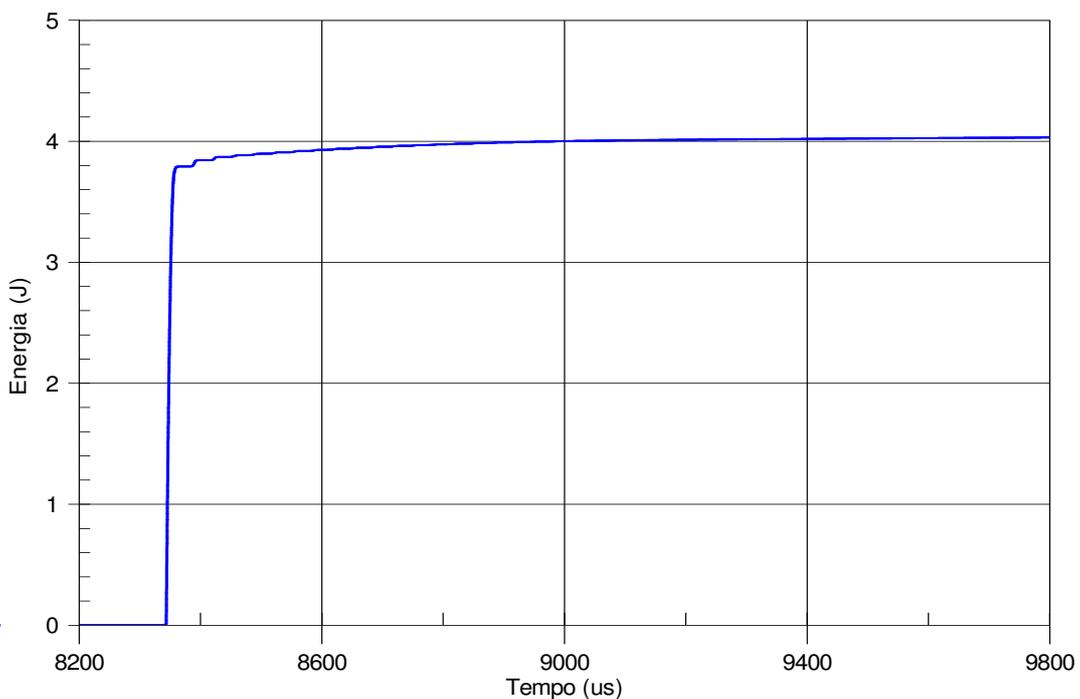


Figura 5.18 – Energia absorvida pelo dispositivo de ZnO na limitação do pico da TRT sob condição transitória de alta frequência.

Os resultados digitais mostram que o dispositivo de ZnO é uma alternativa factível para redução do valor de pico da TRT. Além disso, a baixa energia absorvida sob condições de alta frequência corrobora com os resultados obtidos por Nobre (2001), visto que a sollicitação ao dispositivo limitador, neste cenário, se estabelece em patamar bem abaixo da capacidade que o equipamento pode dissipar ou, sob comparação, às condições observadas em análises de transitório de baixa frequência (< 5 kHz).

5.4 Principais Constatações

Avaliando-se de forma criteriosa os resultados obtidos, constata-se que apesar da compatibilidade proporcionada no domínio da frequência (Fig. 5.3) por parte do equivalente sintetizado através da metodologia proposta, ainda são verificadas discrepâncias nas análises no domínio do tempo. No entanto, os erros outrora proporcionados por equivalentes à frequência fundamental são substancialmente reduzidos (Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4), indicando perspectivas positivas para o aperfeiçoamento da técnica utilizada na estimação paramétrica do modelo adotado e ampliação do seu escopo de aplicação.

Quanto à especificação de subsídios para implantação do limitador do pico da TRT, destacam-se como constatações mais importantes:

1. Falhas trifásicas não aterradas provocam as maiores sollicitações de energia ao dispositivo mitigador, no entanto, falhas quilométricas também devem ser previstas no seu dimensionamento;
2. Quando necessárias, células de surto utilizadas para reduzir a taxa de crescimento da TRT devem ser dimensionadas antes do projeto do limitador do pico, uma vez que as mesmas podem alterar os cenários de sollicitação de energia impostas pelo surto;
3. É importante projetar elementos dissipadores em paralelo com as células de surto quando da sua atuação em acoplamento ao uso dos dispositivos de ZnO;
4. Para definição do número de pastilhas que devem compor o dispositivo de ZnO, cenários de baixa frequência (< 5 kHz) devem ser previstos na realização de testes em laboratório.

No capítulo que segue não expostas as principais conclusões do trabalho de dissertação e diretrizes para trabalhos futuros.

CONCLUSÕES

Uma metodologia para síntese de equivalentes dependentes da frequência foi apresentada para redução dos esforços dedicados à modelagem plena de redes elétricas radiais de grande complexidade. A correta aquisição do espectro da impedância das redes externas que compõe a base de dados leva em consideração análises no domínio da frequência e admite a passividade do sistema. A estimação dos parâmetros do modelo adotado foi realizada através de um método simples e direto, tomando como base a análise das componentes harmônicas real e imaginária da rede equivalente nas proximidades dos pontos de ressonância.

Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória mostram boa compatibilidade quanto aos resultados de dimensionamento de disjuntores e religadores frente os requisitos previstos pelas normas técnicas de fabricação dos equipamentos. Discrepâncias inerentes ao uso de equivalentes calculados à frequência fundamental são minimizadas. Quando da aplicação dos equivalentes em frequência, resultados qualificados através de índices de superação se mostraram bem próximos aos casos provenientes das análises com a representação do sistema elétrico por completo. Devido à estrutura do modelo utilizado na representação do equivalente, circuitos de baixa ordem podem ser obtidos para aplicação em estudos que demandam elevado tempo de processamento das simulações, tais como análises probabilísticas.

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 um equipamento seccionador de classe de tensão 15 kV. Os resultados das análises 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.

Como consequência da instalação do limitador de tensão, constata-se em condições de faltas aterradas que ocorre a transferência de parte do surto do terminal mais próximo ao barramento principal da subestação para o terminal do lado da carga. Neste caso, é sugerido avaliar a possibilidade de incorporar um elemento atenuante em paralelo com as células de surto capacitivas normalmente empregadas para minimizar as solicitações térmicas decorrentes da elevada taxa de crescimento da TRT.

Por fim, a implementação do limitador em campo requer que testes preliminares em laboratório sejam conduzidos admitindo-se transitórios de baixa de frequência. Tem-se como meta verificar as condições mais adversas quanto à energia solicitada a cada disco do dispositivo de ZnO.

Para continuação dos estudos apresentados, se propõe:

1. Aplicabilidade a redes de múltiplas portas e verificação de outros modelos na composição dos circuitos: Técnicas de identificação reportadas na literatura levam em consideração as características da matriz de admitância nas barras de fronteira do sistema. Para obtenção dos elementos próprios e de transferência, deve-se considerar o tempo de trânsito que traduz a defasagem entre as portas;
2. Análise em tempo real: Modelos idealizados no domínio da frequência podem ser testados em estudos realizados através de simuladores digitais em tempo real. Para isto, devem-se avaliar equivalentes representados por um menor número de nós, convergindo-se para a redução de sua ordem e, caso necessário, aplicando técnicas de otimização para melhorar estimativas iniciais;
3. Desenvolvimento de modelo para o arco elétrico: Os parâmetros empregados no dimensionamento dos equipamentos quanto à TRT são obtidos desconsiderando a representação do arco elétrico, no entanto, é importante avaliar o comportamento deste quando da existência de um limitador de tensão. Diversos modelos de arco são disponíveis na literatura. Alguns são derivados das equações clássicas de Cassie e Mayr, outros são combinações destes. Deve-se analisar que representação é mais satisfatória no período de duração deste transitório, a fim de determinar seus efeitos sobre o valor de pico e taxa de crescimento da TRT;
4. Realização de testes em laboratório: 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abur, A., Singh, H. “Time Domain Modeling of External System for Electromagnetic Transients Program”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, n. 2, May 1993.
- Ala, G., Inzerillo, M. “An Improved Circuit Breaker Model in Models Language for ATP-EMTP Code”. *International Power Systems Transients Conference*, Paper 53, Budapest-Hungary, June 1999.
- Alexander, R. W., Dufournet, D. *Tutorial: Transient Recovery Voltage (TRV) for High-Voltage Circuit Breakers (PPL, Aston T&D)*, 2005.
- Alves, F. R. *Características do Disjuntor para Abertura de Linhas de Transmissão em Vazio – Metodologia de Estudo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 159 p., 2006.
- Amon Filho, J. , Fernandes, P. C. A., Pimenta, D. G. “Análise da Superação das Características Nominais de Equipamentos: Métodos para Identificação da Possibilidade de Ocorrência e Estudo de Soluções de Mitigação Face as Regras do Atual Modelo do Setor Elétrico”. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XVIII SNPTEE)*, Curitiba-PR, outubro de 2005.
- ANSI C37.0731-1973. *Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*. New York, Inc., 1973.
- ANSI C37.06-2000. *AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities*. New York, Inc., 2000.
- ANSI/IEEE C37.04-1979. *IEEE Standard Rating Structure for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis (Revision of ANSI/IEEE Standard C37.04-1964)*. New York, Inc., 1979.
- ANSI/IEEE C37.06-1979. *IEEE Standard Test Procedure for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*. New York, Inc., 1979.
- ANSI/IEEE C37.011-1979. *IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers*. New York, Inc., 1979.
- ANSI/IEEE C37.011-2005. *IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers*. New York, IEEE, Inc., 2005.

- Araújo, A. E. A.; Neves, W. L. A. Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia. Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005.
- Azevêdo, 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.
- Azevêdo, W. V. S., Neves, W. L. A., Fernandes Jr., D., Dantas, K. M. C.. Relatório Parcial – Ano I. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico: Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Média e Alta Tensão Devido às Solicitações de TRT e de Surtos Decorrentes de Manobras em Bancos de Capacitores. Fundação Parque Tecnológico da Paraíba (PaqTc-PB). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Janeiro de 2010.
- Bizjak, G., Zunko, P., Povh, D. “Circuit Breaker Model for Digital Simulations Based on Mayr’s and Cassie’s Differential Arc Equations”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, n. 3, July 1995.
- Bueno, P. R., Oliveira, M. M., Santos, M. R. C., Longo, E., Tebcherani, S. R., Varela, V. A. “Varistores à Base de SnO₂: Estado da Arte e Perspectivas”. *Revista Cerâmica* 46, vol. 299, pp 124-130, 2000.
- CCON - Comitê Coordenador de Operações Norte-Nordeste. *Metodologia e Critérios para a Análise de Adequação de Disjuntores quanto à Tensão de Restabelecimento Transitória*. Recife, junho 1991.
- CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – RT 07-09-011/1998. *Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória no Setor de 13,8 kV (SE Angelim)*. Recife, p. 1-19, novembro 1998.
- Clerici, R. G., Marzio, D. E. “Coordinated Use of TNA and Digital Computer for Switching Surge Studies: Transient Equivalent of a Complex Network”. *IEEE Transactions on Power Apparatus*, Vol. PAS 89, n° 8, November/December 1970.
- 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.
- Colclaser Jr., R. G., Beehler, J. E., Garrity, T. F. “A Field Study of Bus-Fault Transient Recovery Voltages”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, VOL PAS 95, n° 6, November/December 1976.

- Costa, E. G. “Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco”. Tese de Doutorado, 177 p., UFPB, Campina Grande, Brasil, abril, 1999.
- 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”. *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.
- D'Ajuz, A., Resende, F. M., Carvalho, F. M. S., Nunes, I. G., Amon Filho, J., Dias, L. E. N., Pereira, M. P., Kastrup Filho, O., Morais, S. A. *Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*, Rio de Janeiro, FURNAS, 300 p., 1985.
- Do, V. Q., Gavrilovic, M. M., “An Iterative Pole-Removal Method for Synthesis of Power System Equivalent Networks”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS 103, nº 8, August 1984.
- Do, V. Q., Gavrilovic, M. M., “A Synthesis Method for One-Port and Multi-port Equivalent Networks for Analysis of Power System Transients”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRD 1, nº 2, April 1986.
- Dommel, H. W. *EMTP Theory Book*, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, B.C., Canada, 1996.
- Duarte, L. H. S., Costa, A. C. O., Moreira, S. O., Oliveira, L. A. F. “Experiência da CEMIG na Análise de Tensões de Restabelecimento Transitórias Associadas à Faltas Alimentadas por Transformadores”. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XIX SNPTEE)*, Rio de Janeiro-RJ, outubro de 2007.
- Dufournet, D., Montillet, G. F., “Harmonization of TRVs in ANSI/IEEE and IEC Standards for High Voltage Circuit Breakers Rated less than 100 kV”. *Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 1019-1024, June 2005.
- Dufournet, D., Montillet, G. F. “Transient Recovery Voltage Requirements for System Source Fault Interrupting by Small Generator Circuit Breakers”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, nº 2, April 2002.

- Evans, R. D., Monteith, A. C. "System Recovery Voltage Determination by Analytical and A-C Calculating Board Methods". *Transactions of the American Institute of Electrical Engineering*, Vol. 50, Issue 6 - pp. 695-705, June, 1937.
- Falk, A. J., Smith, H. L., Lloyd, B. L. "Determination of Transient Recovery Voltages on the Detroit Edison System". *AIEE Winter General Meeting*, New York, December 1959.
- Faria, J. A. B., Briceño, J. M. "Modal Analysis of Untransposed Bilateral Three-phase Lines - a Perturbation Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, n°. 1, January 1997.
- Fernandes Jr., D., Nobre, D. M., Neves, W. L. A., Souza, B. A., Alves, F. R., Melo, M. O. B. C., Monteiro, J. S. "Estudos de TRT em Disjuntores de Classe 15 kV". *III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica - III CONLADIS*, São Paulo - SP, v. I, p. 483-485, 1998.
- Garzon, R. D. *High Voltage Circuit Breakers Design and Applications*. New York, Marcel Dekker, Inc., 365 p., 1997.
- Greenwood, A. *Electrical Transients in Power Systems*, John Wiley & Sons Inc., New York, 751p.
- Habedank, U. "Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-Circuit Breaking Tests". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, n. 4, October 1993.
- Habedank, U., Kugler, R. "Theoretical and Experimental Studies of the Critical Line Length for the Interruption of Short Line Faults". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-100, n. 7, July 1981.
- Hingorani, N. G., Burberry, M. F. "Simulation of AC System Impedance in HVDC System Studies". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-89, n. 5/6, p. 820-828, May/June 1970.
- Hong, J. H., Jung, B. T., Park, J. K., Kim, S. H., Ahn, B. S. "Transmission Network Equivalents in Time Domain for Electromagnetic Transients Analysis". *International Conference on Digital Power System Simulators – ICDS 95*, Texas, April 1995.
- Hosseiniam, S. H., Vahidi, B., Bieza, J. "Frequency Dependent Network Equivalents for Harmonic and Transient Studies". *TENCON 2006. IEEE Region 10 Conference*. Hong Kong, December 2006.

- Ibrahim, A. I. “Frequency Dependent Network Equivalent for Electromagnetic Transients Studies: A Bibliographical Survey”. *ELSEVIER – Electrical Power and Energy Systems*, v. 25, pp. 193-199, 2003.
- Ibrahim, A. I., Salama, M. M. A. “Frequency Dependent Network Equivalent Algorithm for AC Power Systems”. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, v. 02, pp. 639-642, May 1996.
- IEC 62271-100. *High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating Current Circuit-Breaker*. Edition 1.2, October 2006.
- IEEE Working Group 15.08.09. *Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs*. IEEE Power Engineering Society, Piscataway, NJ 08855-1331, EUA, 1991.
- Jamnani, J. G., Kanitkar, S. A. “Design and Simulation of 2-parameters TRV Synthetic Testing Circuit for Medium Voltage Circuit Breakers”. *International Conference on Electrical and Computer Engineering*, Dhaka, Bangladesh, 2006.
- Jones, R. A. “Transient Recovery Voltages for Station Auxiliary System Switchgear”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, EUA, VOL 3, n° 3, July 1988.
- Kirkland, R. S., Dufournet, D. “The Harmonization of IEEE and IEC Transient Recovery Voltage Waveforms”. *Switchgear Committee Technical Program Archives*, 2007.
- Leuven EMTP Center, *ATP - Alternative Transients Program Rule Book*, Belgium, July 1987.
- Lin, X., Gole, A. M., Yu, M. “A Wide-Band Multi-Port System Equivalent for Real Time Digital Power System Equivalent.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, n° 1, February 2009.
- Matar, M., Iravani, R. “A Modified Multiport Two-Layer Network Equivalent for the Analysis of Electromagnetic Transients.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010.
- Martinez, J. A. “Parameter Determination for Power System Transients”. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005.
- Martinez, J. A., Gustavsen, B., Durbak, D. W. “Parameter Determination for Modeling Systems Transients – Part I: Overhead Lines”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, n° 3, July 2005.

- Martinez, J. A., Durbak, D. W. "Parameter Determination for Modeling Systems Transients – Part V: Surge Arresters". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, nº 3, July 2005.
- Morched, A. S., Brandwajn, V. "Transmission Network Equivalents for Electromagnetic Transients Studies". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-102, n. 9, p.2984-2994, September 1983.
- Morched, A. S., Ottevangers, J. H., Marti, L. "Multi-Port Frequency Dependent Network Equivalents for EMTP". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3, July 1993.
- 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. *Representação de Equivalentes de Redes no Domínio de Fases*. Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, Brasil, 2004.
- Nobre, D. M., Neves, W. L. A., Souza, B. A. "An Alternative to Reduce Medium-Voltage Transient Recovery Voltage Peaks". *International Conference on Power Systems Transients*, Rio de Janeiro, 2001.
- Nobre, D. M., Neves, W. L. A., Souza, B. A., Melo, M. O. B. C., Alves, F. R., Monteiro, J. S. "Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores Classe 15 kV". *Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão (III ENAT)*, Campina Grande, 2000.
- Noda, T. "Identification of a Multiphase Network Equivalent for Electromagnetic Transient Calculations Using Partitioned Response Frequency". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, nº 2, April 2005.
- Oliveira, J. T., Paiva, H. D. R., Medeiros Jr, M. F. "Otimização de Modelos Equivalentes de Redes Elétricas". *CBA - Congresso Brasileiro de Automática*, 2004.
- 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.
- Park, R. H., Skeats, W. F. "Circuit Breaker Recovery Voltages – Magnitudes and Rate of Rises". *Transactions of the American Institute of Electrical Engineering*, Vol. 50, Issue 1 - pp. 204-231, March 1931.

- Pereira, C., Carneiro Jr., S., Szczupak, J. “Synthesis of Transient Equivalents Using Digital Filters for Real Time Simulation of Electromagnetic Transients in Large Electric Power Systems”. *International Conference on Power Systems Transients*, New Orleans, 2003.
- Porkar, B., Vakilian, M., Feuillet, R. “Frequency Dependent Network Equivalent for Electromagnetic Transients Studies by Vector Fitting”. *In Proceedings Transmission and Distribution Conference Exhibition*, Dallas, TX, May 2006.
- Porkar, B., Vakilian, M., Feuillet, R., Ghassemi, M., Akhavan, A. “Multi-Port Frequency Dependent Network Equivalent for Electromagnetic Transients Studies”. *In Proceedings 37th Annual North American Power Symposium*, Ames, IA, pp. 287–295, October 2005.
- SAELPA - Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba – RP TRT 01/2007 – Versão 1., *Validação do Estudo de TRT Elaborado pela SAELPA: Disjuntores e Religadores de 13,8 kV – Regional Mussurú II (Volume 2 – Análise de cada subestação)*, janeiro 2007.
- SAELPA - Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba – RP TRT 01/2007 – Versão 1., *Validação do Estudo de TRT Elaborado pela SAELPA: Disjuntores 69 kV – Regional Mussurú II (Volume 1 – Síntese)*, Fevereiro 2007.
- Saied, M. M. “The Kilometric Faults: Modeling and Normalized Relations for Line Transients and the Breaker-Recovery Voltage”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, n. 2, April 2005.
- Sinder, D. *Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão*. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 123 p., 2007.
- Singh, H., Abur, A. “Multi-Port Equivalencing of External System for Simulation of Switching Transients”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, n. 1, January 1995.
- Skeats, W. F., Titus, C. H., Wilson, W. R. “Severe Rates of Rise of Recovery Voltage Associated with Transmission Line Short Circuits”. *AIEE Fall General Meeting*, Chicago, October 1957.
- Smeets, R., Hooijmans, J., Schoonenberg, G. “Test Experiences with New Medium Voltage TRV Requirements in IEC 62271-100”. *19th International Conference on Electricity Distribution*, paper 0387, Viena, May 2007.

- Swindler, D. L., Schwartz, P., Hamer, P. S. Lambert, S. R. “Transient Recovery Voltage Considerations in the Application of Medium-voltage Circuit Breakers”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, n°. 2, pp. 383-388, March/April 1997.
- Wagner, C. L., Smith, H. M., “Analysis of Transient Recovery Voltage (TRV) Rating Concepts”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS 103-, n° 11, November 1984.
- Wang, Y. P., Watson, N. R. “Z-domain Frequency Dependent AC-System Equivalent for Electromagnetic Transient Simulation”. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150, n° 2, March 2003.
- Wang, X., Wilson, P., Zhou, J., Muthumuni, D., Kell, D., Lowie, K. W., “Transient Recovery Voltage Investigation of 15 kV Circuit Breaker Failure”. *IPST – International Conference on Power Systems Transients*, Montreal, Canada, June 2005.
- Watson, N. R. “Improved Fitting of z-domain Frequency Dependent Network Equivalents for Electromagnetic Transient Simulation”. *IEEE Portal*, 2007.
- Whitaker, J. C., *AC Power Systems Handbook*. 2nd Ed., Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 1999.
- Zhou, Z., Wang, X., Wilson, P. “Transient Recovery Voltage Assessment for 138 kV Breakers with the New Addition of a Wind Farm”. *IEEE International Conference on Power System Technology*, 2006.
- Zanetta Jr., L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo, SP - Brasil: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.