

MÉTODOS DE CÁLCULO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA  
PARA ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Daniel Sinder

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Sandoval Carneiro Junior, Ph.D.

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

---

Prof. Francisco Manoel Salgado Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2007

SINDER, DANIEL

Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão [Rio de Janeiro] 2007

IX, 114 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Transitórios Eletromagnéticos

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

Dedico este  
trabalho ao  
meu pai, Mauro,  
*in memoriam.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sandoval Carneiro Junior, orientador, pelo tempo e atenção dedicados ao longo deste trabalho.

Ao Engenheiro Antônio Carlos Carvalho, pela valiosa ajuda nos mais diversos assuntos correlacionados com essa dissertação.

Ao Engenheiro Arnoldo Rodrigo Saavedra, pela importante colaboração e participação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Engenheiros Dalton de Oliveira Camponês do Brasil e Mauro Pereira Muniz, pelo incentivo e infra-estrutura do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), onde parte desse trabalho foi desenvolvida.

À Helia, Julia, Márcia e Fernanda, por acreditarem mais do que eu na conclusão desse trabalho, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos demais colegas de trabalho, pelo apoio: Andréia, Arakaki, Campinho, Dalva, Delmo, Helio, Joanna, Kastrup, José Roberto e Roberto Rocha.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## MÉTODOS DE CÁLCULO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA PARA ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Daniel Sinder

Março/2007

Orientador: Sandoval Carneiro Junior

Programa: Engenharia Elétrica

A superação de disjuntores de alta tensão é um problema que afeta os sistemas de transmissão que crescem rapidamente. Os diferentes tipos de superação para esse tipo de equipamento são analisados e resumidos. Os tipos de superação mais relevantes são: corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica, corrente de carga e tensão de restabelecimento transitória (TRT).

O cálculo da TRT é trabalhoso e demanda muito tempo para ser executado. O ATP (Alternative Transients Program), programa de simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos, tem sido largamente utilizado como ferramenta para calcular a TRT. No entanto, a complexidade dessa ferramenta aliada a um grande número de disjuntores que necessitam desse tipo de análise faz surgir a necessidade do emprego de métodos que requeiram menor esforço, mas assegurando um nível de precisão aceitável.

Esse trabalho investiga os métodos de cálculo da TRT de disjuntores de alta tensão localizados em sistemas de transmissão densamente malhados para análise massiva de sua superação. Nesse sentido, são examinados alguns métodos de cálculo baseados nos domínios do tempo e da frequência. Um método que utiliza as transformadas rápidas de Fourier é proposto e desenvolvido.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE CALCULATION METHODS FOR THE HIGH  
VOLTAGE CIRCUIT BRAKER OVERRATING ANALYSIS

Daniel Sinder

March/2007

Advisor: Sandoval Carneiro Junior

Department: Electrical Engineering

The overrating of high voltage circuit breaker is an actual problem affecting fast growing transmission systems. The different overrating possibilities for this kind of equipment are analyzed and summarized. The most relevant overrating parameters are: symmetrical and asymmetrical short circuit current, load current and transient recovery voltages (TRV).

TRV calculation is quite laborious and time consuming. The ATP (Alternative Transients Program), an electromagnetic transient simulation program, has been largely used as a tool to calculate TRV. However, the complexity of the use of this tool combined with a great number of circuit breakers requiring this analysis lead to the need of employing methods that require less effort, but assuring an acceptable accuracy level.

This work reviews TRV calculation methods of high voltage circuit breakers applied in meshed systems for a massive overrating analysis of those equipments. In this direction, some TRV calculating methods in time and frequency domain are examined. A method which uses the fast Fourier transforms is proposed and developed.

---

# SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO .....	3
1.3	PLANO DE AMPLIAÇÕES E REFORÇOS .....	6
<b>2</b>	<b>SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES.....</b>	<b>7</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	7
2.2	SISTEMA DE INTERRUÇÃO DE CORRENTE.....	7
2.3	SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CARGA.....	13
2.4	SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICA .....	19
2.5	SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ASSIMÉTRICA.....	19
	2.5.1 <i>Assimetria da corrente de curto-circuito .....</i>	19
	2.5.2 <i>Solicitações físicas da corrente assimétrica que afetam o desempenho do disjuntor.....</i>	25
2.6	SUPERAÇÃO POR CRISTA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	32
2.7	SUPERAÇÃO POR TRT .....	34
2.8	INFLUÊNCIA DA REPRESENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO NO CÁLCULO DA TRT....	40
2.9	CONCLUSÕES.....	43
<b>3</b>	<b>MÉTODOS DE CÁLCULO DA TRT .....</b>	<b>45</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	45
3.2	MÉTODOS DE CÁLCULO DA TRT: ESTADO DA ARTE .....	46

3.3	FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MÉTODO IEEE STD C37.011-2005.....	48
3.4	RESUMO DA FORMULAÇÃO USADA NA NORMA IEEE STD C37.011-2005.....	54
3.4.1	<i>TRT Exponencial (superamortecida)</i> .....	54
3.4.2	<i>TRT Oscilatória (subamortecida)</i> .....	55
3.4.3	<i>Ondas refletidas</i> .....	55
3.5	RESULTADOS – COMPARAÇÃO IEEE STD C37.011-2005 X ATP.....	55
3.5.1	<i>Disjuntor 1</i> .....	57
3.5.2	<i>Disjuntor 2</i> .....	60
3.5.3	<i>Disjuntor 3</i> .....	61
3.5.4	<i>Disjuntor 4</i> .....	63
3.6	CONCLUSÕES.....	66
<b>4</b>	<b>MÉTODO FFT PARA CÁLCULO DA TRT .....</b>	<b>67</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	67
4.2	MÉTODOS DE CONVERSÃO DE SINAIS TEMPO-FREQÜÊNCIA.....	68
4.3	TRANSFORMADAS DE FOURIER .....	69
4.3.1	<i>Transformadas contínuas de Fourier</i> .....	69
4.3.2	<i>Transformadas discretas de Fourier</i> .....	70
4.4	DESCRIÇÃO DO MÉTODO FFT .....	72
4.5	UTILIZAÇÃO DO MÉTODO FFT .....	74
4.6	ERROS NA FFT .....	77
4.7	UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAS DE CÁLCULO DE HARMÔNICOS .....	81
4.7.1	<i>Z(<math>\omega</math>) a partir de Z<sub>1</sub>(<math>\omega</math>) e Z<sub>0</sub>(<math>\omega</math>)</i> .....	82
4.7.2	<i>Cálculo de TRT utilizando somente a rede de seqüência positiva</i> .....	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>87</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	87
5.2	SUGESTÕES.....	89
	<b>APÊNDICE 1 - CÁLCULO DA CORRENTE ASSIMÉTRICA .....</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE 2 - MODELAGEM DO SISTEMA NO ATP .....</b>	<b>95</b>
A2.1	INTRODUÇÃO .....	95



A2.2 EQUIVALENTES DE CURTO-CIRCUITO .....	95
A2.3 AJUSTE DOS FLUXOS DE POTÊNCIA .....	96
A2.4 MODELAGEM DA SEQÜÊNCIA DE EVENTOS.....	96
A2.5 CASO DE ATP PARA SIMULAÇÃO DE TRT .....	97
<b>APÊNDICE 3 - CÓDIGOS MATLAB®.....</b>	<b>107</b>
A3.1 CÓDIGO DO MÉTODO TEMPO-FREQÜÊNCIA PARA CÁLCULO DE TRT .....	107
A3.2 CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DE $Z(\Omega)$ A PARTIR DE $Z_1(\Omega)$ E $Z_0(\Omega)$ .....	109
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>111</b>

---

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Contextualização

O sistema de transmissão do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) tem experimentado acentuado crescimento nos últimos 10 anos, tornando-se cada vez mais interligado e complexo. Além disso, o atual modelo do SEB permite livre acesso à rede básica de transmissão, o que estimula a instalação de unidades geradoras próximas aos centros de carga. Tais fatos têm como consequência, entre outras, o aumento das correntes de carregamento dos equipamentos e dos níveis de curto-circuito em diversos pontos do sistema, o que causa superações precoces das características nominais de equipamentos de módulos de manobra de linhas de transmissão e de transformadores. Por isso, faz-se necessária a utilização de metodologias e critérios bem definidos, assim como investigações cíclicas freqüentes da superação de tais equipamentos.

Os equipamentos pertencentes aos módulos de manobra são dimensionados para suportar correntes de carga e de curto-circuito nominais. No atual cenário de expansão, tais equipamentos podem sofrer um aumento das solicitações elétricas, causando muitas vezes a sua superação. São eles: disjuntores, chaves seccionadoras, bobinas de bloqueio e transformadores de corrente. A superação desses equipamentos pode ocorrer por corrente de carga, corrente de curto-circuito (simétrica e assimétrica) e TRT (tensão de restabelecimento transitória). Esta última se aplica somente aos disjuntores, que são os equipamentos responsáveis pela interrupção das correntes de curto-circuito.

As análises realizadas para aferir a superação por corrente de carga e corrente de curto-circuito (simétrica e assimétrica) foram sistematizadas e permitem aos agentes

do SEB detectar a superação de seus equipamentos de forma eficiente. A superação por TRT dos disjuntores, entretanto, ainda é de difícil avaliação.

O ATP (*Alternative Transients Program*) é um programa mundialmente utilizado para a simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos e tem sido empregado nas análises de superação por TRT há décadas. Tal simulação é complexa e demanda o emprego de grandes esforços e tempo do corpo técnico dos agentes do SEB, devido ao grande número de disjuntores que precisam ser avaliados.

O presente trabalho consiste na investigação do estado da arte dos métodos de cálculo da TRT de disjuntores, sob o ponto de vista da possibilidade de realizar análises simplificadas que permitam obter resultados próximos aos calculados com o programa ATP, procurando tornar possível a detecção da superação por TRT de grande número de disjuntores em prazos compatíveis com os ciclos de planejamento de curto prazo do SEB.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) publicou em 1994 e revisou em 2005 [1] um método simplificado para análise da TRT de disjuntores, baseado no domínio do tempo. Na referida revisão não houve alteração no método de cálculo da TRT. Devido ao tipo das simplificações utilizadas no método supracitado, existem dúvidas com relação à sua aplicabilidade em sistemas de transmissão com a configuração topológica do SEB, que é testada e discutida no Capítulo 3.

A análise de circuitos elétricos por meio de métodos que utilizam o domínio da frequência tem sido usada nas últimas décadas, principalmente nas áreas de eletrônica e telecomunicações. Operações no domínio da frequência têm vantagens e desvantagens em relação às realizadas no domínio do tempo. No entanto, existem métodos de análise que utilizam ambos os domínios, procurando tirar proveito das vantagens de cada um.

No Capítulo 4, é proposto e testado um método de cálculo da TRT de disjuntores que se aproveita da simplicidade que algumas operações matemáticas podem ter no domínio da frequência. Para transitar entre os domínios do tempo e da frequência se lança mão do par de transformadas discretas de Fourier.

## 1.2 Planejamento da expansão do sistema de transmissão

O planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica do SEB (Sistema Elétrico Brasileiro), função da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), é realizado considerando-se um horizonte futuro de 10 anos através do Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (PDEE).

A expansão da transmissão deve ser estabelecida de forma robusta o suficiente para que os agentes de mercado tenham livre acesso à rede, possibilitando um ambiente propício para a competição na geração e na comercialização de energia elétrica. Além disso, tal expansão desempenha um importante e relevante papel de interligar os submercados, permitindo a busca na equalização dos preços da energia, por meio da minimização dos estrangulamentos entre os submercados, e a adoção de um despacho ótimo do parque gerador [2].

Os estudos para elaboração do PDEE são executados a partir das Projeções de Mercado e do Plano de Geração. A partir das previsões de carga e de geração do sistema, formulam-se alternativas de expansão do sistema de transmissão, que são analisadas de forma a comprovar seu desempenho em regime normal, de emergência e dinâmico. As alternativas que apresentem a necessidade da utilização do recurso de corte de carga ou de geração são eliminadas.

As alternativas de expansão são, portanto, concebidas e comparadas. Para comprovar o desempenho em regime normal de cada uma delas, são analisados os fluxos de potência nas linhas de transmissão, o carregamento dos transformadores e as tensões nas barras de interesse.

Em seguida, são feitas as análises de contingência, a fim de testar o desempenho das alternativas em emergência (sistema degradado), também verificando as sobrecargas em elementos e as tensões nas barras. O desempenho dinâmico dessas alternativas de expansão é avaliado de forma a verificar a estabilidade do sistema frente a perturbações.

Depois de comprovada a equivalência técnica, a alternativa vencedora é aquela que apresenta o menor custo global (investimentos mais perdas elétricas durante o período de concessão). A alternativa de expansão vencedora pode abranger diversos equipamentos, tais como: novas linhas de transmissão, transformadores, equipamentos de compensação de energia reativa, entre outros.

Para realizar a avaliação técnica, são estabelecidos diversos critérios, entre os quais se destacam:

- Cenários de despacho e intercâmbio energético;
- Limites de carregamento;
- Contingências;
- Critérios de tensão;

Os cenários de despacho a serem analisados são definidos a priori para que se configurem as diversas possibilidades de distribuição de fluxos de potência. Da mesma forma, os cenários de intercâmbio energético entre regiões a serem estudados são pré-definidos para garantir a igualdade de condições da análise técnica.

O estabelecimento dos limites de carregamento das linhas de transmissão e transformadores envolvidos constitui outra premissa importante. Para os transformadores, pode ser admitida alguma ou nenhuma sobrecarga. No caso de linhas de transmissão, são estabelecidos carregamentos em operação normal e em emergência e geralmente considerados os limites correspondentes à condição “verão com sol” (pior condição).

Outro critério técnico necessário é a definição das contingências a serem estudadas, ou seja, quais elementos devem ser considerados desligados, um a um, para a realização dos estudos de rede degradada, ou condições de emergência.

As tensões nos barramentos de carga da Rede Básica e da Rede de Distribuição devem permanecer dentro das faixas estabelecidas na Resolução ANEEL nº 505/2001, conforme apresentadas na Tabela 1.1 [3].

Tabela 1.1 – Faixas de tensão – Resolução ANEEL nº 505/2001 [3].

CLASSE DE TENSÃO (kV)	TENSÃO MÍNIMA (p. u.)	TENSÃO MÁXIMA (p. u.)
$V \geq 230 \text{ kV}$	0,95	1,05
$69 \text{ kV} \leq V < 230 \text{ kV}$	0,95	1,05
$1 \text{ kV} < V < 69 \text{ kV}$	0,93	1,05

Em geral, são aceitas tensões mínimas de 0,90 p.u. nas condições de contingência. Nos barramentos de fronteira entre a rede básica e o sistema das distribuidoras, procura-se adotar o valor mínimo de tensão 1,00 p.u., em qualquer condição de carga, em condição normal de operação.

Para realizar a avaliação econômica, são estabelecidos outros critérios, sendo os principais listados a seguir:

- Custo dos equipamentos;
- Taxa anual de retorno;
- Mínimo custo global.

Uma premissa importante para a realização da análise econômica das alternativas é a definição dos custos de linhas de transmissão, subestações e equipamentos diversos, de forma a quantificar o valor do custo de investimento atribuído a cada uma das alternativas.

A taxa anual de retorno é a forma utilizada para obter-se o valor presente, ano a ano, das perdas elétricas que ocorrerão no sistema durante o período de concessão. Para isso, considera-se um aumento anual do custo da energia.

O critério principal para a definição da alternativa vencedora é o mínimo custo global, definindo como objetivo do estudo o atendimento às necessidades do subsistema analisado com o menor custo possível.

### 1.3 Plano de ampliações e reforços

O Plano de Ampliações e Reforços (PAR) apresenta a visão do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) sobre as ampliações e os reforços da rede básica, necessários para preservar o adequado desempenho da rede, garantir o funcionamento pleno do mercado de energia elétrica e possibilitar o livre acesso, dentro do horizonte de três anos. Para permitir o tratamento das particularidades do SEB, os estudos que resultaram na proposição do PAR são realizados de forma descentralizada pelos diversos Grupos Especiais, abertos à participação de todos os agentes, abrangendo as Regiões Sul, Sudeste / Centro-Oeste e Norte / Nordeste [4].

Portanto, o PAR consiste no detalhamento dos estudos de planejamento da expansão dos sistemas de transmissão, de forma a detectar as datas de necessidade de entrada em operação das ampliações e reforços.

O impacto sistêmico da entrada em operação das novas instalações nos equipamentos terminais existentes (disjuntores, chaves seccionadoras, bobinas de bloqueio e transformadores de corrente) não é analisado na etapa de planejamento da expansão do sistema de transmissão. A análise da superação destes equipamentos é de responsabilidade do ONS segundo o que estabelece a Resolução Normativa nº 158 de 23/05/2005 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [5].

A análise da superação de equipamentos inicia-se com o Relatório de Estudos de Curto-Circuito emitido anualmente pelo ONS, que consiste na avaliação, no horizonte de três anos do PAR, dos níveis de curto-circuito, identificação de barras do SEB com possíveis problemas de superação de disjuntores e evolução dos níveis de curto-circuito [6].

Adicionalmente, o ONS, em conjunto com os agentes do SEB, identifica os casos de superação de equipamentos baseado em critérios previamente estabelecidos. A lista de equipamentos superados é publicada anualmente no PAR.

---

## 2 SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

---

### 2.1 Introdução

A avaliação da superação dos disjuntores é composta por duas etapas. A primeira consiste na análise dos estudos de curto-circuito, onde são identificados os disjuntores candidatos à superação. A segunda etapa consiste na reavaliação, em mais detalhes, dos disjuntores indicados, considerando os seguintes tipos possíveis de superação:

- a. Corrente de carga;
- b. Corrente de curto-circuito simétrica;
- c. Corrente de curto-circuito assimétrica;
- d. Crista da corrente de curto-circuito;
- e. TRT (tensão de restabelecimento transitória).

O ONS realiza as análises finais e indica no PAR a superação dos disjuntores com real necessidade de substituição.

Com o intuito de identificar os fenômenos físicos relacionados à superação, o item 2.2 apresenta o sistema de interrupção de corrente pelos disjuntores, relacionando cada fase da interrupção aos tipos de superação correspondentes. Nos itens 2.3 a 2.7 cada tipo de superação é discutido separadamente. O item 2.8 discute a influência da representação do arco elétrico no cálculo da TRT. As conclusões do Capítulo são apresentadas no item 2.9.

### 2.2 Sistema de interrupção de corrente

A interrupção de corrente por disjuntores de alta tensão é caracterizada por quatro fases distintas. Cada uma delas é influenciada por um fenômeno físico predominante.



Os principais fenômenos envolvidos na interrupção são basicamente de origem térmica e dielétrica.

As quatro fases da interrupção da corrente são ilustradas na Figura 2.1, figura esta que não é um resultado de simulação, mas um desenho esquemático que caracteriza as fases de interrupção da corrente de curto-circuito.

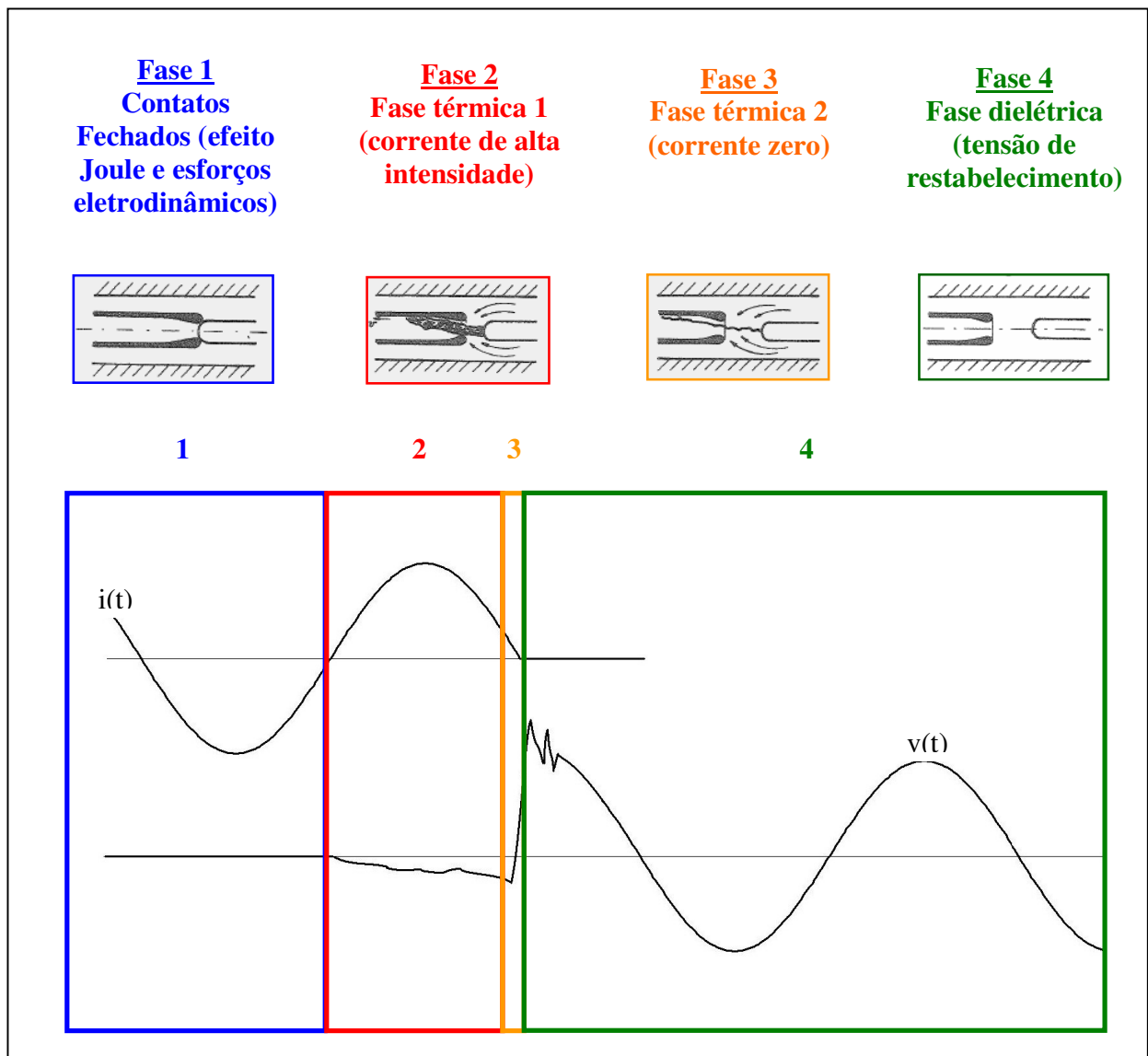


Figura 2.1 – Fases da interrupção de corrente [7]

A Figura 2.2 mostra o processo de interrupção de corrente no interior da câmara de extinção durante uma operação de abertura.

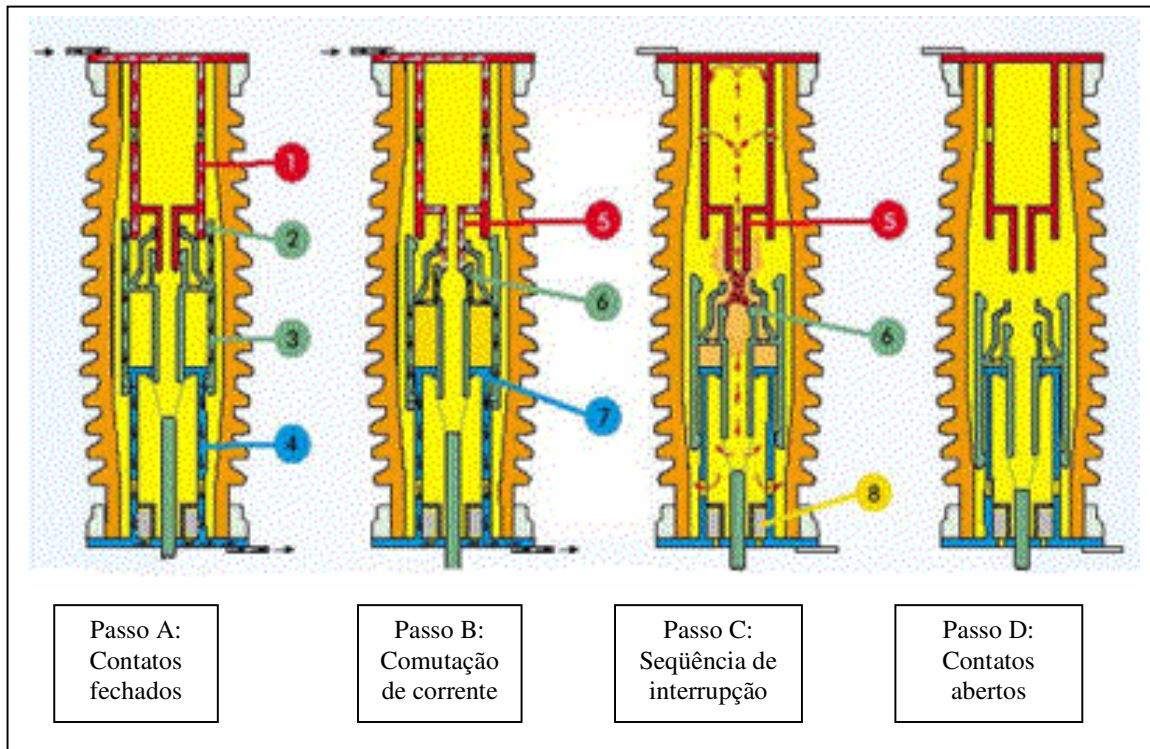


Figura 2.2 – Disjuntor em operação de interrupção de corrente **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Os quatro passos principais deste processo são:

- Passo A (correspondente à Fase 1): os contatos estão fechados, a corrente passa pelos contatos principais (1) e (2), pelo cilindro móvel (3) e pelo suporte do contato móvel (4);
- Passo B (correspondente à Fase 2): com o contato móvel já em movimento, ocorre a separação dos contatos principais (1) e (2), e a corrente é comutada para os contatos de arco (5) e (6);
- Passo C (correspondente às Fases 2 e 3): os contatos de arco (5) e (6) estão separados, provocando o surgimento de um arco elétrico entre eles que

mantém a circulação de corrente entre os terminais do disjuntor. Ao mesmo tempo, o deslocamento relativo entre o cilindro móvel (3) e o pistão (7) produz um sopro axial de gás isolante sobre o arco;

- Passo D (correspondente à Fase 4): os contatos estão em posição totalmente aberta em um caso de sucesso de interrupção de corrente.

A seguir as quatro fases da interrupção da corrente são descritas.

- Fase 1: Contatos fechados

Nesta fase, os fenômenos dominantes são: o efeito Joule e os esforços eletrodinâmicos nos contatos.

A corrente de carga que flui através dos contatos principais do disjuntor provoca o aquecimento dos mesmos devido ao efeito Joule (superação do tipo “a” – corrente de carga, conforme item 2.1).

A corrente de curto-circuito que flui através dos contatos do disjuntor causa as seguintes solicitações:

- Aquecimento dos contatos devido ao efeito Joule (superação do tipo “b” – corrente de curto-circuito simétrica);
- Centelhamento nos contatos principais devido à comutação da corrente de curto-circuito para os contatos de arco (superação do tipo “b” – corrente de curto-circuito simétrica);
- Esforços eletrodinâmicos nos contatos devido ao pico da corrente de curto-circuito (superação do tipo “d” – crista da corrente de curto-circuito).

- Fase 2: Fase térmica 1

Imediatamente após a separação mecânica dos contatos de arco do disjuntor, lembrando que o fluxo magnético nas indutâncias do circuito elétrico não pode se alterar instantaneamente, sua continuidade se mantém pelo desenvolvimento de um

arco elétrico que conduz a corrente de curto-circuito. O arco que se forma no interior das câmaras de extinção do disjuntor é submetido ao resfriamento devido à ação do meio extintor (óleo, ar comprimido ou gás hexa-fluoreto de enxofre – SF<sub>6</sub>).

Para disjuntores a sopro de gás, a extinção é obtida pelo resfriamento do arco devido ao sopro de gás na direção axial da coluna de arco<sup>1</sup>, conforme ilustrado na Figura 2.3. No caso de disjuntores a óleo, o processo de interrupção se dá principalmente pela ação do nitrogênio gerado pela decomposição térmica do óleo pelo arco.

O disjuntor é solicitado a suportar termicamente a energia dissipada através do arco elétrico de alta intensidade. Por isso, surgem no interior das câmaras de extinção altas temperaturas e pressões (superação dos tipos “b” – corrente de curto-circuito simétrica e “c” – corrente de curto-circuito assimétrica).

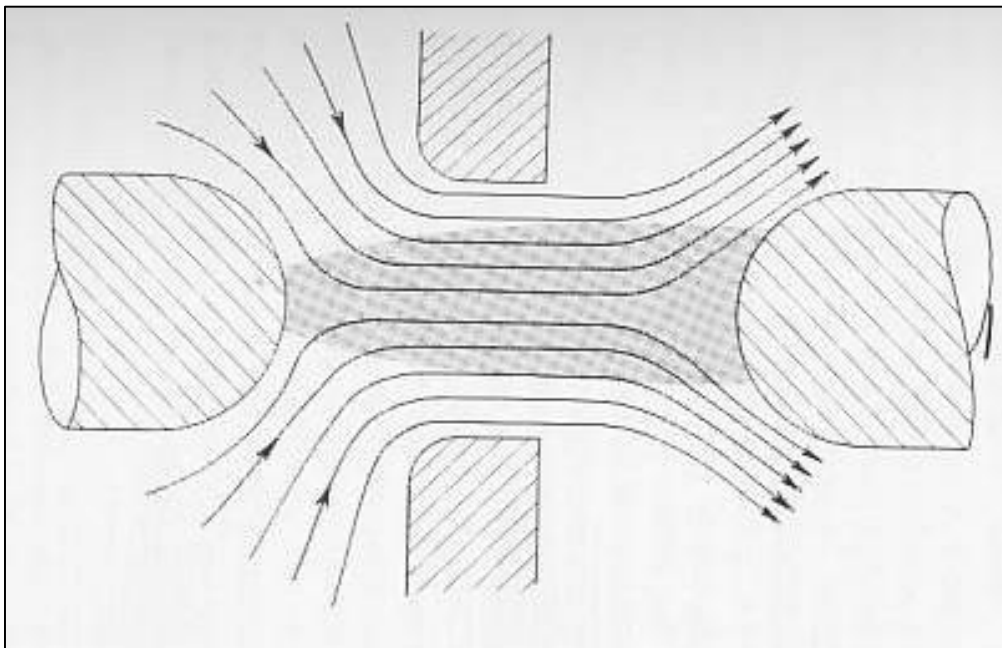


Figura 2.3 – Sopro de gás para resfriamento de arco elétrico [7]

---

<sup>1</sup> Disjuntores modernos a sopro de gás utilizam o sopro tipo axial. Disjuntores mais antigos eventualmente utilizam a tecnologia de sopro transversal.

- Fase 3: Fase térmica 2

A fase térmica 2, ou de corrente zero, é definida pelo pequeno intervalo de tempo em torno do instante de interrupção de corrente propriamente dito. A corrente de curto-circuito se aproxima de zero e flui através de um arco de baixa intensidade. As vizinhanças do zero de corrente constituem a região onde os fenômenos térmicos determinam o sucesso ou o fracasso da operação de interrupção.

Esta fase caracteriza-se por:

- Acentuado resfriamento da coluna de arco;
- Rápido crescimento da resistência de arco à medida que a corrente se aproxima de zero;
- Interrupção da corrente de curto-circuito;
- Início da TRT.

A interrupção de corrente é predominantemente dependente do balanço de energia no arco. Ou seja, caso o meio extintor retire mais energia do arco que a energia neste dissipada pela corrente de curto-circuito, a interrupção será bem sucedida. Este fenômeno é representado com razoável precisão pelo modelo de Mayr [9], cuja formulação é:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{g}{\theta} \left[ \frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Onde:

$g$  é a condutância instantânea ou dinâmica

$\theta$  é a constante de tempo térmica do arco

$u \cdot i$  representa a potência dissipada através do arco

$P_0$  é a potência retirada do arco pelo meio extintor

- Fase 4: Fase dielétrica

Durante o processo de interrupção, o arco rapidamente perde condutividade à medida que a corrente alternada instantânea se aproxima de zero. Poucos instantes após o zero de corrente, a corrente pára de circular pelo circuito.

Imediatamente após a extinção do arco elétrico, a coluna residual de arco, cuja condutância se aproxima de zero, é solicitada pela TRT imposta pela rede. Ao mesmo tempo, a capacidade dielétrica entre os contatos do disjuntor inicia sua recuperação.

Estabelece-se, assim, uma competição entre a solicitação imposta pela rede e a suportabilidade dielétrica entre os contatos do disjuntor. Caso a TRT ultrapasse a suportabilidade dielétrica entre contatos, haverá um re-acendimento do arco e a conseqüente falha do disjuntor (superação do tipo “e” – TRT).

### **2.3 Superação por corrente de carga**

A corrente de carga que flui através dos contatos do disjuntor em regime permanente provoca o seu aquecimento devido ao efeito Joule. A lei de Joule expressa a relação entre a corrente elétrica que percorre um condutor e o conseqüente calor gerado. Ela pode ser expressa por:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.2)$$

onde:

Q é o calor gerado

R é a resistência elétrica do condutor

I é o módulo da corrente elétrica que percorre o condutor

t é o tempo de exposição

A potência dissipada no disjuntor por efeito Joule é definida por:

$$P = Q/t = I^2 \cdot R_{CONTATO} \quad (2.3)$$

onde:

$R_{CONTATO}$  é a resistência elétrica entre os contatos do disjuntor

A corrente nominal dos disjuntores é especificada possibilitando ao disjuntor suportar uma determinada potência de dissipação de calor. A superação por corrente de carga é caracterizada pela ocorrência de valores de corrente superiores à corrente nominal do disjuntor, conforme definido em sua placa, para as condições de rede íntegra (condição n) e de rede alterada (condição n-1).

Na caracterização da superação por corrente de carga, através de estudos de fluxo máximo de potência, são examinadas as condições mais severas durante emergências, para configurações futuras, no horizonte do PAR, que determinem carregamentos que possam superar equipamentos terminais das linhas de transmissão.

Essa investigação também verifica os fluxos de potência em barramentos de subestações onde existam mais de um disjuntor por circuito (arranjos disjuntor e meio, anel, etc), considerando a possibilidade de saída de um elemento (linha de transmissão, transformador, etc.) e da indisponibilidade de um disjuntor para manutenção.

As Figuras 2.4 e 2.5 mostram um exemplo de uma subestação hipotética com carregamento normal e em emergência, respectivamente.

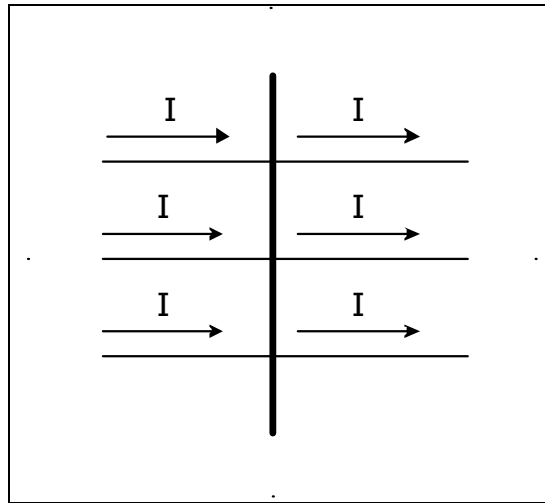


Figura 2.4 – Carregamento normal

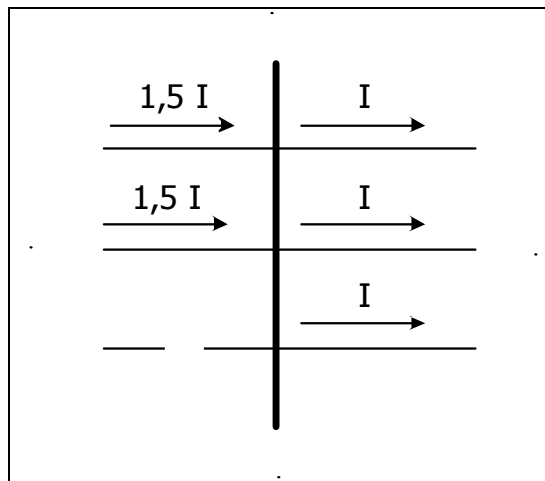


Figura 2.5 – Carregamento em emergência

Supondo que o arranjo da subestação seja do tipo “disjuntor e meio”, conforme mostrado na Figura 2.6, as Figuras 2.7 a 2.10 apresentam os fluxos nos disjuntores em quatro situações de indisponibilidade de um disjuntor por manutenção.



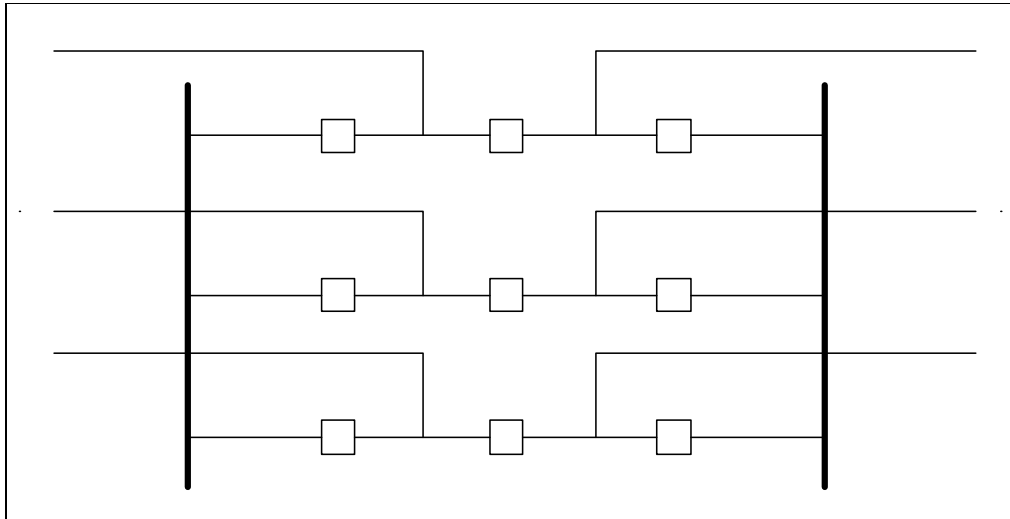


Figura 2.6 – Arranjo “disjuntor e meio”

A Figura 2.7 mostra que, com carregamento normal e a indisponibilidade de um disjuntor para manutenção, determinados disjuntores ficam submetidos a uma corrente 50% superior à corrente normal de operação.

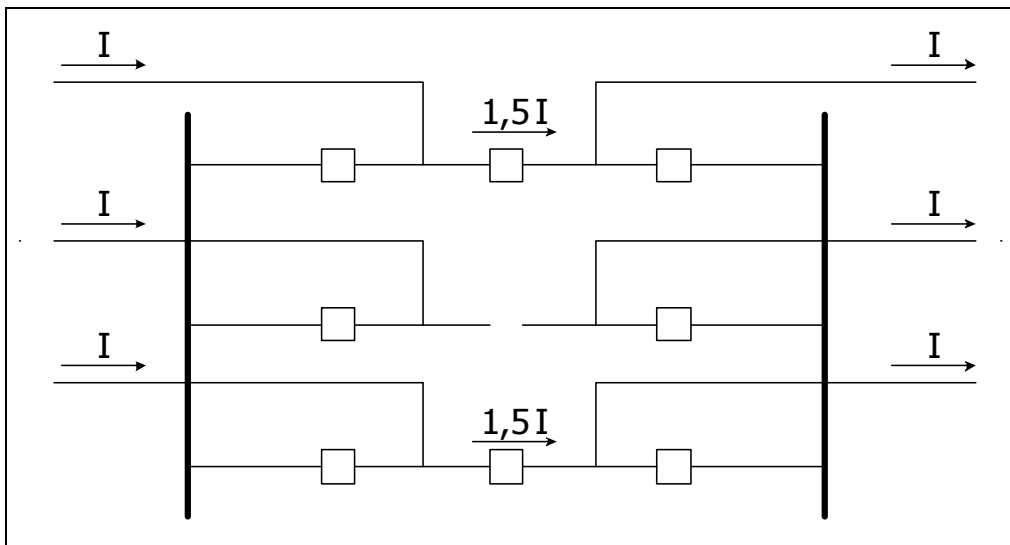


Figura 2.7 – Carregamento normal com um disjuntor em manutenção

Na Figura 2.8, a indisponibilidade de um circuito no momento em que um disjuntor está em manutenção é ilustrada. Dessa forma, dois disjuntores estão abertos, isolando o circuito indisponível, e um terceiro em manutenção. Nesse caso, determinados disjuntores ficam submetidos a uma corrente 50% superior à corrente normal de operação.

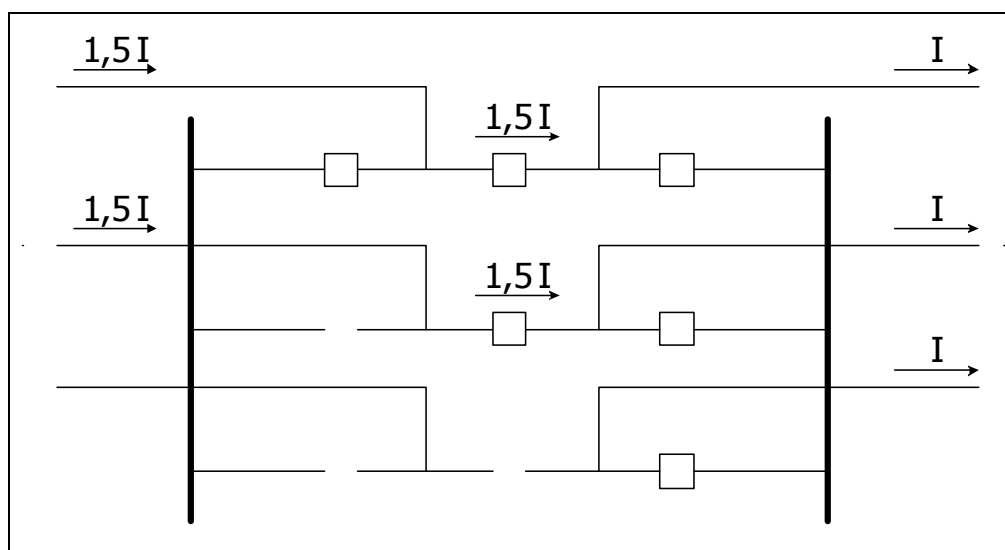


Figura 2.8 – Emergência com um disjuntor em manutenção

A Figura 2.9 ilustra um caso semelhante ao da Figura 2.8. A diferença é que o disjuntor em manutenção é outro. Nesse caso, um determinado disjuntor fica submetido a uma corrente 100% superior à corrente normal de operação.

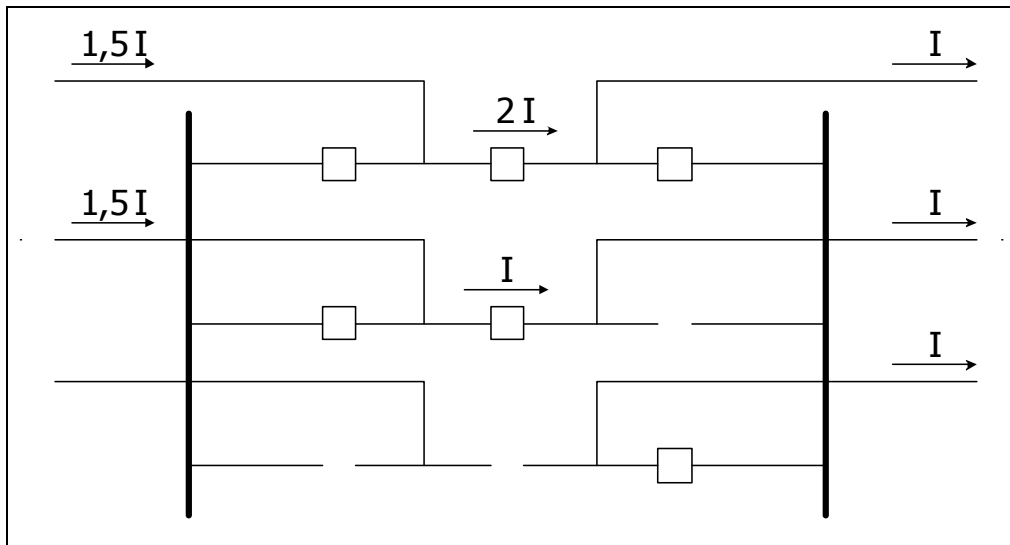


Figura 2.9 – Emergência com um disjuntor em manutenção

Na Figura 2.10, é mostrada uma situação semelhante às das Figuras 2.8 e 2.9. Mais uma vez mudou-se o disjuntor que está em manutenção. Nesse caso, um determinado disjuntor fica submetido a uma corrente 200% superior à corrente normal de operação.

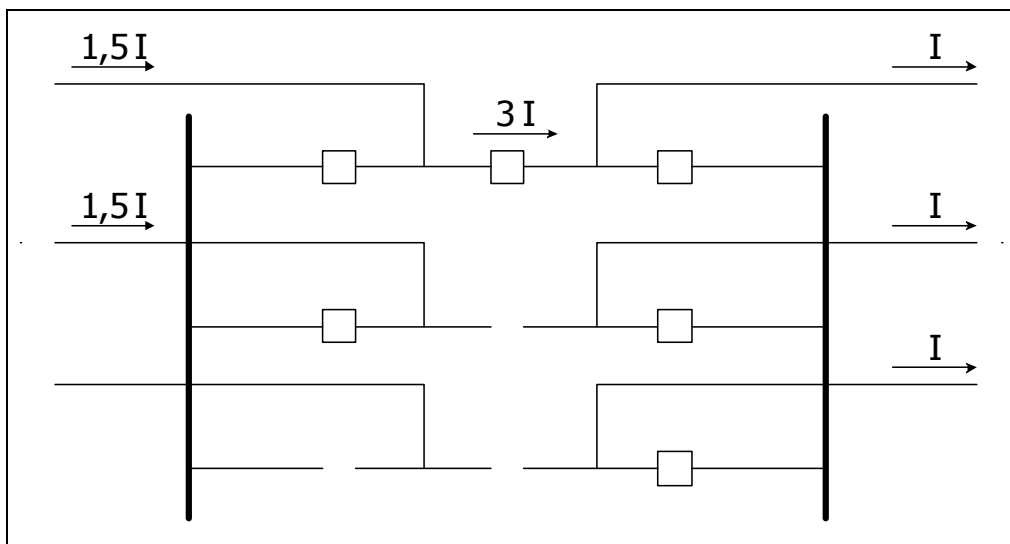


Figura 2.10 – Emergência com um disjuntor em manutenção

A investigação dos fluxos em barramentos é fundamental para a especificação dos disjuntores, bem como para a identificação da sua superação por corrente nominal. A partir deste estudo, portanto, é detectado o maior carregamento a que o equipamento terminal está submetido, que será comparado com a corrente nominal do disjuntor para verificar sua superação.

## 2.4 Superação por corrente de curto-circuito simétrica

A corrente de curto-circuito simétrica nominal dos disjuntores é especificada para que estes suportem os fenômenos descritos no item 2.2, ou seja:

- Suportar aquecimento dos contatos devido ao efeito Joule;
- Possibilitar a extinção do arco.

Desta forma, a superação por corrente de curto-circuito simétrica é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito simétricas com amplitudes superiores àquelas definidas como nominais para os disjuntores, em condições normais e de emergência.

## 2.5 Superação por corrente de curto-circuito assimétrica

### 2.5.1 Assimetria da corrente de curto-circuito

A assimetria da corrente de curto-circuito se dá nos primeiros instantes da ocorrência do mesmo. Tal fenômeno pode ser observado analisando-se a equação da corrente de curto-circuito:

$$i(t) = I_M \cdot \left\{ \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi - \theta) - \text{sen}(\theta - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} \quad (2.4)$$

onde

$$I_M = \frac{V_M}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$\tau = 1/\alpha = L/R$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \right)$$

$i(t)$  é a corrente de curto-circuito

A dedução desta equação encontra-se no Apêndice 1. A Figura 2.11 ilustra a assimetria da corrente de curto-circuito.

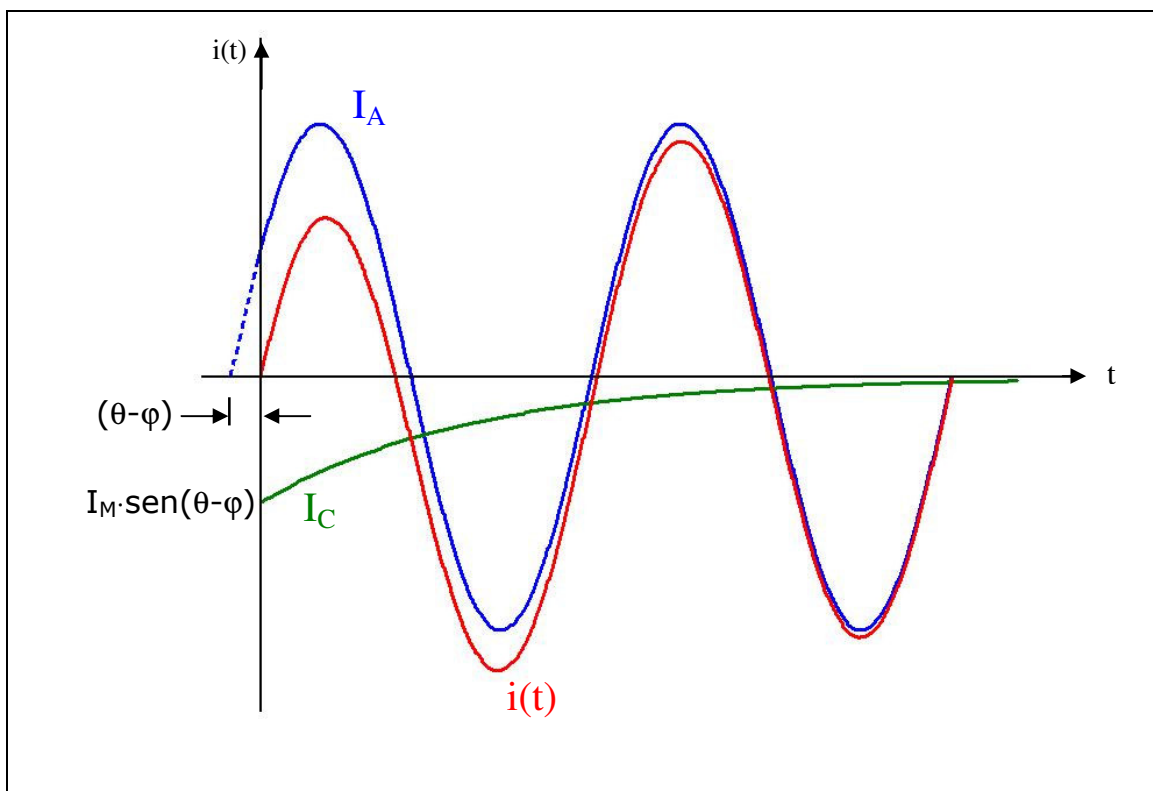


Figura 2.11 – Assimetria da corrente de curto-circuito

A componente que varia senoidalmente com o tempo é denominada componente simétrica da corrente de curto-circuito ( $I_A$ ) e a componente que varia no tempo com uma função exponencial amortecida é a componente contínua ( $I_C$ ).

O grau de assimetria da corrente de curto-circuito é função direta do instante em que o curto-circuito foi aplicado. O parâmetro  $\theta$  da equação (2.4) é utilizado para representar este instante em relação à onda de tensão da rede.

As redes de transmissão de extra alta tensão são predominantemente indutivas, o que leva a valores de  $\varphi$  muito próximos de  $90^\circ$ . Assim, pode-se dizer que a assimetria máxima da corrente de curto-circuito é atingida quando o curto se estabelece para um ângulo de fase da tensão  $\theta$  igual a zero. Isto é, a assimetria máxima ocorre quando o curto-circuito se estabelece em uma passagem por zero da tensão da rede. Esta é a pior situação para a solicitação ao disjuntor em termos de crista da corrente de curto-circuito e de energia dissipada no arco elétrico.

A equação (2.4) não é válida para curtos-circuitos próximos a unidades geradoras, visto que seu comportamento não-linear tem uma contribuição substancial na forma de onda da corrente de curto-circuito.

A assimetria da corrente de curto-circuito é muito influenciada pela constante de tempo  $\tau$  da rede no ponto. Tal parâmetro reflete o decaimento da componente contínua ( $I_C$ ) da corrente de curto-circuito, e é definido por:

$$\tau = L/R \quad (2.5)$$

As normas técnicas para disjuntores de alta tensão definem um valor padrão para a constante de tempo da componente contínua da corrente de curto-circuito [10], [11], [12]. Este valor,  $\tau = 45ms$ , cobre a grande maioria das aplicações para disjuntores de alta tensão.

Nas últimas décadas foi identificada em diversos países uma intensificação na ocorrência de constante de tempo  $\tau$  superior ao padrão [13]. Dentre os principais motivos, destacam-se:

- Expansão da malha de transmissão com conseqüente redução das perdas;
- Aumento dos níveis de tensão da transmissão em países de grandes dimensões territoriais com conseqüente redução das perdas (R) e da constante de tempo  $\tau$  das linhas de transmissão;
- Uso de disjuntores de alta tensão nas proximidades de grandes usinas, onde a assimetria da corrente de curto-circuito é influenciada pelo regime transitório do gerador, o que pode elevar a constante de tempo  $\tau$  devido ao aumento de L;
- Crescimento da malha nas redes de média tensão levando ao incremento da constante de tempo  $\tau$ ;
- Crescimento do número termelétricas localizadas nas vizinhanças de grandes centros de carga, ocasionando não só um aumento substancial dos níveis de curto-circuito, como também uma elevação expressiva da constante de tempo. Esta é a situação identificada para a área Rio e São Paulo por estudo realizado recentemente pelo ONS [14].

O levantamento internacional realizado pelo CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) [13] sobre este tema levou a mudanças expressivas na norma internacional de disjuntores de alta tensão – IEC 62271-100 – que em sua última revisão [10], incluiu diretrizes para ensaios de interrupção de corrente de curto-circuito assimétrica para constantes de tempo superiores ao valor padrão. A partir de então, foram também especificados os requisitos para ensaios com 60, 75 e 120 ms.

As Figuras 2.12 a 2.15 mostram as formas de onda das correntes de curto-circuito para as constantes de tempo adotadas na IEC: 45, 60, 75 e 120 ms, respectivamente.

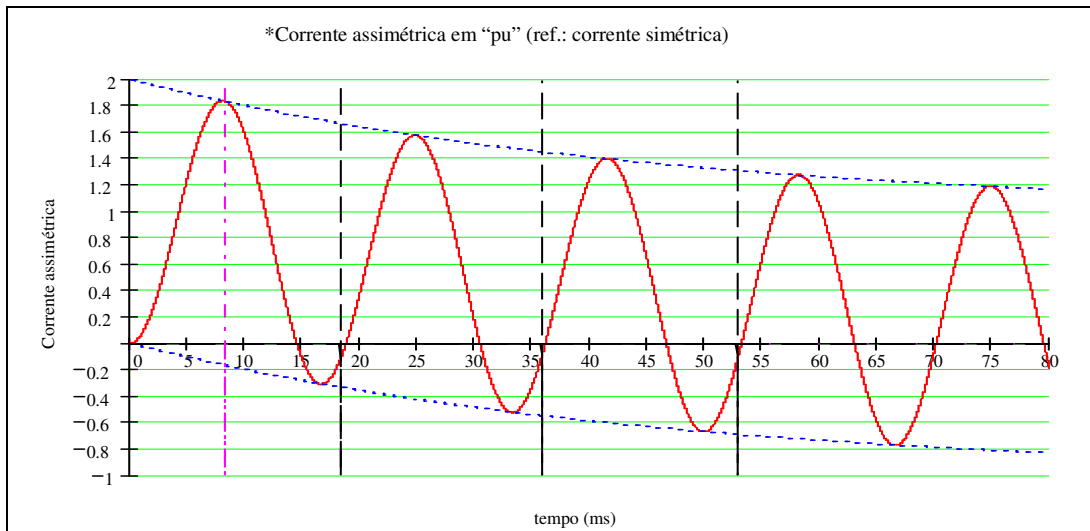


Figura 2.12 – Corrente de curto-circuito para  $\tau = 45$  ms

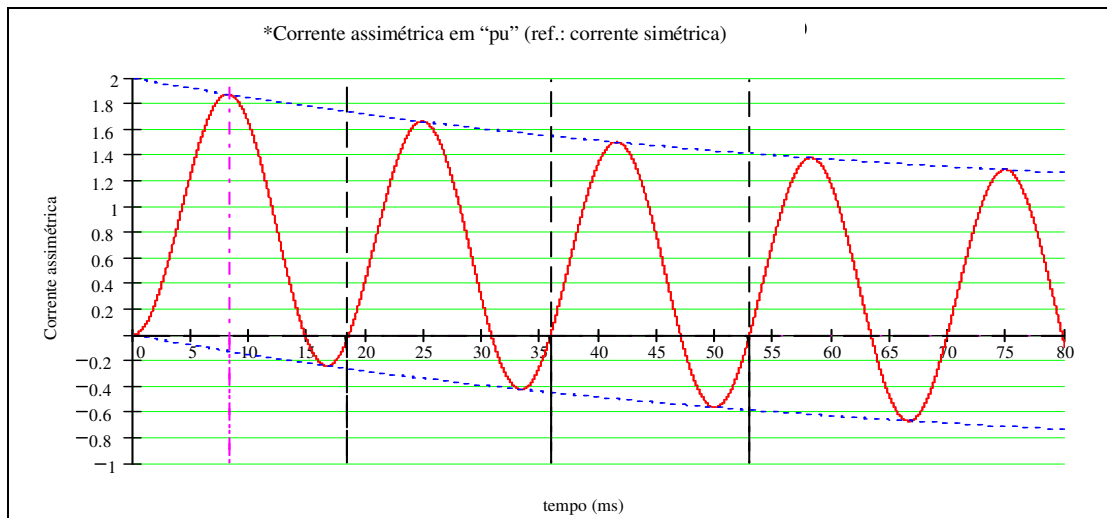


Figura 2.13 – Corrente de curto-circuito para  $\tau = 60$  ms



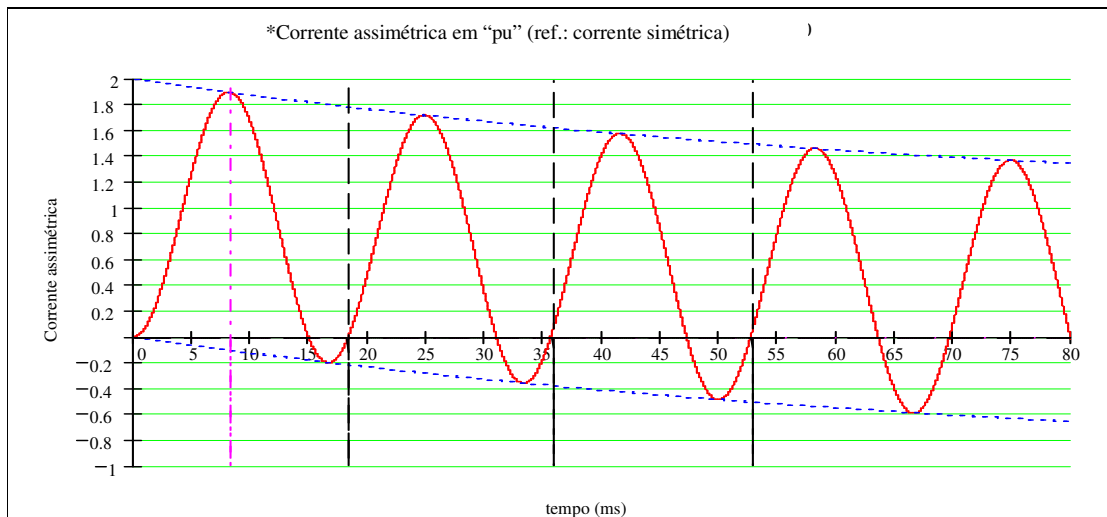


Figura 2.14 – Corrente de curto-circuito para  $\tau = 75$  ms

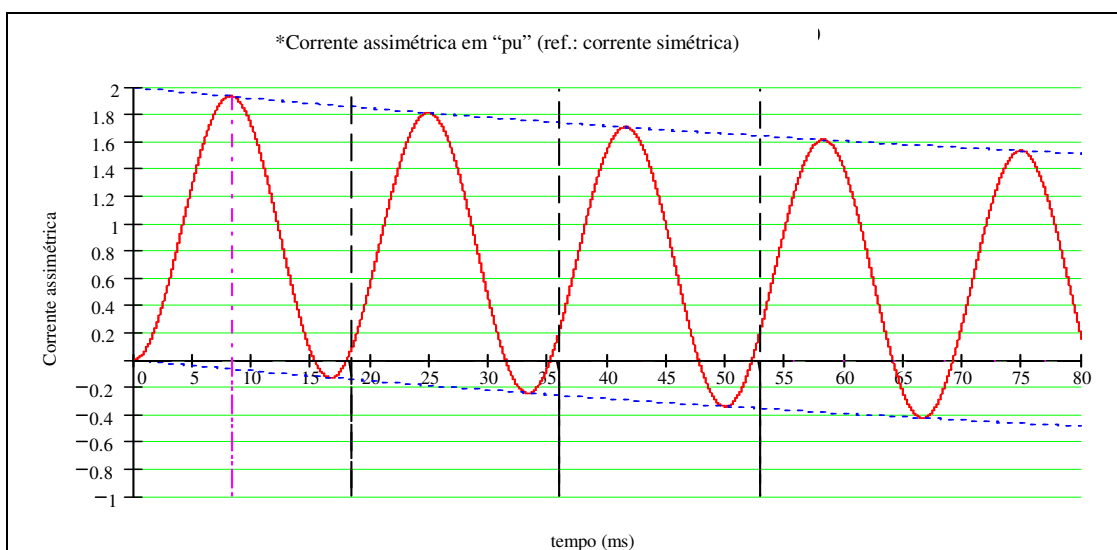


Figura 2.15 – Corrente de curto-circuito para  $\tau = 120$  ms

## 2.5.2 Solicitações físicas da corrente assimétrica que afetam o desempenho do disjuntor

As principais condições de interrupção correlacionadas com o desempenho de disjuntores de alta tensão na manobra de corrente de curto-circuito assimétrica são a interrupção após um “minor loop” de corrente e a interrupção após um “major loop” de corrente.

A IEC define como “major loop” os semiciclos aumentados que ocorrem após o tempo de separação dos contatos do disjuntor. “Minor loop” é definido como os semiciclos imediatamente anteriores aos “major loop”. Tais solicitações são tratadas nos subitens seguintes.

### **2.5.2.1 Solicitações dielétricas**

O fator decisivo para o sucesso da interrupção na sua fase dielétrica é a capacidade do disjuntor em suportar a TRT entre os contatos, após a interrupção da corrente. Em vista deste fato, a TRT nas duas principais condições de interrupção de corrente assimétrica é analisada neste item.

As Figuras 2.16 e 2.17 mostram exemplos da interrupção de corrente de curto-circuito assimétrica após um “minor loop” e um “major loop”, respectivamente. Esses gráficos foram obtidos com a simulação de um circuito teórico que representa a rede de forma bastante simplificada, como se pode observar na Figura 2.18. É possível notar nas Figuras 2.16 e 2.17 que a oscilação da TRT ocorre em torno de um valor instantâneo da tensão da fonte inferior à crista.

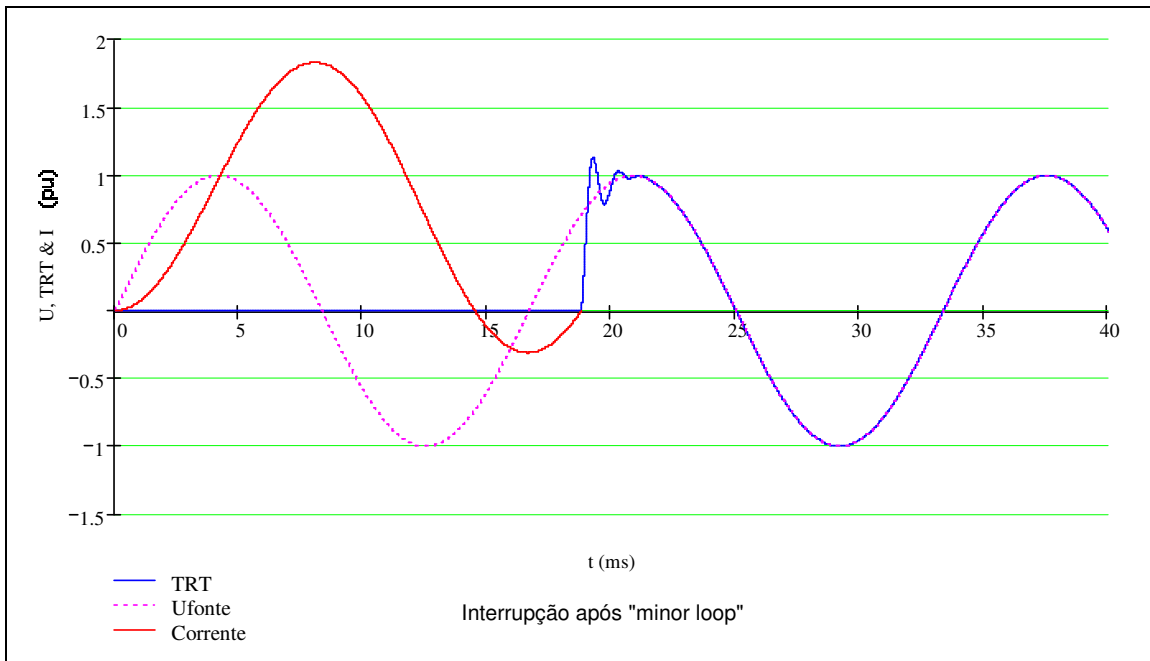


Figura 2.16 – Interrupção de corrente assimétrica após um “minor loop”

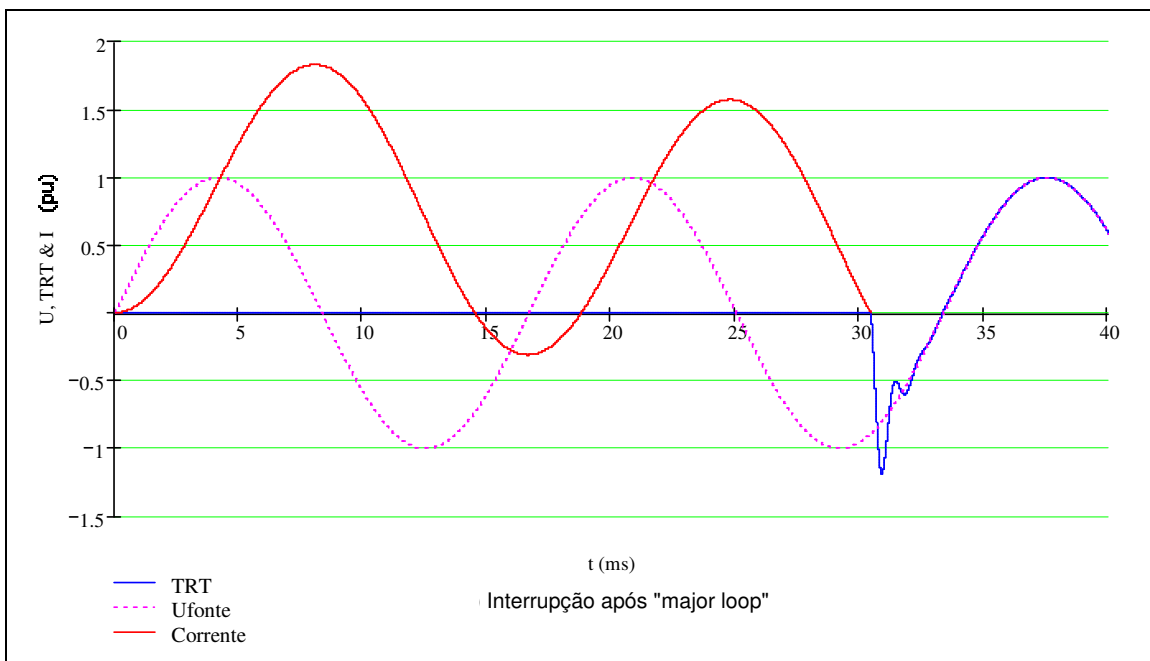


Figura 2.17 – Interrupção de corrente assimétrica após um “major loop”

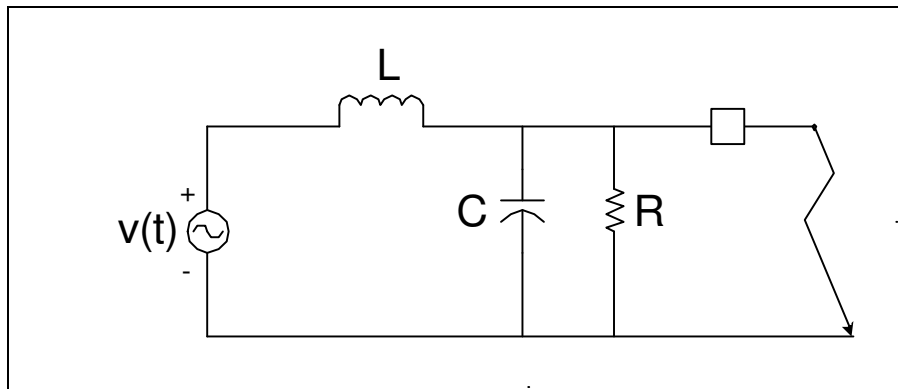


Figura 2.18 – Circuito teórico simplificado

Para o caso de interrupção de corrente simétrica, como a defasagem entre a tensão e a corrente é de aproximadamente  $90^\circ$  nos sistemas elétricos de alta tensão, a interrupção ocorre em um instante muito próximo do máximo de tensão (crista). Isso leva à maximização da TRT.

Isto caracteriza uma severidade para a solicitação de TRT nos casos de interrupção de corrente de curto-circuito simétrica superior às solicitações provocadas pela interrupção de corrente de curto-circuito assimétrica. Portanto, é conservativo não considerar o estudo de TRT para interrupção de correntes de curto-circuito assimétricas. A Figura 2.19 mostra o caso de solicitação de TRT devido à interrupção de uma corrente de curto-circuito simétrica.

Este tópico foi estudado pelo grupo de trabalho WG 13.04 da CIGRÉ [15] visando estabelecer os requisitos de ensaio para disjuntores de tensões de transmissão. A Figura 2.20 apresenta a influência da assimetria na envoltória da TRT, conforme norma IEC de disjuntores de alta tensão [10].

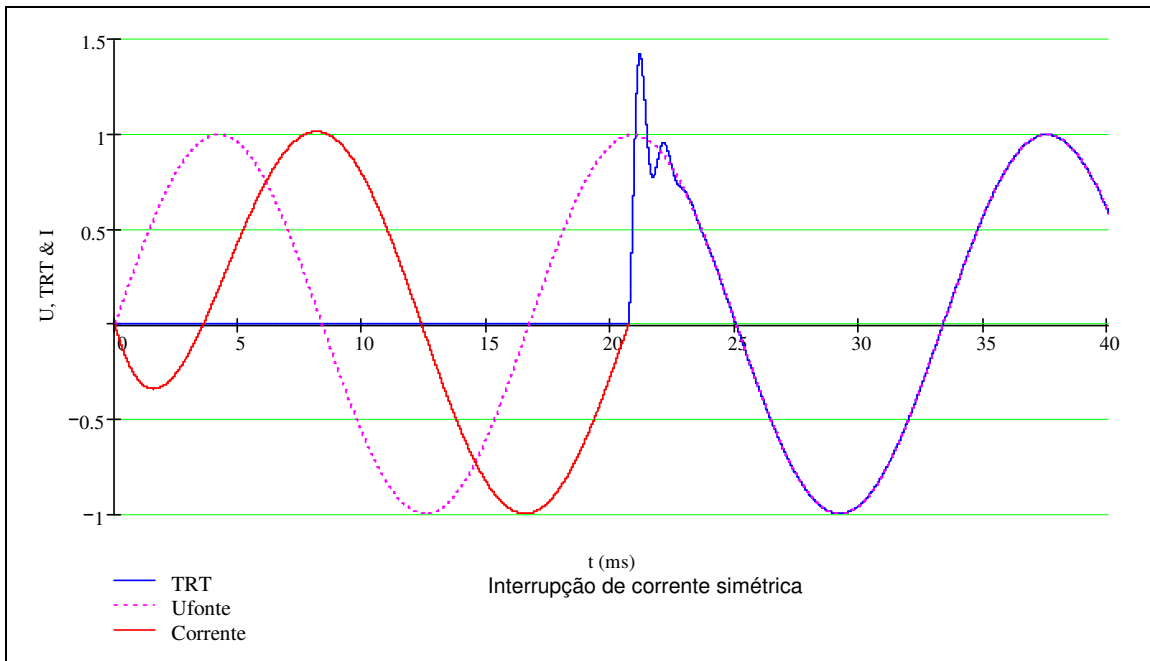


Figura 2.19 – Interrupção de corrente simétrica

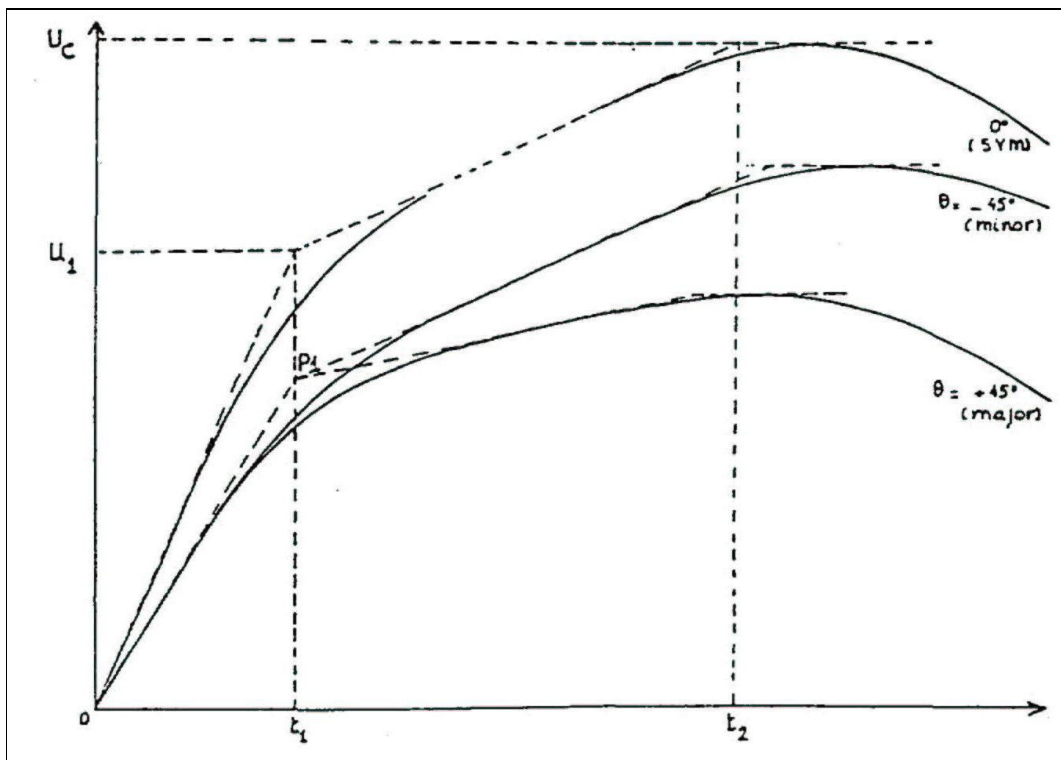


Figura 2.20 – Influência da assimetria da corrente de curto na envoltória da TRT [10]

A curva superior da Figura 2.20 representa a envoltória da TRT de um disjuntor que interrompe uma corrente simétrica, definindo o ponto de interrupção simétrica como  $\theta = 0$ . As curvas inferiores mostram as envoltórias da TRT para interrupção de correntes assimétricas. Os pontos de abertura  $\theta = -45^\circ$  e  $\theta = +45^\circ$  representam a interrupção após um “minor loop” e um “major loop”, respectivamente.

Nota-se que a crista e a taxa de crescimento da TRT diminuem quando há assimetria da corrente de curto-circuito. Pode-se intuir que quanto maior for a assimetria, menores serão a crista e a taxa supracitadas.

### 2.5.2.2 Solicitações térmicas

A interrupção de corrente assimétrica após um “minor loop” é caracterizada por um baixo valor de crista do último semiciclo da corrente que circula através do arco. Como consequência, nessa situação a solicitação térmica provocada pela dissipação de energia no arco não é o parâmetro dominante do processo de interrupção.

A interrupção após um “major loop” de corrente de curto-circuito assimétrica é uma das condições de manobra mais críticas para o disjuntor, devido às solicitações térmicas impostas ao mesmo pela energia dissipada no arco. A Figura 2.17 mostra um exemplo de interrupção de corrente de curto-circuito assimétrica após um “major loop”.

A energia dissipada na interrupção de corrente, chamada energia de arco, pode ser obtida pela relação:

$$E_{arco} = \int_{t_{SEP}}^{t_i} R_{arco} \cdot i^2(t) dt \quad (2.6)$$

Onde:

$i(t)$  é a corrente de curto-circuito definida na equação 2.4

$R_{arco}$  é a resistência do arco elétrico

$t_{SEP}$  é o instante de separação dos contatos

$t_i$  é o instante de interrupção

O alto valor da energia de arco dissipada na interrupção após um “major loop” de corrente provoca solicitações críticas ao disjuntor, tais como:

- Elevada pressão do meio extintor no interior da câmara de interrupção e consequentes esforços mecânicos dela decorrentes;
- O alto valor de crista da corrente no “major loop” provoca uma elevada solicitação eletrodinâmica ao disjuntor com os contatos em movimento;

- Elevada deterioração do meio isolante e conseqüente perda da sua suportabilidade dielétrica. Como conseqüência, a característica de tensão suportável entre os contatos do disjuntor em função da distância entre os mesmos sofre deterioração acentuada. Entretanto, nesta condição de interrupção, o tempo de arco é relativamente longo (próximo ao tempo máximo de arco) e portanto a distância entre contatos é relativamente grande no momento da interrupção;
- A elevada deterioração do meio isolante, que pode estar contaminada por partículas e gases metálicos, pode também levar a uma condição crítica da fase térmica da interrupção da corrente.

Em suma, a energia de arco e o pico da corrente na situação de interrupção após um “major loop” são as principais medidas da severidade das solicitações impostas ao disjuntor na interrupção de uma corrente assimétrica. Esses fenômenos físicos podem ser representados pelo valor da constante de tempo da rede.

Desta forma, a solicitação do disjuntor no momento da ocorrência de um curto-circuito assimétrico depende da constante de tempo da rede  $\tau$ , que é portanto determinante no dimensionamento dos disjuntores e é considerada nas análises de superação de equipamentos.

A superação por corrente assimétrica é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito assimétricas com amplitudes superiores àquelas definidas como nominais para os disjuntores, em condições normais e de emergência. Esse tipo de superação depende, portanto, da componente simétrica da corrente de curto circuito e da constante de tempo da rede no ponto de conexão do disjuntor.

Carvalho *et al.* [16] desenvolvem um equacionamento entre a amplitude da corrente simétrica e a constante de tempo da rede, definindo fatores de redução da capacidade de interrupção simétrica do disjuntor em função do aumento da constante de tempo. Estes fatores, mostrados na Tabela 2.1, são de grande aplicação prática, pois permitem verificar, numa situação de rede com altas constantes de tempo e relativamente reduzida amplitude da corrente de curto-circuito simétrica, se o disjuntor



é apto a interrompê-la, mesmo que a constante de tempo nominal do disjuntor seja inferior à imposta pela rede.

Tabela 2.1 – Fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito em função da constante de tempo (60Hz) [16]

$\tau$ (ms)	$t_{op}$ - tempo de abertura do disjuntor (ms)		
	$0 < t_{op} \leq 10$	$10 < t_{op} \leq 27,5$	$27,5 < t_{op} \leq 44,5$
45	1,000	1,000	1,000
60	0,896	0,881	0,883
75	0,847	0,820	0,818
120	0,767	0,722	0,708

## 2.6 Superação por crista da corrente de curto-circuito

Nos primeiros instantes do estabelecimento da corrente de curto-circuito, as elevadas correntes circulantes nos equipamentos produzem consideráveis solicitações mecânicas proporcionais ao quadrado da corrente instantânea [17], conforme equação abaixo [18]:

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_p^2 \cdot \frac{l}{a} \quad (2.7)$$

onde:

- $F_m$  é a força transversal atuante no equipamento
- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do meio (ar)
- $i_p$  é o valor de pico da corrente instantânea de curto-circuito
- $l$  é o comprimento do equipamento
- $a$  é a distância entre fases

A primeira (e maior) crista da corrente instantânea de curto-circuito é usada para o dimensionamento dos disjuntores no que diz respeito aos esforços eletrodinâmicos provocados durante o estabelecimento do curto-circuito.

A superação por crista da corrente de curto-circuito caracteriza-se pela ultrapassagem do seu valor de projeto.

A equação (2.4) mostra que a corrente instantânea de curto-circuito depende da sua magnitude e da constante de tempo da rede no ponto em que o disjuntor está instalado. Observando esta equação pode-se concluir que a força atuante no disjuntor, que é diretamente proporcional ao quadrado da corrente instantânea, é também diretamente proporcional ao quadrado do módulo da corrente de curto-circuito.

Para ilustrar a influência da constante de tempo da rede na superação por crista da corrente de curto-circuito, calculou-se o pico da corrente de curto-circuito instantânea a partir da equação (2.4), chegando a:

$$I_p = I_M \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-t_p / \tau}) \quad (2.8)$$

Onde:

$I_p$  é o valor de crista da corrente de curto-circuito calculada

$t_p$  é o tempo de crista da corrente de curto-circuito (8,33 ms para 60 Hz)

A Figura 2.21 mostra o gráfico que representa a variação da força atuante no disjuntor com a constante de tempo da rede. Sabendo que os disjuntores típicos são normalmente projetados para interromper corrente de curto-circuito com constante de tempo igual a 45 ms, calculamos o valor da força atuante para outros valores de constante de tempo considerando o valor para 45 ms como referência. Ou seja, o eixo

y do gráfico representa a relação  $\frac{\text{força atuante}}{\text{força atuante para } \tau = 45\text{ms}}$ .

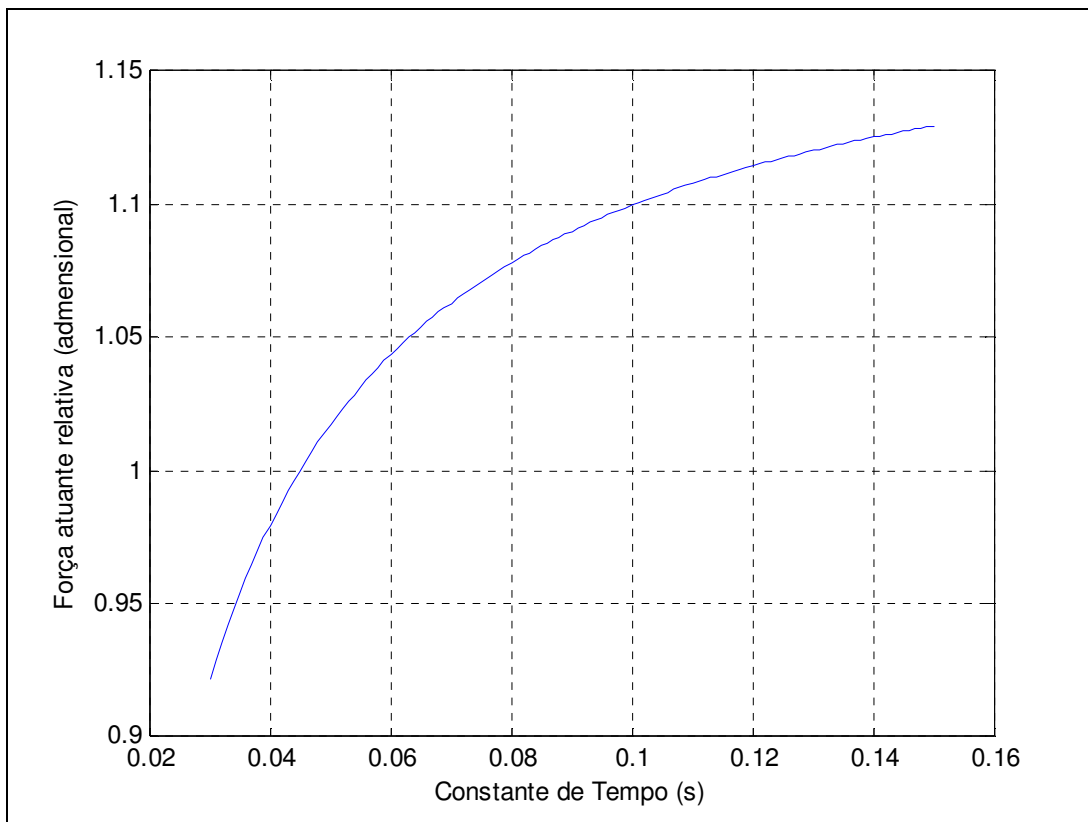


Figura 2.21 – Força atuante em disjuntores em relação à constante de tempo

Dessa forma, pode-se concluir que a variação da constante de tempo da rede pode provocar aumentos de mais de 10% na força eletrodinâmica que atuam sobre os disjuntores durante o estabelecimento do curto-circuito.

## 2.7 Superação por TRT

A superação por TRT é caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade dielétrica ou térmica do meio de extinção do arco elétrico. O disjuntor pode ser considerado superado por amplitude ou por taxa de crescimento da TRT.

Para verificar a superação por TRT, o procedimento mais adotado consiste em comparar em um mesmo gráfico o oscilograma da TRT propriamente dita com a envoltória prevista nas normas IEC 62271-100 [10] e NBR 7118 [11] ou especificada pelo fabricante. O disjuntor é considerado superado por TRT quando o oscilograma ultrapassa a envoltória em algum ponto.

A expansão do sistema elétrico acarreta, geralmente, maior distorção e amortecimento das ondas refletidas das solicitações transitórias provocadas por manobras, resultando, em princípio, em solicitações menos severas para os equipamentos e instalações. Por outro lado, a conseqüente elevação dos níveis de curto-circuito acarreta aumento da severidade da TRT dos disjuntores.

Portanto, o valor da crista da TRT, bem como a TCTRT (Taxa de Crescimento da TRT), são grandezas que devem ser investigadas em decorrência da expansão da rede elétrica, pois podem caracterizar a superação das características nominais de disjuntores.

Nas normas citadas, a envoltória a dois parâmetros é utilizada para avaliar disjuntores de tensão nominal até 100 kV, ao passo que a envoltória a quatro parâmetros é aplicada aos disjuntores de tensão nominal superior a 100 kV. As Figuras 2.22 e 2.23 mostram exemplos de envoltórias a dois e a quatro parâmetros.

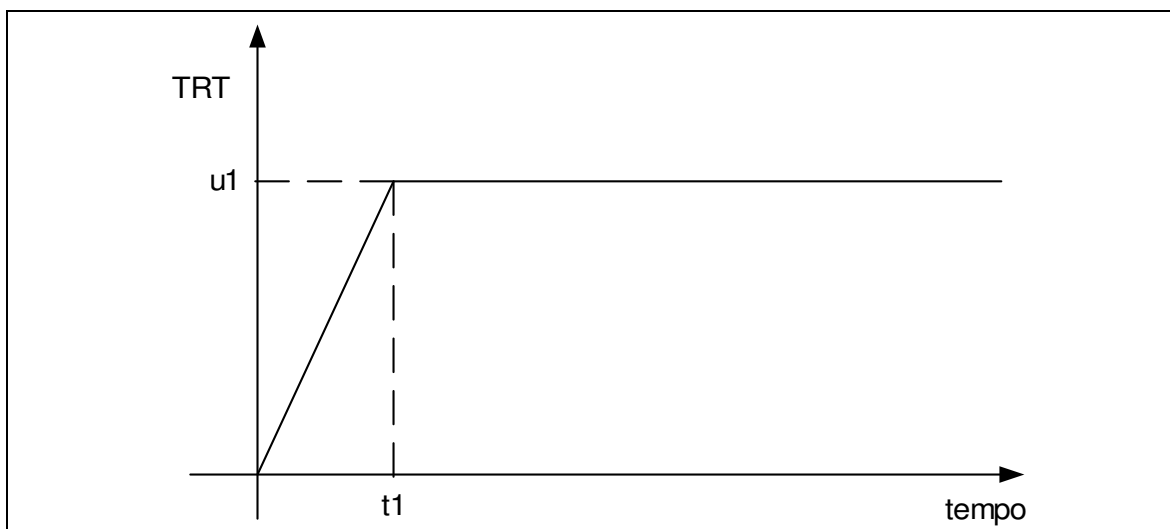


Figura 2.22 – Envoltória a dois parâmetros

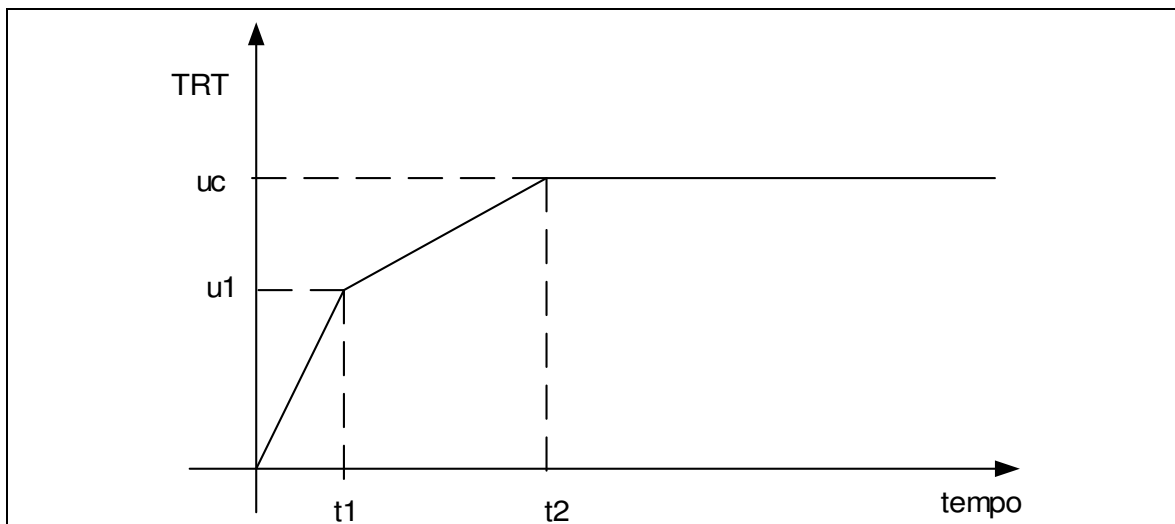


Figura 2.23 – Envoltória a quatro parâmetros

As envoltórias são obtidas de acordo com a tensão nominal do disjuntor, o tipo de falta, o fator de primeiro pólo e o fator de amplitude. As Tabelas 2.2 e 2.3 [10] mostram como obter-se a envoltória de TRT para disjuntores com tensão de 100 a 170 kV e igual ou superior a 245 kV, respectivamente.

As Figuras 2.24 e 2.25 mostram exemplos de comparações de TRT verificada com a envoltória de TRT especificada para um disjuntor. Na Figura 2.24, observa-se que o disjuntor não está superado por TRT, ao passo que na Figura 2.25 ocorre a superação.

Tabela 2.3 – Envoltória de TRT – Tensão nominal entre 100 e 170 kV – Representação por dois parâmetros – 62271-100 IEC 2001 [10]

Tensão Nominal $U_r$ (kV)	Tipo da interrupção	Fator de primeiro polo $k_{pp}$ (p.u.)	Fator de amplitude $k_{af}$ (p.u.)	Primeira tensão de referência $u_1$ (kV)	Tempo $t_1$ (÷s)	Valor de pico da TRT $u_c$ (kV)	Tempo $t_2$ (÷s)	Tempo de retardo $t_d$ (÷s)	Tensão $u'$ (kV)	Tempo $t'$ (÷s)	TCTR <sup>b **</sup> $u_1 / t_1$ (kV/÷s)
100	Falta terminal	1,3	1,4	106	53	149	159	2	53	29	2
		1,5	1,4	122	61	171	183	2	61	33	2
	Falta quilométrica	1	1,4	82	41	114	123	2	41	22	2
Discordância de fases		2	1,25	163	106	204	318	20	82	73	1,54
		2,5	1,25	204	122	255	366	23	102	84	1,67
123	Falta terminal	1,3	1,4	131	65	183	196	2	65	35	2
		1,5	1,4	151	75	211	225	2	75	40	2
	Falta quilométrica	1	1,4	100	50	141	150	2	50	27	2
Discordância de fases		2	1,25	201	130	251	393	24	100	89	1,54
		2,5	1,25	251	150	314	450	28	126	103	1,67
145	Falta terminal	1,3	1,4	154	77	215	231	2	77	40	2
		1,5	1,4	178	89	249	267	2	89	46	2
	Falta quilométrica	1	1,4	118	59	166	177	2	59	32	2
Discordância de fases		2	1,25	237	154	296	462	29	118	106	1,54
		2,5	1,25	296	177	370	531	33	148	122	1,67
170	Falta terminal	1,3	1,4	180	90	253	270	2	90	47	2
		1,5	1,4	208	104	291	312	2	104	54	2
	Falta quilométrica	1	1,4	139	69	194	207	2	69	37	2
Discordância de fases		2	1,25	278	180	347	543	34	139	124	1,54
		2,5	1,25	347	208	434	624	39	174	143	1,67

<sup>a</sup> \* No caso de faltas quilométricas: tensão de restabelecimento transitória e tempos do lado fonte  
<sup>b</sup> \*\* TCTR = Taxa de crescimento da tensão de restabelecimento

Tabela 2.4 – Envoltória de TRT – Tensão nominal igual ou maior que 245 kV –  
Representação por quatro parâmetros – 62271-100 IEC 2001 [10]

Tensão Nominal $U_r$ (kV)	Tipo da interrupção	Fator de primeiro polo $k_{pp}$ (p.u.)	Fator de amplitude $k_{af}$ (p.u.)	Primeira tensão de referência $u_1$ (kV)	Tempo $t_1$ ( $\mu$ s)	Valor de pico da TRT $u_c$ (kV)	Tempo $t_2$ ( $\mu$ s)	Tempo de retardo $t_d$ ( $\mu$ s)	Tensão $u'$ (kV)	Tempo $t'$ ( $\mu$ s)	TCTR <sup>b**</sup> $u_1/t_1$ (kV/ $\mu$ s)
245	Falta terminal	1,3	1,4	260	130	364	390	2	130	67	2
	Falta quilométrica	1	1,4	200	100	280	300	2	100	52	2
	Discordância de fases	2	1,25	400	260	500	780	49	200	179	1,54
300	Falta terminal	1,3	1,4	318	159	446	477	2	159	82	2
	Falta quilométrica	1	1,4	245	122	343	366	2	122	63	2
	Discordância de fases	2	1,25	490	318	612	954	60	245	219	1,54
362	Falta terminal	1,3	1,4	384	192	538	576	2	192	98	2
	Falta quilométrica	1	1,4	296	148	414	444	2	148	76	2
	Discordância de fases	2	1,25	591	384	739	1152	72	296	264	1,54
420	Falta terminal	1,3	1,4	446	223	624	669	2	223	113	2
	Falta quilométrica	1	1,4	343	171	480	513	2	171	88	2
	Discordância de fases	2	1,25	686	445	857	1335	83	343	306	1,54
550	Falta terminal	1,3	1,4	584	292	817	876	2	292	148	2
	Falta quilométrica	1	1,4	449	225	629	672	2	225	114	2
	Discordância de fases	2	1,25	898	583	1123	1749	109	449	401	1,54
800	Falta terminal	1,3	1,4	849	425	1189	1272	2	425	214	2
	Falta quilométrica	1	1,4	653	327	914	979	2	327	165	2
	Discordância de fases	2	1,25	1306	848	1633	2544	159	653	583	1,54

<sup>a</sup>\* No caso de faltas quilométricas: tensão de restabelecimento transitória e tempos do lado fonte  
<sup>b</sup>\*\* TCTR = Taxa de crescimento da tensão de restabelecimento

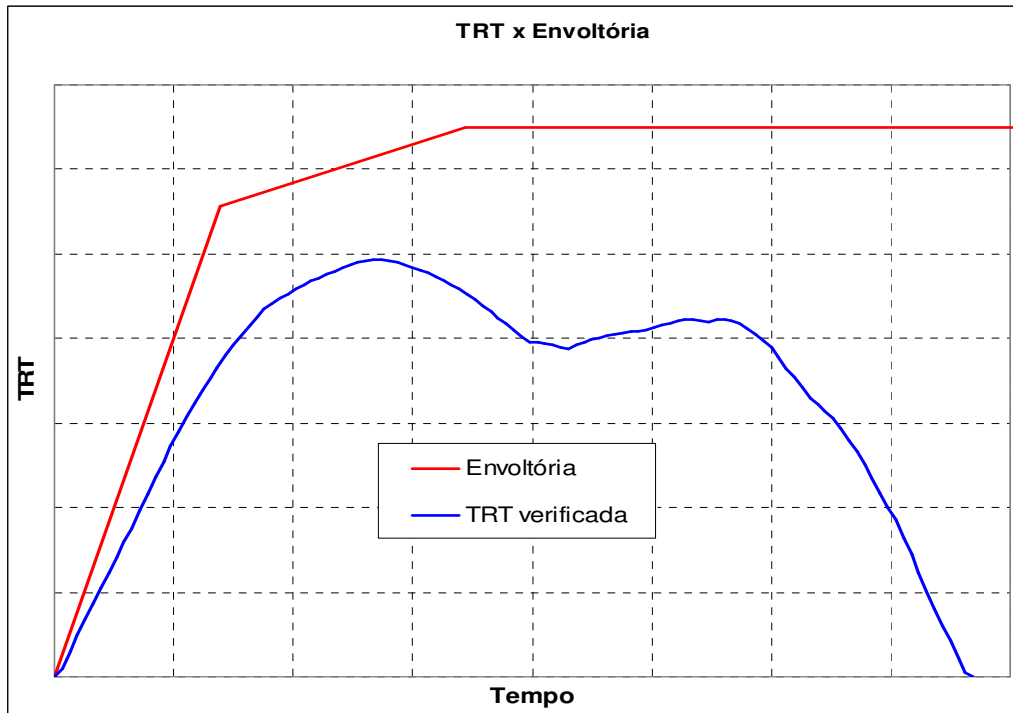


Figura 2.24 – Exemplo de disjuntor não superado por TRT

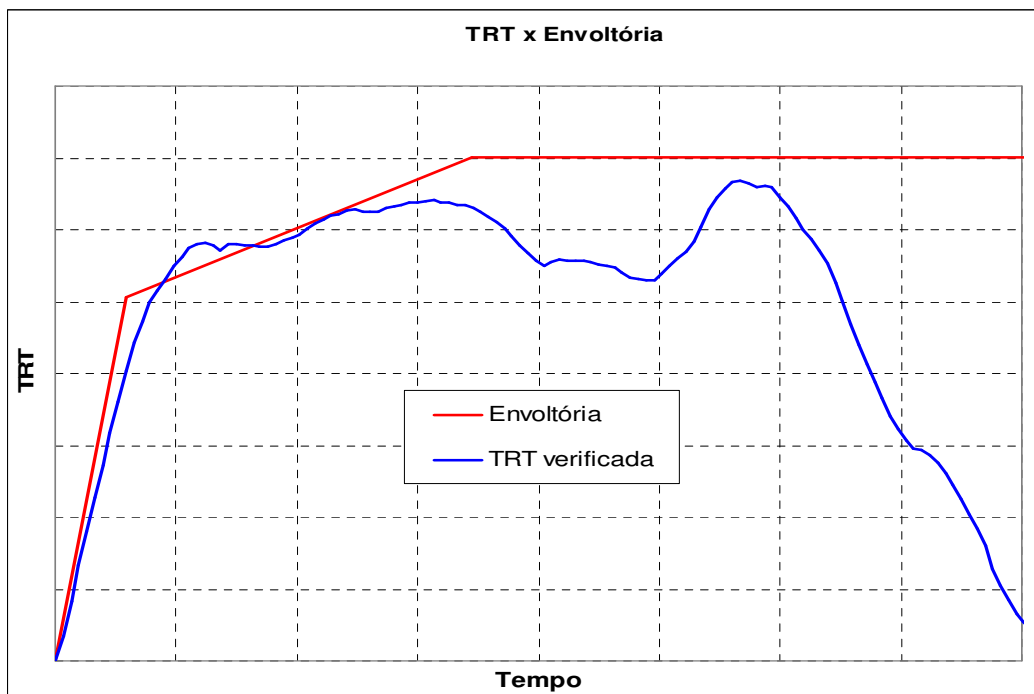


Figura 2.25 – Exemplo de disjuntor superado por TRT



O cálculo da TRT é trabalhoso e requer tempo para sua execução, sendo realizado através de programas para simulações de transitórios eletromagnéticos. Tais programas fornecem a resposta da rede para as diversas frequências que envolvem o fenômeno e onde as dificuldades de modelagem e o nível de detalhamento de representação dos elementos passivos têm influência nos resultados finais.

## **2.8 Influência da representação do arco elétrico no cálculo da TRT**

Como discutido no item 2.2, um arco elétrico se desenvolve entre os contatos do disjuntor imediatamente após o início da sua separação mecânica. Embora seja um arco de elevada condutância, oferece uma pequena resistência à passagem da corrente de curto-circuito, o que poderia influenciar na TRT.

Em [19], Hermann & Ragaller mostram que a representação do arco elétrico no cálculo da TRT influencia no sentido de reduzir o seu pico. Portanto, em primeira análise, é conservativo deixar de considerar a modelagem do arco neste cálculo.

Valores típicos para a tensão de arco de disjuntores são da ordem de 1 a 2 kV [19], valores estes pequenos quando comparados com a tensão dos sistemas de transmissão. Dessa forma, além de atuar no sentido de reduzir a TRT, a representação do arco não tem uma influência significativa no cálculo do seu pico, que é da ordem de centenas de kV.

Para verificar na prática a influência pequena e conservativa da representação do arco elétrico no cálculo da TRT de disjuntores, fez-se uma simulação em ATP. Utilizou-se o modelo de Mustafa Kizilkay, da Universidade de Hannover, que emborra represente o comportamento dinâmico arco de forma aproximada, é suficiente para o tipo de análise em questão.

Segundo Prikler, Kizilkay et. al. [20], o arco pode ser representado no ATP por uma resistência controlada Tipo-91. Modelos de arco são baseados na equação diferencial da condutância do arco, que descreve o balanço de energia da coluna de arco:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\lambda}(G - g) \quad (2.9)$$

onde:

$\lambda$  é a constante de tempo do arco

$g$  é a condutância instantânea do arco

$G$  é a condutância estacionária do arco

Resolvendo a equação diferencial (2.9), a condutância instantânea em função do tempo pode ser obtida como:

$$g(t) = \frac{1}{1 + \lambda \cdot s} \cdot G(t) \quad (2.10)$$

A Figura 2.27 mostra a comparação entre as curvas de TRT obtidas nas simulações com o ATP considerando ou não a modelagem de arco. Nota-se que a diferença entre elas é quase imperceptível. Para realizar essa comparação, foi escolhido o disjuntor 1 do subsistema representado na Figura 2.26. Os dados desse subsistema são mostrados no Apêndice 2.

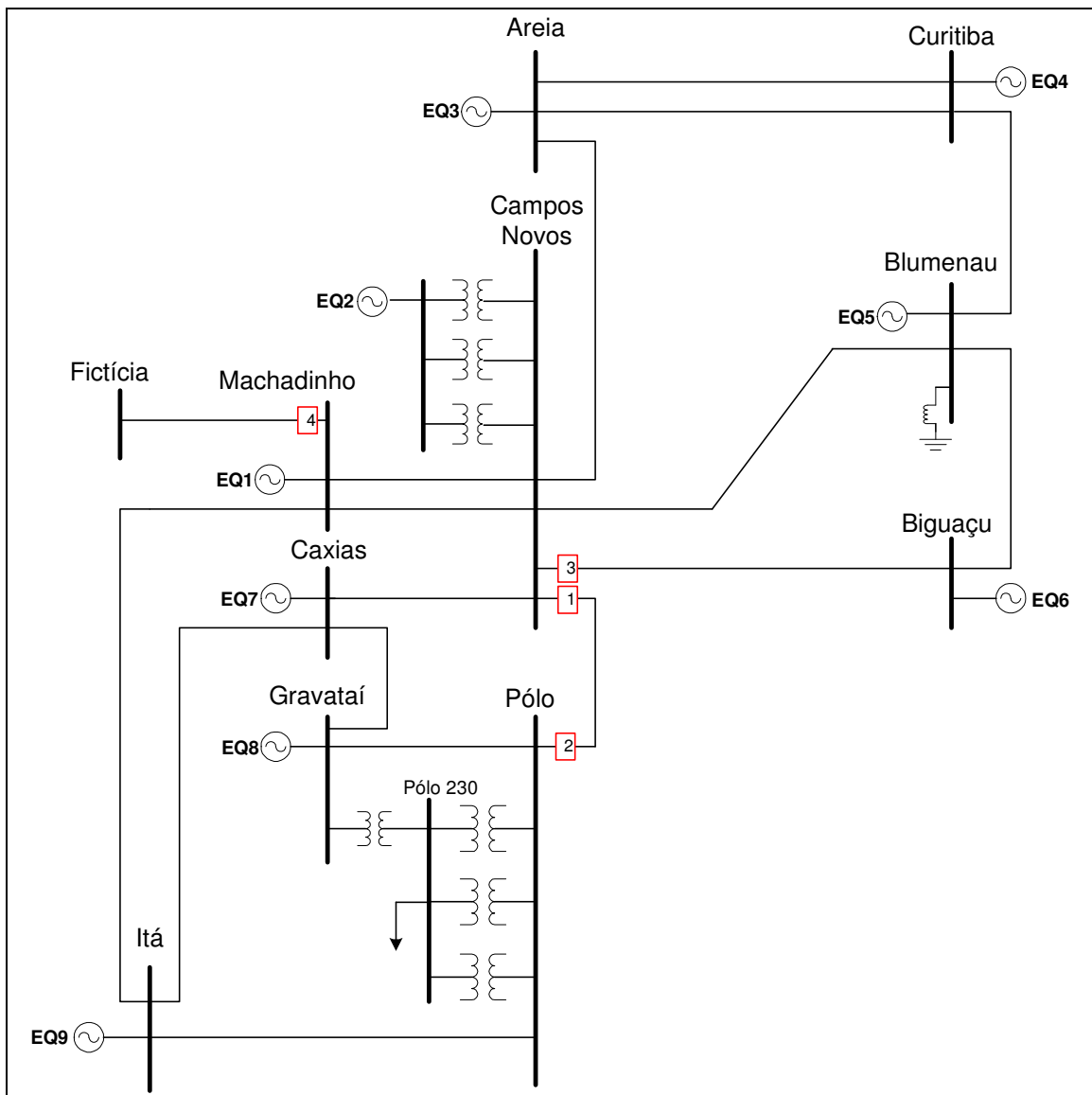


Figura 2.26 – Subsistema exemplo

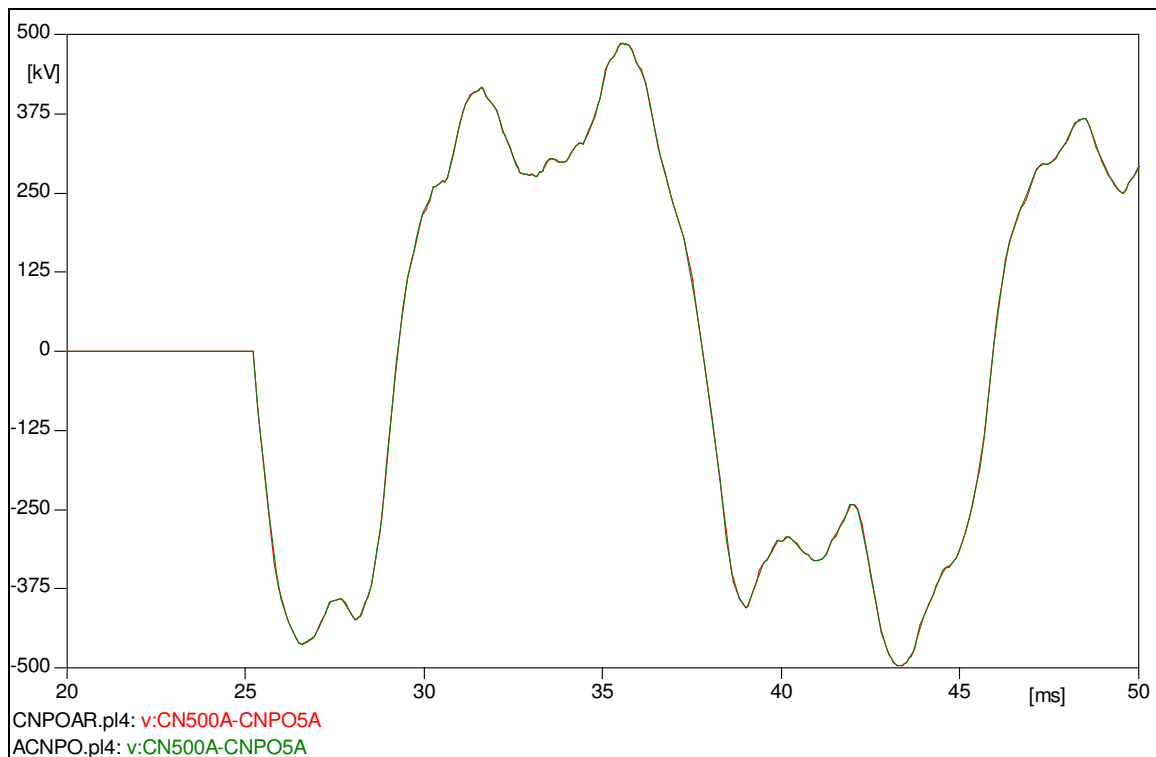


Figura 2.27 – Influência da modelagem de arco no cálculo da TRT

## 2.9 Conclusões

No Capítulo 2, procurou-se identificar os fenômenos físicos relacionados à superação de disjuntores. Através da análise do sistema de interrupção de corrente, foram identificadas as fases de interrupção que estão associadas a cada tipo de superação.

Adicionalmente, foi mostrado como é feita a caracterização da superação, ou seja, como identificar se um disjuntor está superado, seja por corrente de carga, corrente de curto-circuito simétrica ou assimétrica, crista da corrente de curto-circuito ou TRT.

A assimetria da corrente de curto-circuito pode provocar a superação por corrente de curto-circuito assimétrica. Entretanto, no que diz respeito à TRT, as solicitações ao disjuntor quando da interrupção de correntes simétricas são superiores às aquelas provocadas pela interrupção de correntes assimétricas. Portanto, é conservativo não considerar a assimetria da corrente de curto-circuito no cálculo da TRT.

De forma similar, a não representação do arco elétrico no cálculo da TRT, além de produzir resultados conservativos, não os influencia de forma significativa. Por este motivo, pode-se desprezar a dinâmica do arco elétrico para o cálculo da TRT de disjuntores.

---

## 3 MÉTODOS DE CÁLCULO DA TRT

---

### 3.1 Introdução

A forma de onda da TRT depende do local de ocorrência do curto-circuito, do circuito que é interrompido e, conseqüentemente, da relação entre as resistências, indutâncias e capacitâncias envolvidas.

Os primeiros instantes da TRT são caracterizados por uma composição das componentes de frequências naturais e da frequência fundamental. A onda de tensão se propaga através dos elementos conectados ao ponto onde o disjuntor interrompeu a corrente de curto-circuito, a partir do terminal do disjuntor que não está mais submetido à corrente de curto-circuito.

A onda de tensão se reflete em pontos de descontinuidade e retorna ao terminal do disjuntor, onde é novamente refletida, já que se trata de um circuito aberto, e é somada ao valor inicial [21].

Quanto mais próxima do ponto de partida for a descontinuidade, mais rapidamente a TRT entre os terminais do disjuntor será influenciada pela onda refletida. Por isso, as reflexões ocorridas em pontos eletricamente próximos ao disjuntor podem contribuir para o aumento dos valores iniciais da TRT.

Já as reflexões que ocorrem em pontos mais distantes levam mais tempo até voltar ao ponto de partida. Desta forma, tais reflexões podem contribuir para o aumento dos valores de pico da TRT, mesmo considerando que quanto maior for a distância, maior será a atenuação.

### 3.2 Métodos de cálculo da TRT: estado da arte

A análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência pode ser realizada no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Entretanto, métodos que utilizam o domínio do tempo são mais comumente utilizados. Alguns dos principais motivos para isso são [22]:

- No domínio do tempo, as relações entre sinais e processos são geralmente mais intuitivas;
- Representação clara e direta de elementos não lineares e variantes no tempo;
- O ATP, programa baseado no domínio do tempo, é uma ferramenta universalmente disponível e madura.

Por outro lado, análises no domínio da frequência oferecem certos atrativos que complementam as vantagens das análises no domínio do tempo. São elas, entre outras [22]:

- A modelagem dos elementos de rede com parâmetros distribuídos e dependentes da frequência pode ser feita de forma muito precisa;
- Erros numéricos das computações no domínio da frequência podem ser determinados e controlados de forma direta.

O ATP é o programa mundialmente utilizado para a simulação de fenômenos elétricos transitórios e tem sido empregado nas análises de superação por TRT há décadas. Tal simulação é trabalhosa e demanda o emprego de grandes esforços e tempo do corpo técnico dos agentes do SEB, devido ao grande número de disjuntores que carecem dessa avaliação.

O método do IEEE para cálculo da TRT [1], também baseado no domínio do tempo, é uma tentativa de simplificar as análises de TRT de forma a atender a demanda por resultados mais rápidos. Tal método é discutido nos itens 3.3 a 3.6, onde se procura estudar sua aplicabilidade nos sistemas de transmissão de alta tensão.

A outra técnica conhecida para cálculos digitais de fenômenos transitórios é a utilização das transformadas de Fourier. Esta técnica pode ser aplicada para realizar o cálculo da TRT de disjuntores. Tal método tinha, no passado, uma severa desvantagem [23]: os programas necessitavam de horas de tempo computacional com procedimentos que requeriam  $N^2$  operações para computar as transformadas de Fourier de  $N$  pontos.

Em 1975, Semlyen [24] apresentou uma forma de calcular fenômenos transitórios usando convoluções recursivas, o que permite reduzir o tempo computacional em uma ordem de grandeza, preservando a precisão e o rigor da representação de linhas com parâmetros dependentes da frequência. A idéia fundamental é baseada na observação de que a maioria das funções de interesse de resposta ao degrau unitário são aproximadas por uma função exponencial ou a soma de duas funções desse tipo.

A transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform: FFT), que requer um esforço computacional ainda menor, foi publicada por Cooley & Tukey [25], [26], [27] em 1965. A FFT é um método para computar de forma eficiente a DFT (Discrete Fourier Transform) de uma série temporal. A FFT requer  $2N \log_2 N$  operações aritméticas se a série de amostras consiste em  $N=2^n$  amostras [23].

Em 2004, Steurer *et al.* [28] apresentaram uma forma de calcular a TRT de disjuntores utilizando a análise da resposta em frequência, especificamente para calcular a TRT associada à faltas terminais no enrolamento secundário de transformadores de potência. A partir da resposta em frequência da impedância de curto-circuito do transformador, é injetada a corrente de curto-circuito, convertida ao domínio da frequência, para a obtenção do espectro em frequência da TRT. A transformada rápida inversa de Fourier é então utilizada para obter-se a forma de onda da TRT no domínio do tempo.

O método supracitado não injeta, entretanto, a corrente de curto-circuito na forma senoidal. Steurer *et al.* [28] defendem que, como o disjuntor interrompe apenas na passagem por zero da onda senoidal de corrente e como as frequências da TRT são tipicamente muito maiores que a frequência fundamental da rede, a corrente de curto-circuito pode ser aproximada por uma reta com a mesma derivada inicial, formando



uma onda triangular. Entretanto, tal aproximação pode causar erros na determinação do pico da TRT quando a forma de onda de subida da TRT não ocorre tão rapidamente. Nesses casos, é importante a injeção do primeiro pulso completo da corrente de cancelamento do curto-circuito.

O método de Steurer *et al.* [28] é uma forma simples e rápida de calcular a TRT de disjuntores e pode ser aplicado a qualquer disjuntor de uma rede, substituindo-se a resposta em frequência do transformador pela resposta em frequência da rede vista através dos pólos do disjuntor.

O capítulo 4 do presente trabalho apresenta um método de cálculo da TRT similar ao método de Steurer *et al.* [28], com as seguintes diferenças: utiliza-se, em lugar da resposta em frequência da impedância do transformador, a resposta em frequência da rede vista através dos pólos do disjuntor; ao invés de injetar a corrente de curto-circuito linearizada, injeta-se a mesma em sua forma senoidal eliminando, assim, os erros causados por essa simplificação.

### **3.3 Formulação das equações do método IEEE Std C37.011-2005**

O método utilizado pelo IEEE para calcular a TRT é o de injeção de corrente, e o modelo utilizado é válido até o instante do retorno da primeira reflexão ao ponto de partida. Tal formulação foi estudada por Amon [29] e será mostrada a seguir.

O circuito utilizado para mostrar a aplicação do método é representado na Figura 3.1. Tal circuito consiste em um barramento onde estão conectadas a linha em falta, representada por sua impedância de surto, as linhas sãs, cada uma representada por sua impedância de surto, a capacitância equivalente do barramento e dos equipamentos ligados a ele e a fonte de tensão conectada através de uma reatância equivalente.

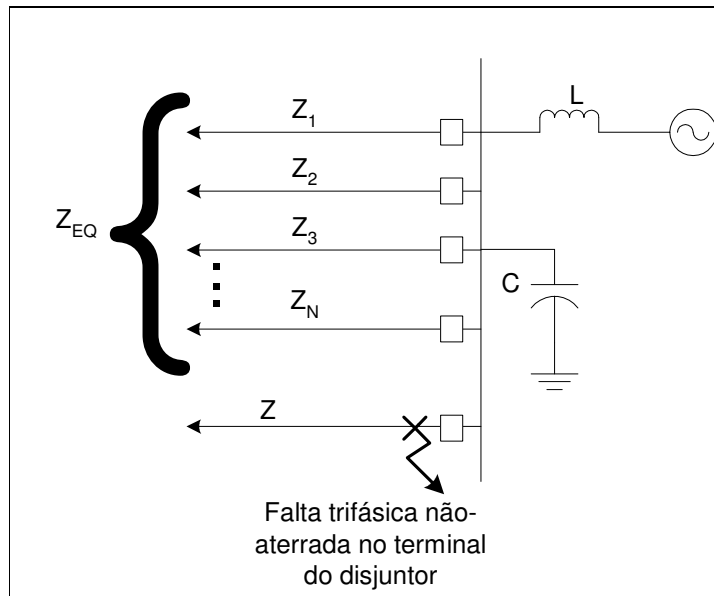


Figura 3.1 – Diagrama unifilar – Circuito elétrico

Sendo  $Z_{EQ} = Z_1 // Z_2 // Z_3 // \dots // Z_N$ , tem-se o circuito equivalente mostrado na Figura 3.2.

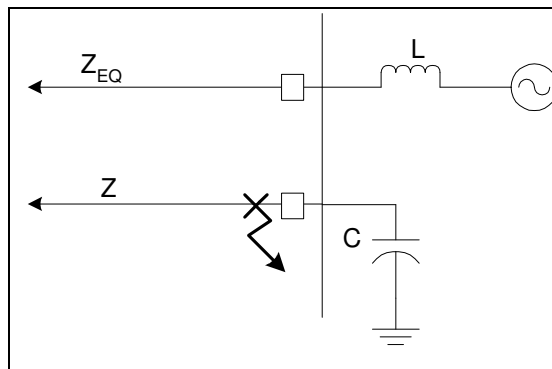


Figura 3.2 – Diagrama unifilar – Circuito equivalente

A partir do circuito equivalente, aplica-se o princípio da superposição. Tal princípio consiste em, inicialmente, calcular as correntes e tensões sob condição de falta. Em seguida, anulando-se a fonte do circuito, substitui-se o primeiro pólo a abrir por uma fonte de corrente que tenha amplitude igual e sinal contrário ao da corrente de falta.

Em seguida, calculam-se as tensões e correntes nestas novas condições. As tensões e correntes desejadas são calculadas somando-se as duas etapas acima descritas.

Como o defeito está presente no circuito na etapa inicial, a tensão entre os contatos do disjuntor é, naturalmente, nula. Portanto, a TRT que se deseja calcular é igual à tensão entre os contatos do primeiro pólo que deverá interromper a corrente calculada na segunda etapa.

A Figura 3.3 mostra o circuito equivalente na forma trifásica.

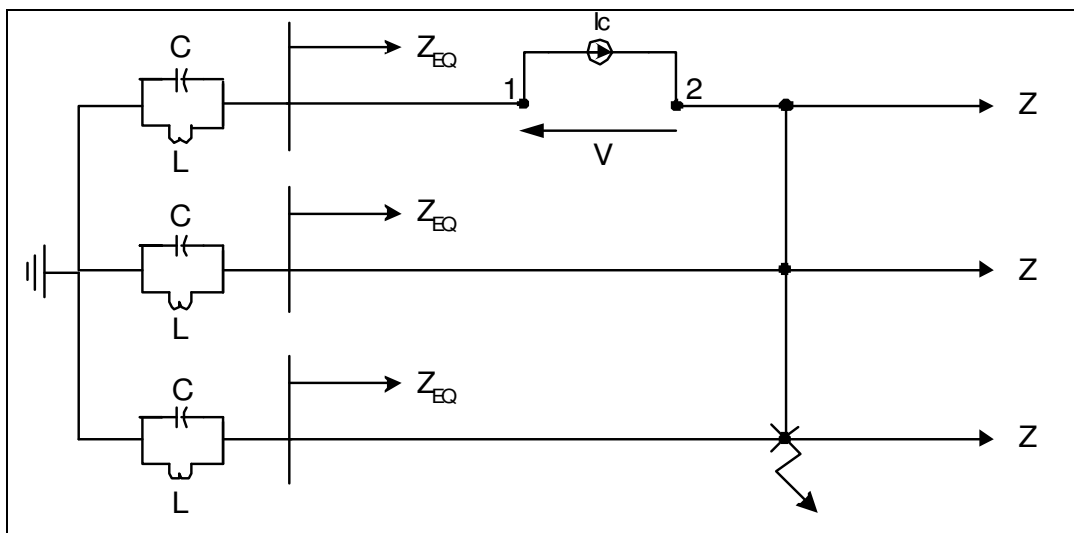


Figura 3.3 – Circuito equivalente trifásico

Simplificando a Figura 3.3, tem-se o circuito representado na Figura 3.4

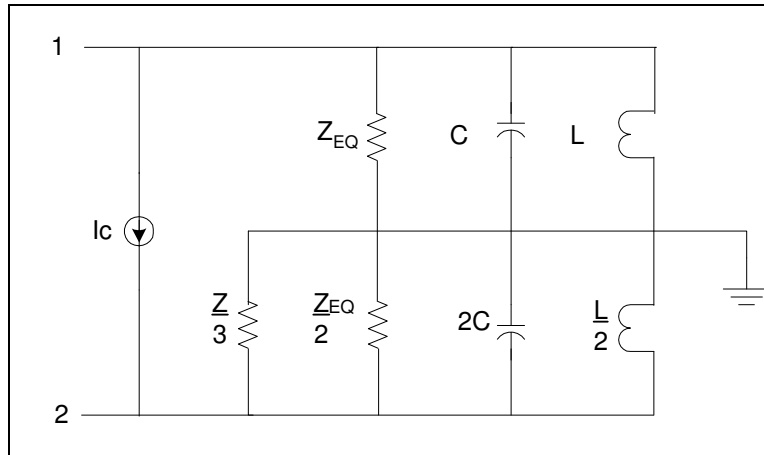


Figura 3.4 – Circuito equivalente

O circuito equivalente da Figura 3.4 pode ser simplificado considerando as seguintes características físicas do fenômeno em análise:

- Como  $Z_{EQ} \ll Z$ ,  $Z_{EQ}/2 \parallel Z/3 \approx Z_{EQ}/2$

Desprezamos assim a linha de transmissão sob falta.

- Nos instantes iniciais pode-se desprezar a capacitância de barramento C.

Sendo assim, o circuito da Figura 3.4 reduz-se ao mostrado na Figura 3.5.

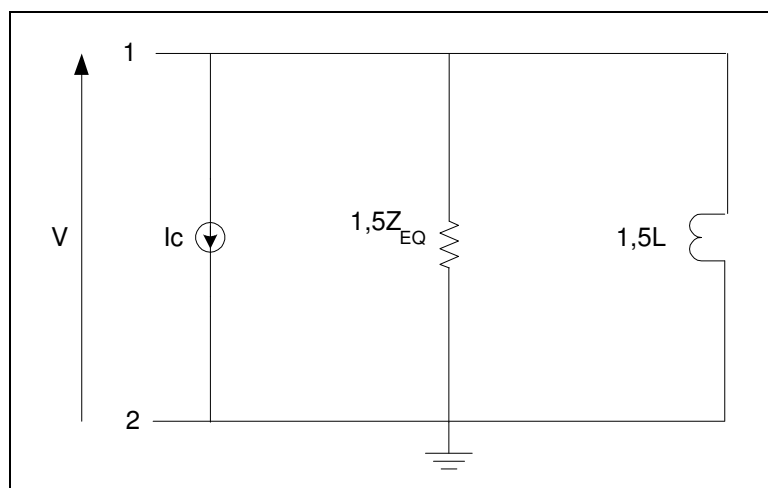


Figura 3.5 – Circuito equivalente desprezando capacitâncias

Considerando que a corrente  $I_c$  é da forma senoidal, será utilizada a seguinte expressão:

$$I_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(wt) \quad (3.1)$$

Tal expressão pode ser simplificada, dado que o fenômeno da TRT ocorre durante um intervalo de tempo muito inferior ao tempo de meio ciclo, para:

$$I_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot wt \quad (3.2)$$

Solução do circuito da Figura 3.5 no domínio de Laplace:

$$Z(s) = 1,5 \cdot \frac{sL \cdot Z_{EQ}}{sL + Z_{EQ}} \quad (3.3)$$

$$I_c(s) = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w}{s^2} \quad (3.4)$$

$$V(s) = Z(s) \cdot I_c(s) = 1,5 \cdot \frac{sL \cdot Z_{EQ}}{sL + Z_{EQ}} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w}{s^2} \quad (3.5)$$

$$V(s) = 1,5 \cdot L \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot \frac{1}{s \left( s \frac{L}{Z_{EQ}} + 1 \right)} \quad (3.6)$$

Solução no domínio do tempo:

$$v(t) = 1,5 \cdot L \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot \left( 1 - e^{-\frac{Z_{EQ}}{L}t} \right) \quad (3.7)$$

Considerando as capacitâncias fase-terra, teremos o circuito representado na Figura 3.6.

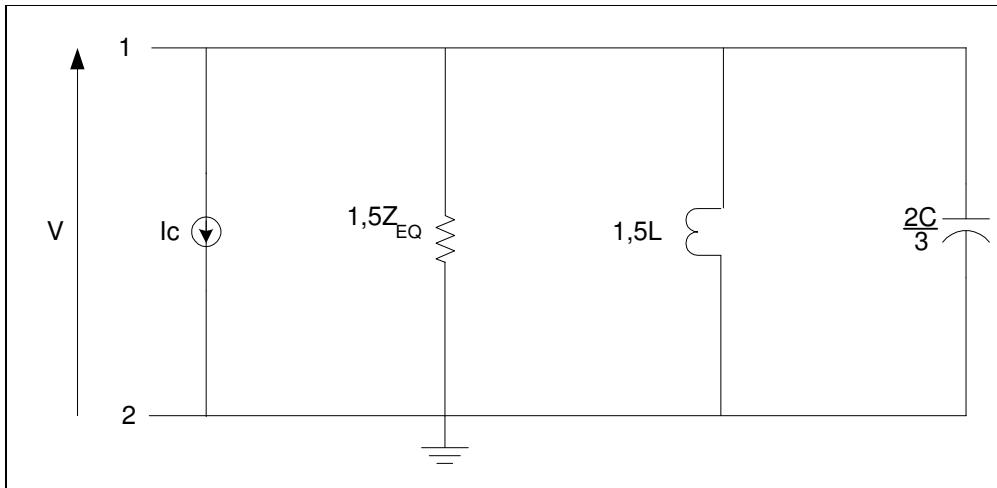


Figura 3.6 – Circuito equivalente considerando capacitâncias

Solução do circuito da Figura 3.6 no domínio da frequência:

$$V(s) = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w}{\frac{2}{3}C} \cdot \frac{1}{s \left( s^2 + \frac{s}{Z_{EQ}C} + \frac{1}{LC} \right)} \quad (3.8)$$

Tal expressão, no domínio do tempo, tem duas possíveis respostas:

- a) Caso  $Z_{EQ} < 0,5 \frac{L}{C}$ , resposta super amortecida, tem-se a seguinte resposta no domínio do tempo:

$$v(t) = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot L \cdot \left[ 1 - e^{-\alpha \cdot t} \left( \cosh(\beta t) + \frac{\alpha}{\beta} \sinh(\beta t) \right) \right] \quad (3.9)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{1}{2Z_{EQ}C}$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{LC}}$$

b) Caso  $Z_{EQ} \geq 0,5 \frac{L}{C}$ , resposta oscilatória amortecida:

$$v(t) = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot L \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \right)$$

### 3.4 Resumo da formulação usada na norma IEEE Std C37.011-2005

#### 3.4.1 TRT Exponencial (superamortecida)

$$v(t) = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot L \cdot \left[ 1 - e^{-\alpha t} \left( \cosh(\beta t) + \frac{\alpha}{\beta} \sinh(\beta t) \right) \right] \quad (3.10)$$

Onde:

$$w = 2\pi f \quad (3.11)$$

$I$  é a corrente de curto-circuito em kA;

$Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$ , são as impedâncias de surto de seqüência positiva das LTs ligadas à barra onde está conectado o disjuntor que irá interromper a corrente de curto-circuito;

$$Z_{EQ} = Z_1 // Z_2 // Z_3 // \dots // Z_N;$$

L é a indutância local equivalente, representando todas as fontes e transformadores conectados à barra;

C é a capacitância total fase-terra.

### 3.4.2 TRT Oscilatória (subamortecida)

$$v(t) = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot L \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \right) \text{ kV} \quad (3.12)$$

### 3.4.3 Ondas refletidas

Numa descontinuidade, a onda de tensão é refletida. Tal reflexão pode ser calculada da seguinte forma [1]:

$$v_R(t) = v(t) \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.13)$$

Onde:

v(t) é a onda incidente

Z<sub>1</sub> e Z<sub>2</sub> são as impedâncias de surto nos dois lados da descontinuidade

Colclaser et. al. [30] mostram que a onda refletida que retorna de uma linha de transmissão em vazio contribui para a TRT como a seguir:

$$v_R(t) = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot \frac{Z_{EQ}}{N} t \cdot e^{-Z_{EQ}t/L} \quad (3.14)$$

## 3.5 Resultados – comparação IEEE std C37.011-2005 x ATP

O Método de Cálculo da TRT do IEEE Std. C37.011-2005 foi programado em Excel. A primeira dificuldade encontrada foi a obtenção do valor para Cs, que é a soma das



capacitâncias fase-terra dos transformadores e/ou reatores conectados à barra do disjuntor em análise.

Partindo do valor da indutância destes elementos e considerando que a frequência de oscilação do fenômeno geralmente é de aproximadamente 2 kHz, as capacitâncias foram calculadas através da relação:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.15)$$

Na tentativa de testar as respostas do método em questão, foram escolhidos 4 disjuntores de um sistema real para que fossem avaliadas as solicitações de TRT. Tal sistema, ilustrado em diagrama unifilar na Figura 3.7, foi modelado em ATP, de acordo com o Apêndice 2.

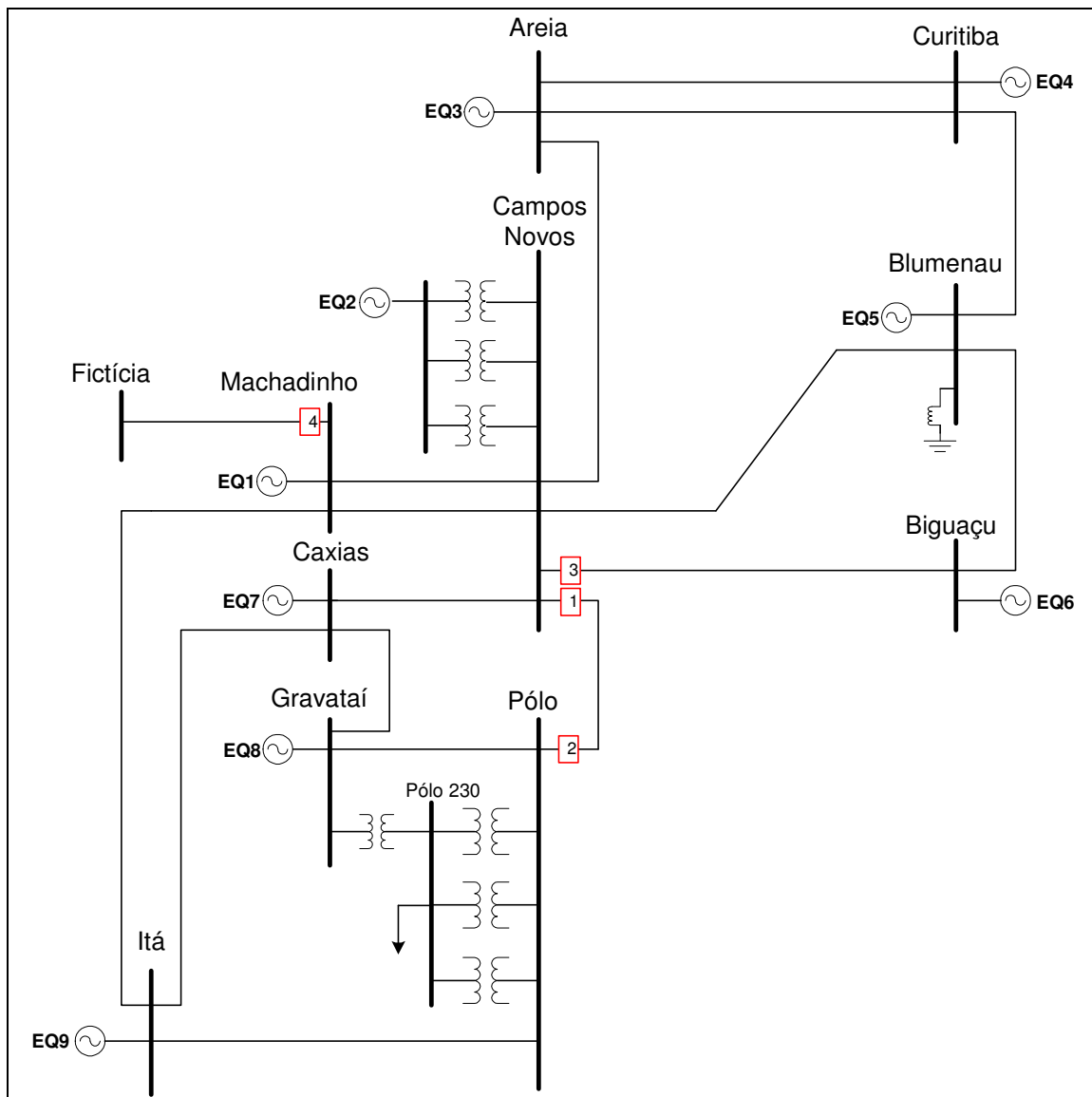


Figura 3.7 – Subsistema estudado

### 3.5.1 Disjuntor 1

- Linhas de Transmissão conectadas à barra:

LTs	XL (ohm/km)	Yc ( $\mu$ S/km)	Comp. (km)
Cnovos - Mach. C1	0,3172	5,2101	44
Cnovos - Mach. C2	0,3193	5,1649	50,6

Cnovos - Areia	0,3201	5,1649	176,3
Cnovos - Blumenau	0,3201	5,1649	252
Cnovos - Biguaçu	0,3303	5,0405	290
Cnovos - Caxias	0,3197	5,1649	200

- Transformadores ou equivalentes conectados à barra:

<b>Trafos</b>	L (H)
TR1	2,00E-01
TR2	2,00E-01
TR3	2,00E-01

- Corrente de curto-circuito na barra:

I <sub>cc</sub> (A)	24300
---------------------	-------

- Tipo de curva: Exponencial

- Parâmetros calculados:

<b>L (H)</b>	<b>C (F)</b>	<b>Z<sub>EQ</sub> (ohm)</b>
<b>0,067</b>	<b>9,50E-08</b>	<b>41,61</b>

➤ Resultado:

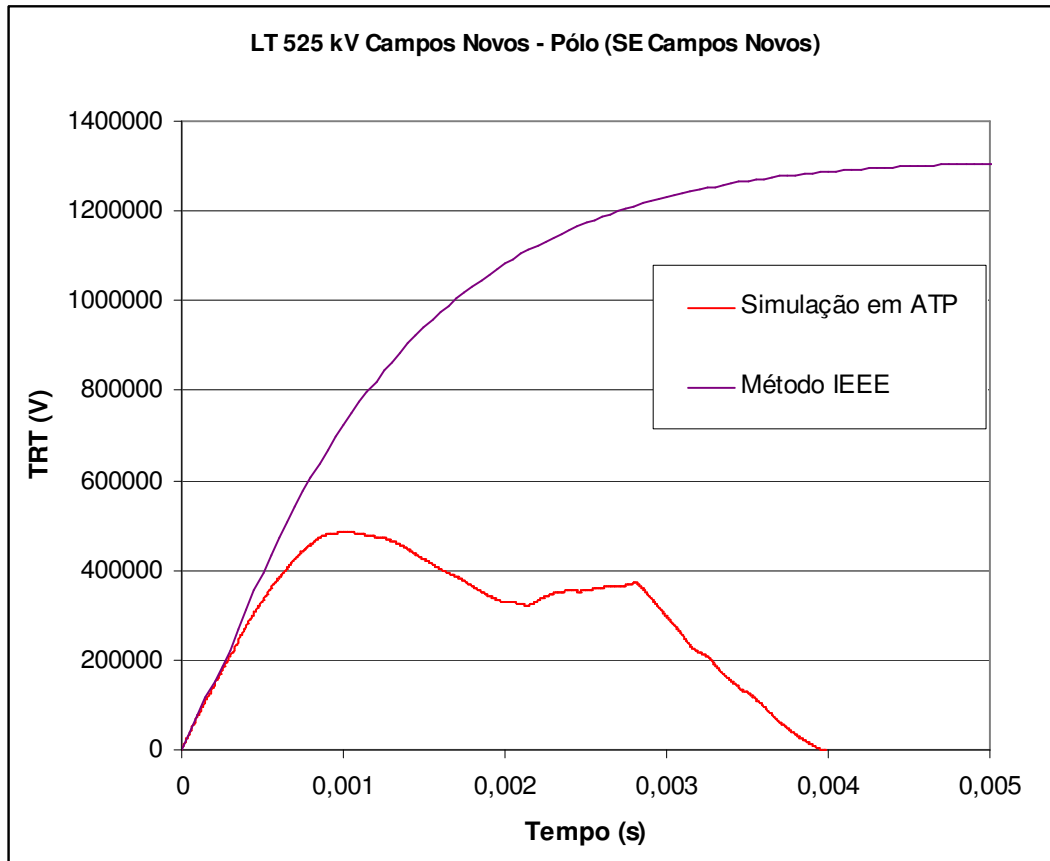


Figura 3.8 – TRT calculada para o disjuntor da LT 525 kV Campos Novos – Pólo (SE Campos Novos)

A Figura 3.8 mostra a comparação entre a TRT obtida para o disjuntor 1 pelo cálculo completo em ATP descrito no Apêndice 1 e o cálculo simplificado proposto pelo método do IEEE Std. C37.011-2005 [1].

### 3.5.2 Disjuntor 2

- Linhas de Transmissão conectadas à barra:

<b>LTs</b>	<b>XL</b> (ohm/km)	<b>Yc</b> ( $\mu$ S/km)	<b>Comp.</b> (km)
Polo - Gravatai	0,3201	5,1649	34
Polo - Ita	0,3201	5,1649	314

- Transformadores ou equivalentes conectados à barra:

<b>Trafos</b>	<b>L (H)</b>
TR1	2,00E-01
TR2	2,00E-01
TR3	2,00E-01

- Corrente de curto-circuito na barra:

I <sub>cc</sub> (A)	13100
---------------------	-------

- Tipo de curva: Exponencial

- Parâmetros calculados:

<b>L (H)</b>	<b>C (F)</b>	<b>Z<sub>EQ</sub> (ohm)</b>
<b>0,067</b>	<b>9,50E-08</b>	<b>124,47</b>

➤ Resultado:

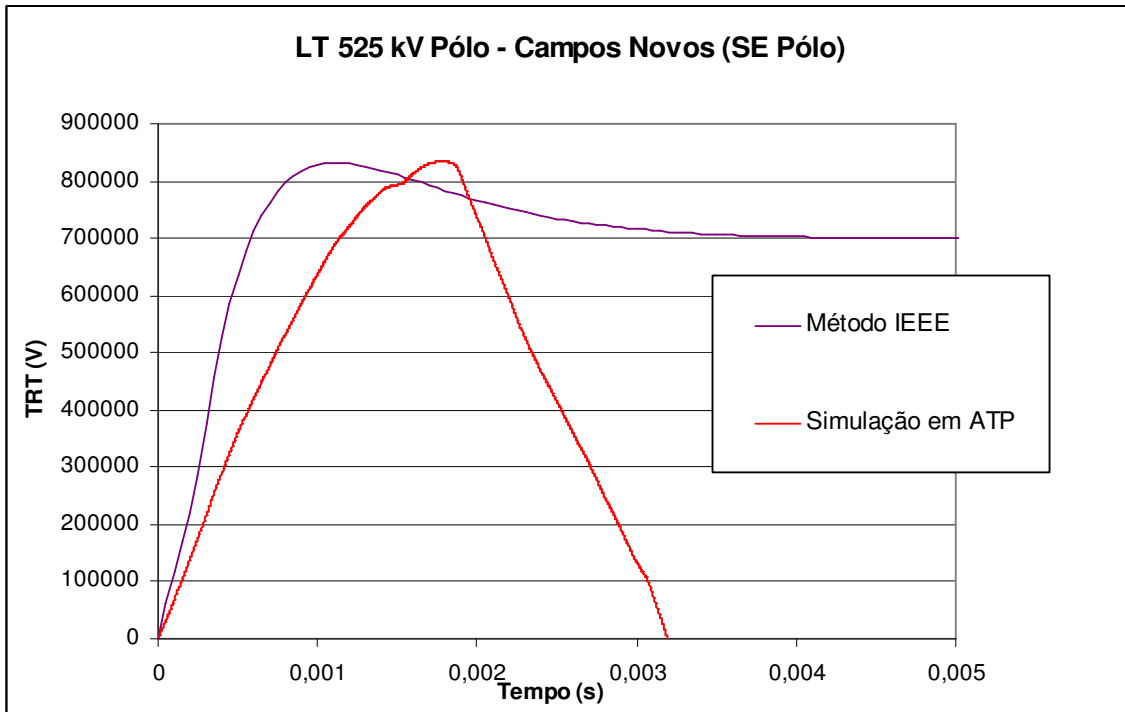


Figura 3.9 – TRT calculada para o disjuntor da LT 525 kV Campos Novos – Pólo (SE Pólo)

A Figura 3.9 mostra a comparação entre a TRT obtida para o disjuntor 2 pelo cálculo completo em ATP descrito no Apêndice 2 e o cálculo simplificado proposto pelo método do IEEE Std. C37.011-2005 [1].

### 3.5.3 Disjuntor 3

➤ Linhas de Transmissão conectadas à barra:

LTs	XL (ohm/km)	Yc ( $\mu$ S/km)	Comp (km)
Cnovos - Mach. C1	0,3172	5,2101	44
Cnovos - Mach. C2	0,3193	5,1649	50,6
Cnovos - Areia	0,3201	5,1649	176,3

Cnovos - Blumenau	0,3201	5,1649	252
Cnovos - Polo	0,3328	4,9957	273
Cnovos - Caxias	0,3197	5,1649	200

- Transformadores ou equivalentes conectados à barra:

<b>Trafos</b>	L (H)
TR1	2,00E-01
TR2	2,00E-01
TR3	2,00E-01

- Corrente de curto-circuito na barra:

I <sub>cc</sub> (A)	24300
---------------------	-------

- Tipo de curva: Exponencial

- Parâmetros calculados:

<b>L (H)</b>	<b>C (F)</b>	<b>Z<sub>EQ</sub> (ohm)</b>
<b>0,067</b>	<b>9,50E-08</b>	<b>41,66</b>

➤ Resultado:

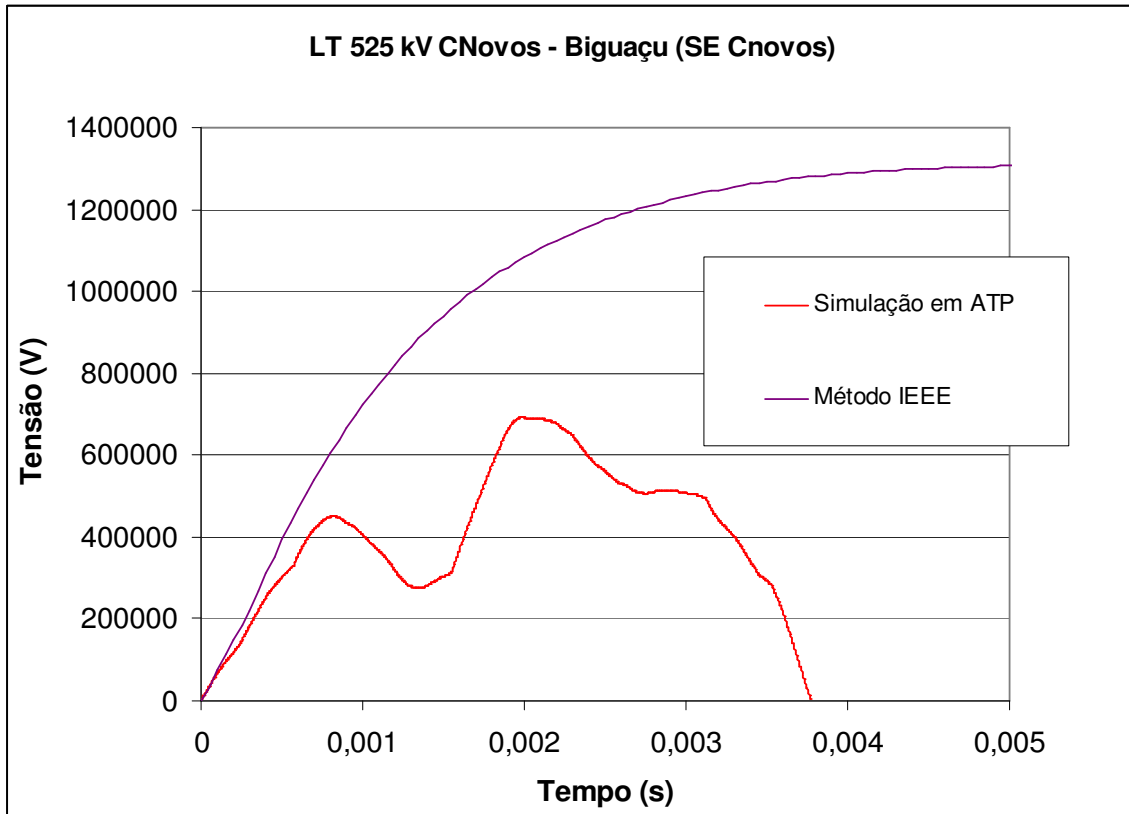


Figura 3.10 – TRT calculada para o disjuntor da LT 525 kV Campos Novos – Biguaçu (SE Campos Novos)

A Figura 3.10 mostra a comparação entre a TRT obtida para o disjuntor 3 pelo cálculo completo em ATP descrito no Apêndice 2 e o cálculo simplificado proposto pelo método do IEEE Std. C37.011-2005 [1].

#### 3.5.4 Disjuntor 4

➤ Linhas de Transmissão conectadas à barra:

LTs	XL (ohm/km)	Yc (μS/km)	L (km)
Mach - Cnovos 1	0,3172	5,2101	44
Mach - Cnovos 2	0,3193	5,1649	50,6



Mach - Itá                      0,3197              5,1649              79,1

- Transformadores ou equivalentes conectados à barra:

<b>Equivalentes</b>	L (H)	Freqüência	C (F)
EQ1	0,221	2000	2,87E-08

- Corrente de curto-circuito na barra:

I<sub>cc</sub> (A)                      18600

- Tipo de curva: Exponencial

- Parâmetros calculados:

<b>L (H)</b>	<b>C (F)</b>	<b>Z<sub>EQ</sub> (ohm)</b>
<b>0,221</b>	<b>2,87E-08</b>	<b>82,68</b>

➤ Resultado:

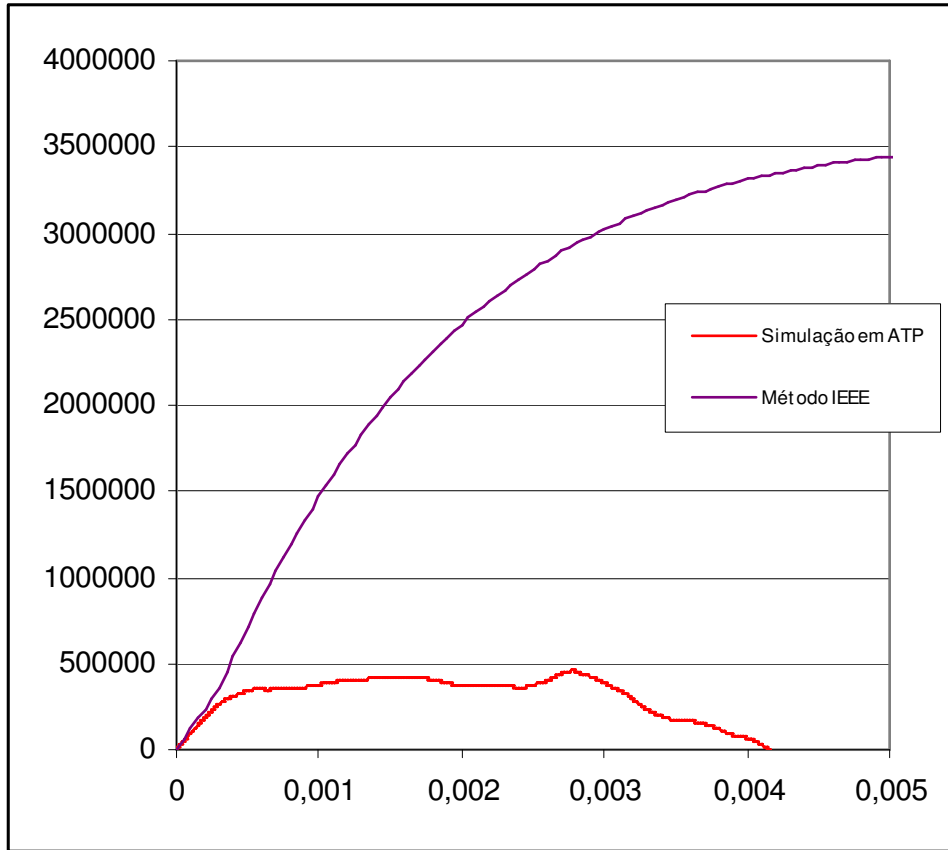


Figura 3.11 – TRT calculada para o disjuntor da LT 525 kV Machadinho - Fictícia (SE Machadinho)

A Figura 3.11 mostra a comparação entre a TRT obtida para o disjuntor 4 pelo cálculo completo em ATP descrito no Apêndice 1 e o cálculo simplificado proposto pelo método do IEEE Std. C37.011-2005 [1].

Analisando as curvas que comparam as respostas para TRT do método simplificado e da simulação digital com ATP verifica-se que o método apresenta resultados aceitáveis para a TCTRT (taxa de crescimento da TRT nos instantes iniciais). Entretanto, no que diz respeito ao valor de crista da TRT, o método sob análise indicou valores muito superiores aos encontrados nas simulações digitais, em três dos quatro casos analisados, o que pode pôr em dúvida sua aplicabilidade.

### 3.6 Conclusões

Uma das premissas do método das superposições é de que as linhas de transmissão conectadas à barra cujo disjuntor será solicitado a interromper a corrente de curto-circuito não contribuem efetivamente para a corrente de curto-circuito. Isso pode ser visto nas equações (3.10) e (3.12), onde toda a corrente de curto-circuito é injetada na reatância equivalente (transformadores + fontes equivalentes).

Pode-se concluir que o método IEEE Std C37.011-2005 [1] trata as linhas como carga e não como fonte. Porém, nos sistemas de transmissão, existem linhas alimentando o curto-circuito, algumas vezes mais que os transformadores. Tem-se a percepção de que o método de cálculo da TRT do IEEE Std. C37.011-2005 [1] aplica-se de forma adequada em sistemas de distribuição, onde as linhas estão, em sua maioria, conectadas à cargas.

Pelo exposto, convém buscar um método alternativo para o cálculo da TRT de disjuntores onde as simplificações tenham menor influência no que diz respeito aos resultados para simulações de sistemas de transmissão. O Capítulo 4 apresenta um método para cálculo da TRT de disjuntores utilizando o domínio da frequência em uma de suas etapas. Dessa forma, é possível levar em consideração a variação com a frequência dos parâmetros das linhas de transmissão.

---

# 4 MÉTODO FFT PARA CÁLCULO DA TRT

---

## 4.1 Introdução

Os resultados de simulações em um sistema real descritos no Capítulo 3 indicaram que o método de cálculo da TRT do IEEE Std. C37.011-2005 [1] não mostrou resultados aplicáveis a sistemas densamente malhados, como é o caso de diversas áreas do SEB. Neste capítulo é proposto um método alternativo para cálculo da TRT de disjuntores baseado nas transformadas de Fourier.

Tal método, batizado de “método FFT”, parte do seguinte princípio: conhecida a resposta em frequência da rede suposta linear vista de um determinado ponto e o pulso da corrente de curto-circuito, podem-se realizar operações matemáticas que possibilitem, através do par de transformadas de Fourier, obter-se a forma de onda da TRT no domínio do tempo.

O item 4.2 apresenta uma discussão sobre métodos que utilizam conversão de sinais. As transformadas de Fourier (FFT) contínuas e discretas são apresentadas no item 4.3. O método FFT é explicado em detalhes no item 4.4. O item 4.5 mostra resultados comparativos de cálculo da TRT entre o método FFT e o método convencional, através do programa ATP, seguido da discussão sobre erros na FFT do item 4.6. Uma discussão sobre a utilização de programas de cálculo de harmônicos para obter dados de entrada para a utilização prática do método FFT é apresentada no item 4.7.

## 4.2 Métodos de conversão de sinais tempo-freqüência

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo da utilização dos métodos de análise de circuitos elétricos que utilizam conjuntamente os domínios do tempo e da freqüência, especialmente na área de processamento digital de sinais. Esse tipo de método tem sido usado tanto para a análise espectral de sinais (periódicos ou não), quanto para efetuar operações de convolução no domínio do tempo, procurando encontrar a resposta de circuitos lineares a excitações transitórias e/ou periódicas. Tais operações podem ser aplicadas a circuitos eletrônicos e a redes elétricas de potência. No entanto, a aplicação nas redes elétricas de potência não tem sido tão intensa quanto nas áreas de eletrônica e telecomunicações.

Este capítulo apresenta um exemplo prático de aplicação desta metodologia nas redes elétricas de potência, especificamente no cálculo de TRT de disjuntores. Mostra-se dessa forma o grande campo de aplicação do método tempo-freqüência para o cálculo de diversos problemas de redes elétricas, destacando-se a vantagem de uma representação rigorosa da variação com a freqüência dos parâmetros dos elementos das redes.

O método de conversão de sinais entre tempo e freqüência não é nada novo. Seu desenvolvimento remonta-se à primeira metade do século dezanove, antes da existência das redes elétricas, quando Fourier propôs suas séries e integrais ou transformadas.

Com as séries de Fourier ficou demonstrado que qualquer função periódica no tempo pode ser representada matematicamente por uma série eventualmente infinita de funções cossenoidais (amplitude e fase) de freqüências múltiplas da fundamental.

Em forma similar, a transformada de Fourier mostra que uma função transitória (convergente) no tempo também pode ser representada por séries infinitas de funções cossenoidais, onde o tempo e a freqüência variam continuamente com passo infinitesimal. Esse tipo de análise espectral aplica-se aos mais diversos sinais, representativos de fenômenos elétricos, acústicos, mecânicos, etc., sejam eles periódicos ou transitórios.

Adicionalmente, a transformada inversa mostra que este processo é reversível, no sentido de que a função resultante no domínio da frequência pode ser retro-transformada para a função original no domínio do tempo, existindo uma relação correspondente ou bi-unívoca entre essas funções [31].

O advento dos computadores permitiu efetuar de forma eficiente as transformadas de Fourier de forma discreta. Nesse sentido, foram desenvolvidos programas para efetuar a DFT (discrete Fourier transform) e a iDFT (inverse discrete Fourier transform), sendo que os mais rápidos estão baseados no algoritmo de Cooley & Tukey [25], [26], [27], conhecidos como FFT (Fast Fourier Transform) e iFFT (Inverse Fast Fourier Transform). A este último tipo pertencem as funções `fft` e `ifft` do programa MATLAB®, utilizadas neste trabalho.

Nenhuma dessas transformadas discretas considera a integração entre menos e mais infinito, por evidente impossibilidade, sendo considerada a integração em períodos fixos e repetitivos (janelas). Para fenômenos periódicos, esta janela corresponde ao período de repetição da oscilação. Para fenômenos aperiódicos, quanto maior for a extensão desta janela de tempo considerada, maior é a precisão do cálculo, para uma mesma frequência de amostragem.

## 4.3 Transformadas de Fourier

### 4.3.1 Transformadas contínuas de Fourier

Para uma função contínua de uma variável  $x(t)$ , uma das possíveis definições da transformada de Fourier pode ser definida como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.1)$$

e a transformada inversa como:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{i2\pi ft} df \quad (4.2)$$

Estas transformadas permitem a passagem de funções do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa em forma bi-unívoca (homomorfismo). Ou seja, uma função conhecida no domínio do tempo tem uma única função equivalente no domínio da frequência, e vice-versa.

A transformada de Fourier, também conhecida como integral de Fourier, permite representar qualquer função do tempo, inclusive de caráter transitório, por uma série infinita de ondas senoidais, como se nota aplicando a equação de Euler à transformada de Fourier. Contudo, existe uma restrição para esta transformação, no sentido de que a integral deve ser convergente, ou seja, a integral entre menos infinito e mais infinito deve ser finita [29], [32].

#### 4.3.2 Transformadas discretas de Fourier

A seguir apresenta-se a forma discretizada de efetuar o cálculo das transformadas de Fourier, existindo uma equação discretizada correspondente a cada uma das transformadas originais de Fourier acima apresentadas.

Neste caso considera-se uma série complexa  $x(n)$  com  $N$  amostras da forma:

$$x_0, x_1, x_2, x_3 \dots x_n \dots x_{N-1}$$

onde  $x_n$  é um número complexo.

No caso de funções do tempo, os números  $x_n$  correspondem ao valor da função do tempo para cada instante discretizado, sendo a parte imaginária igual a zero, a menos de erros numéricos.

Supõe-se que a série se estende em forma periódica fora da faixa entre 0 e N-1, ou seja, que  $x_n = x_{n+N}$  para todo n.

A transformada discreta de Fourier da série x(n), designada por X(k), terá também N amostras, sendo definida na seguinte forma [26], [33]:

$$X(k+1) = \sum_0^{N-1} x(n+1) \cdot e^{-i(2\pi/N)kn} \quad (4.3)$$

k = 0, 1, 2..., N-1

Note-se então que a integração discretizada não é feita entre menos e mais infinito, como no caso da transformada de Fourier, mas dentro de janelas finitas (N pontos) e repetitivas. No caso de funções aperiódicas do tipo pulsos transitórios únicos, procura-se utilizar janelas extensas e alta freqüência de amostragem, a fim de obter um resultado com precisão bem próxima ao que seria obtido com as transformadas contínuas de Fourier.

Existem vários métodos para efetuar a transformada discreta de Fourier em computadores. Por exemplo, a FFT (Fast Fourier Transform), que utiliza algoritmo de Cooley & Tukey [25], [26], [27], [33], é uma forma rápida e eficiente de cálculo das transformadas discretas de Fourier. O programa MATLAB® utiliza a função `fft` para as N amostras da função do tempo, ou seja, para o vetor x(n).

Na terminologia do MATLAB®, para um vetor x real (ou complexo) de comprimento N = length(x), a função `fft` retorna um vetor complexo X de comprimento N.

A transformada discreta inversa de Fourier fica assim definida [26], [33]:

$$x(n+1) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k+1) \cdot e^{i(2\pi/N)kn} \quad (4.4)$$



Para implementar esta transformada, o MATLAB® utiliza a função ifft, com  $N=\text{length}(x)$ . Também neste caso é utilizado o mesmo algoritmo, pois o cálculo é estruturalmente igual ao utilizado em fft.

Nota-se duas diferenças básicas entre as equações (4.3) e (4.4): o fator de escala  $1/N$  e a mudança do sinal do expoente. O fator de escala depende do método de racionalização e pode ser diferente em outros métodos de cálculo das transformadas discretas de Fourier.

Observa-se que além das transformadas discretas de Fourier existem outras transformadas semidiscretas (como a DTFT - Discrete Time Fourier Transform - que é discretizada no tempo sendo, porém, contínua na frequência), as quais não são aplicáveis aos objetivos do presente trabalho.

#### **4.4 Descrição do método FFT**

O método tempo-freqüência inicia-se com o cálculo da resposta ao impulso no domínio da freqüência (resposta em freqüência)  $Z(\omega)$  da rede vista pelos contatos do disjuntor em estudo. Essa resposta representa a rede linear passiva no domínio da freqüência. Para isso, podem ser utilizados programas convencionais de cálculo de redes no domínio da freqüência utilizados para estudos de harmônicos.

De acordo com o teorema da superposição – também utilizado no capítulo 3 para o detalhamento do método de cálculo da TRT do IEEE Std. C37.011-2005 –, para obter-se o efeito elétrico da abertura de um disjuntor, basta injetar entre seus terminais a corrente que cancelaria a corrente que circula antes da abertura, considerando a rede passiva. Ou seja, uma corrente com mesma amplitude e com sinal contrário da corrente de curto-circuito [16].

No método tempo-freqüência, um pulso de cancelamento da corrente de curto-circuito é injetado na rede linear passiva através dos contatos do disjuntor em análise. Para calcular a TRT, seria preciso fazer a convolução da resposta de impulso com o pulso de corrente injetado.

Sabendo que a convolução no domínio do tempo é um cálculo extremamente trabalhoso e que tal operação corresponde a uma multiplicação no domínio da frequência e considerando que já se tem a resposta de impulso no domínio da frequência, é necessário converter o pulso de corrente ao domínio da frequência através de FFT.

O processo de convolução que seria realizado no domínio do tempo fica assim reduzido a uma simples multiplicação dos elementos de mesma frequência do vetor de pulso de corrente pelo vetor da resposta em frequência da rede. A transformada inversa iFFT deste produto resulta na TRT no domínio do tempo.

Consideramos que a corrente de curto-circuito é puramente senoidal, desprezando as quedas exponenciais da componente de corrente-contínua e da componente oscilatória simétrica. É utilizado somente o primeiro semi-ciclo da corrente, pois o valor máximo da TRT de interesse ocorre antes do primeiro máximo da onda de corrente.

Para evitar a injeção de harmônicos de alta frequência após o pico da TRT (afetam o final da janela, e, portanto o início da TRT), a corrente é representada pela função senoidal do tipo “semi-seno” após o valor máximo do semi-ciclo senoidal da corrente de cancelamento. Essa função é definida como a seguir:

$$semisen(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{sen}(\omega t - T/4) \quad (4.5)$$

Tal medida evita um corte brusco da corrente, como se nota na Figura 4.1, que é um exemplo de corrente injetada utilizando a queda suave da função semi-seno na segunda metade do semi-ciclo.

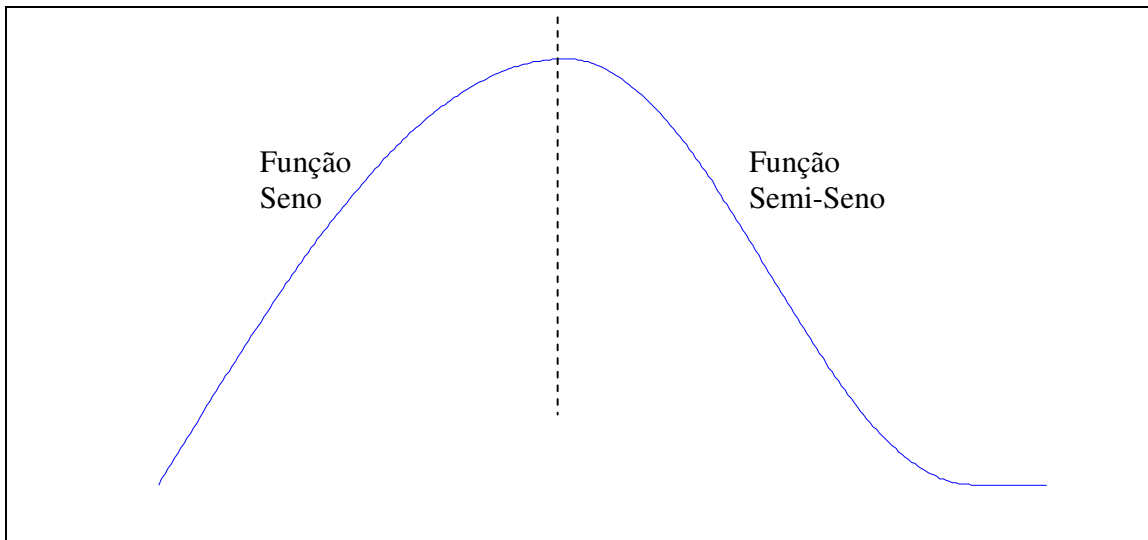


Figura 4.1 – Forma de onda da corrente injetada para cálculo de TRT

O código em MATLAB® do método tempo-freqüência encontra-se reproduzido e comentado no Apêndice 3. Tal método pode ser adaptado para calcular o efeito de qualquer sinal em rede linear.

#### 4.5 Utilização do método FFT

Com o objetivo de testar e validar o método proposto obteve-se, através do programa ATP, a resposta em freqüência da rede vista dos terminais do disjuntor em análise. A partir deste resultado de  $Z(\omega)$  e da corrente de curto-circuito calculada com o programa ANAFAS, do CEPEL, utilizou-se o método tempo-freqüência para realizar o cálculo da mesma TRT.

Abaixo apresentam-se resultados comparativos entre os cálculos de TRT realizados pelo ATP e o pelo método FFT no MATLAB®. Observa-se que os resultados do método FFT são muito próximos dos obtidos através da simulação em ATP.

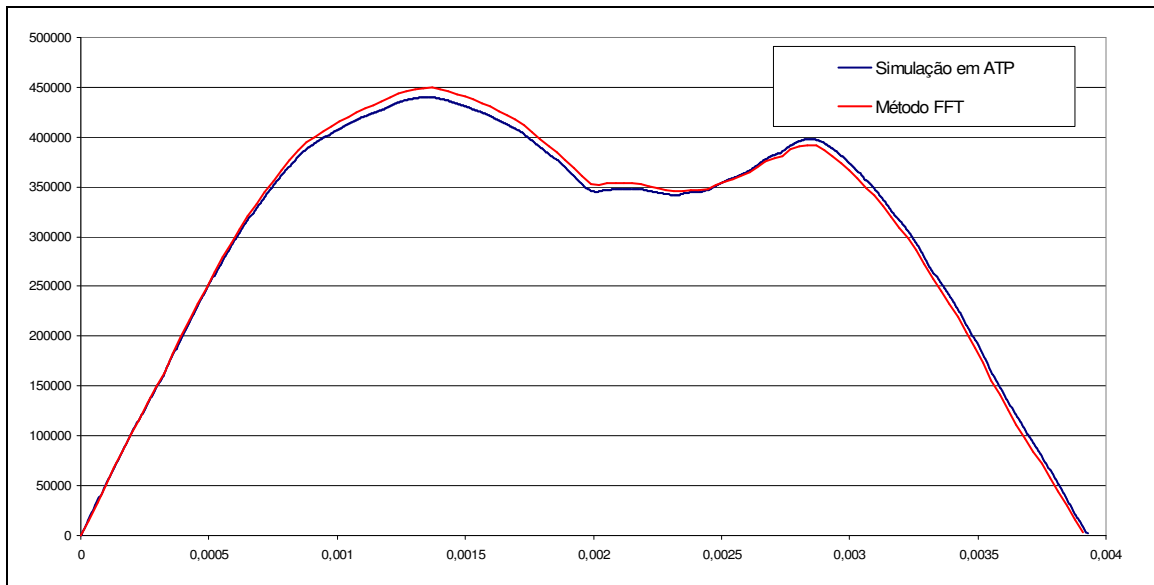


Figura 4.2 – Falta trifásica aterrada em Campos Novos – Abertura da LT 500 kV Campos Novos – Biguaçu de 290 km

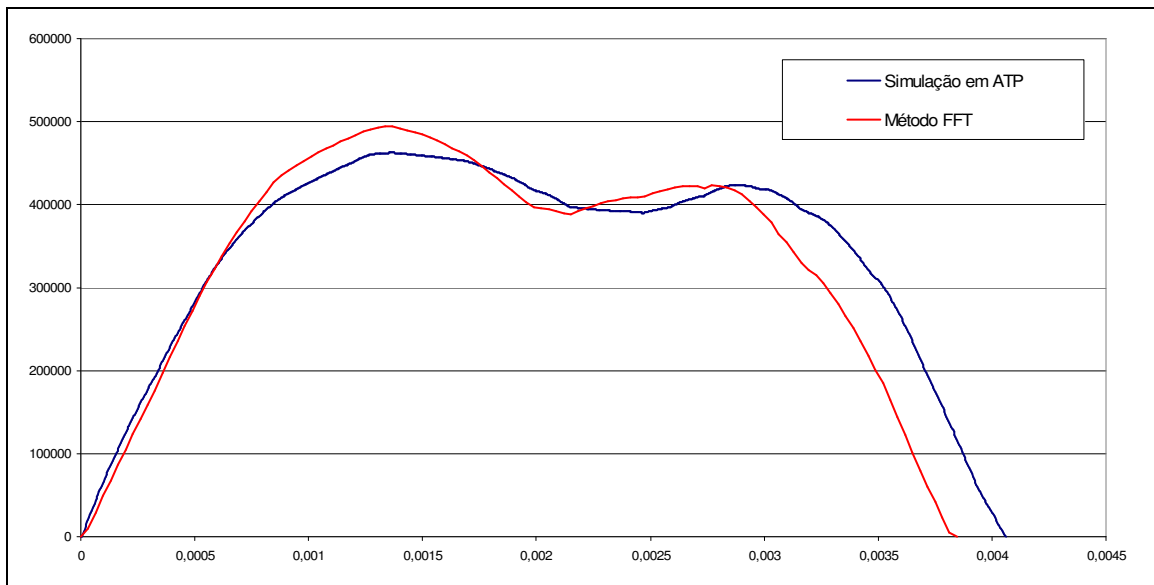


Figura 4.3 – Falta trifásica aterrada em Campos Novos – Abertura da LT kV Campos Novos – Pólo de 273 km

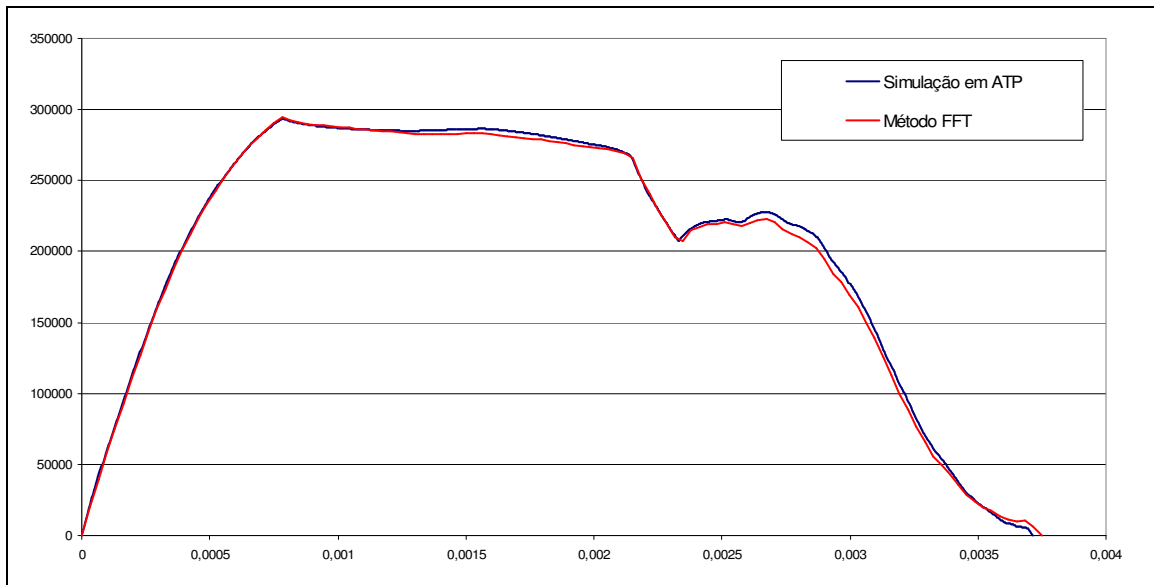


Figura 4.4 – Falta trifásica aterrada em Pólo – Abertura da LT 500 kV Campos Novos – Pólo de 273 km

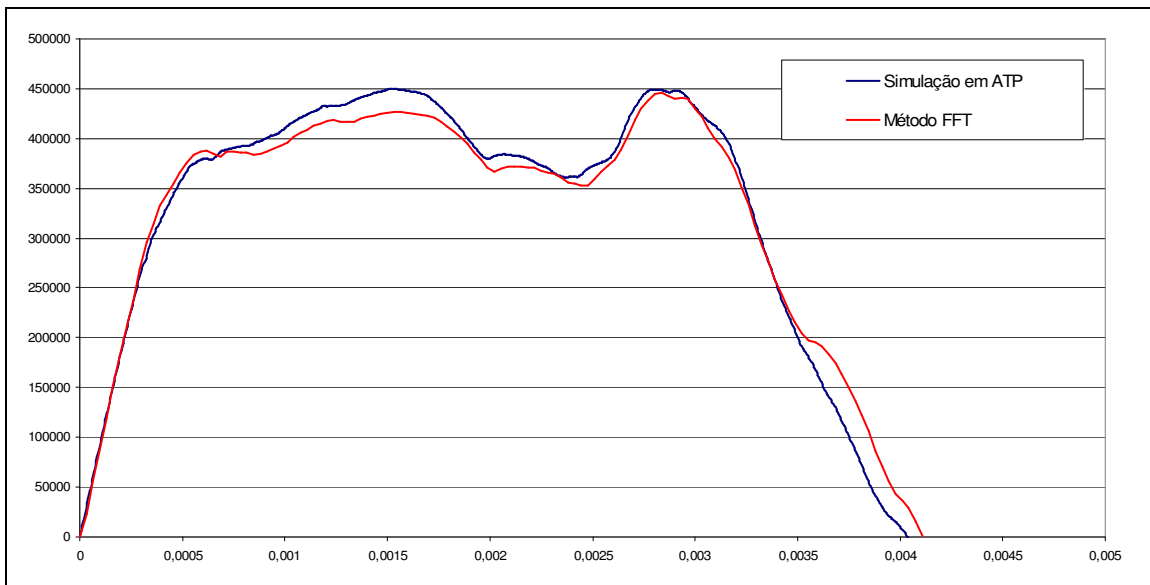


Figura 4.5 – Falta trifásica aterrada em Machadinho – Abertura da LT 500 kV Machadinho - Fictícia de 40 km

## 4.6 Erros na FFT

Como visto no item 4.3.1, as transformadas contínuas de Fourier são calculadas através de integrais entre menos e mais infinito, o que dificulta seu uso. As transformadas discretas de Fourier, aproximações das transformadas contínuas, são utilizadas em seu lugar permitindo a aplicação prática dessa poderosa ferramenta.

Essa aproximação introduz erros nos resultados. O algoritmo FFT usa, para fazer o cálculo das transformadas de Fourier,  $N$  amostras do sinal original, tomadas a intervalos regulares de  $\Delta t$  segundos. A taxa de amostragem é portanto dada por  $f_a = 1/\Delta t$ . O fenômeno denominado *aliasing* ocorre quando o sinal original tem componentes importantes em frequências superiores a  $f_a/2$ .

Uma alternativa para eliminar este fenômeno seria aplicar um filtro anti-*aliasing* ao sinal do tempo, o que não parece conveniente, pois altera o sinal. No caso de cálculo de TRT, tais erros podem ser minimizados aumentando-se a frequência de amostragem e o tamanho da janela de observação. As curvas mostradas nas Figuras 4.2 a 4.5 foram produzidas com uma frequência de amostragem equivalente a 4096 pontos e uma janela igual a 8 ciclos de 60Hz.

Para quantificar a influência dessas variáveis nos resultados, fizeram-se simulações considerando frequências de amostragem correspondentes aos seguintes números de amostras: 1024, 2048, 4096 e 8192. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.6. Comparando-se o valor máximo da TRT de cada uma das curvas com a referência, que é o caso simulado com o programa ATP (com  $\Delta t = 0,4 \mu s$ ), têm-se os seguintes erros:

- $N=1024$ : 2,92%;
- $N=2048$ : 0,28%;
- $N=4096$ : 0,22%;
- $N=8192$ : 0,20%.

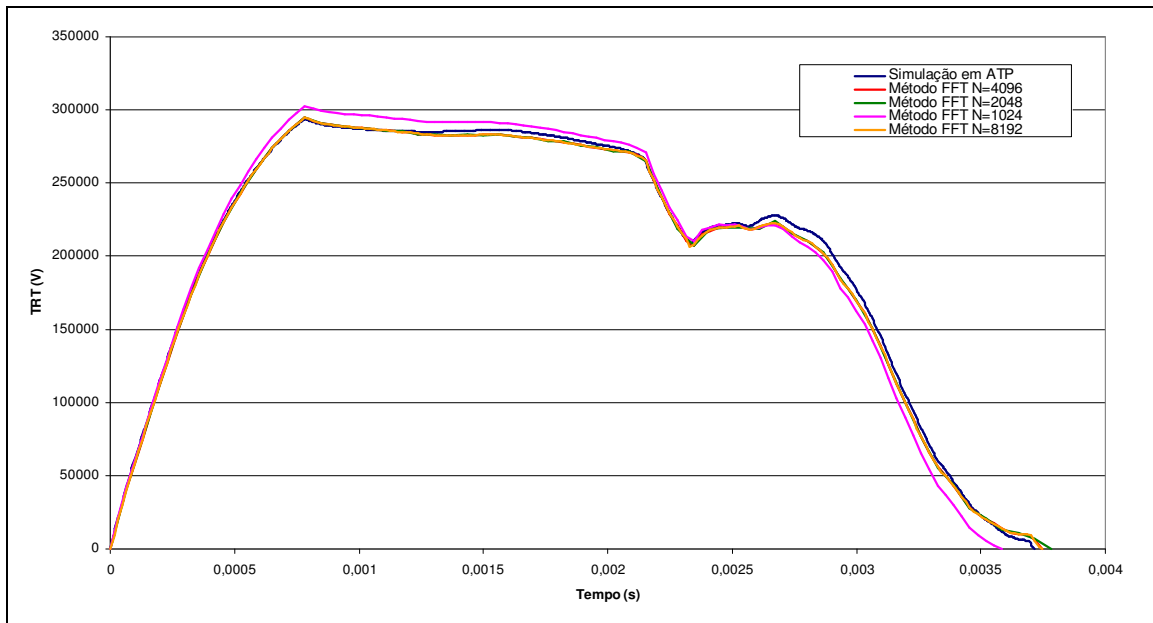


Figura 4.6 – Influência da frequência de amostragem nos resultados

Mostra-se dessa forma que o erro diminui quanto maior é a frequência de amostragem. O número de 4096 amostras utilizado neste trabalho para o cálculo da TRT apresenta um erro pequeno. Além disso, não se têm grandes ganhos no caso de utilizar-se um número maior.

Para ilustrar a influência do tamanho da janela de observação, o mesmo caso foi calculado com uma janela correspondente a 4 ciclos de 60 Hz. O resultado, que pode ser visto na Figura 4.7, mostra distorções consideravelmente maiores quando se utiliza a janela menor. Observa-se também que a janela correspondente a 8 ciclos de 60 Hz apresenta uma curva muito próxima da referência.

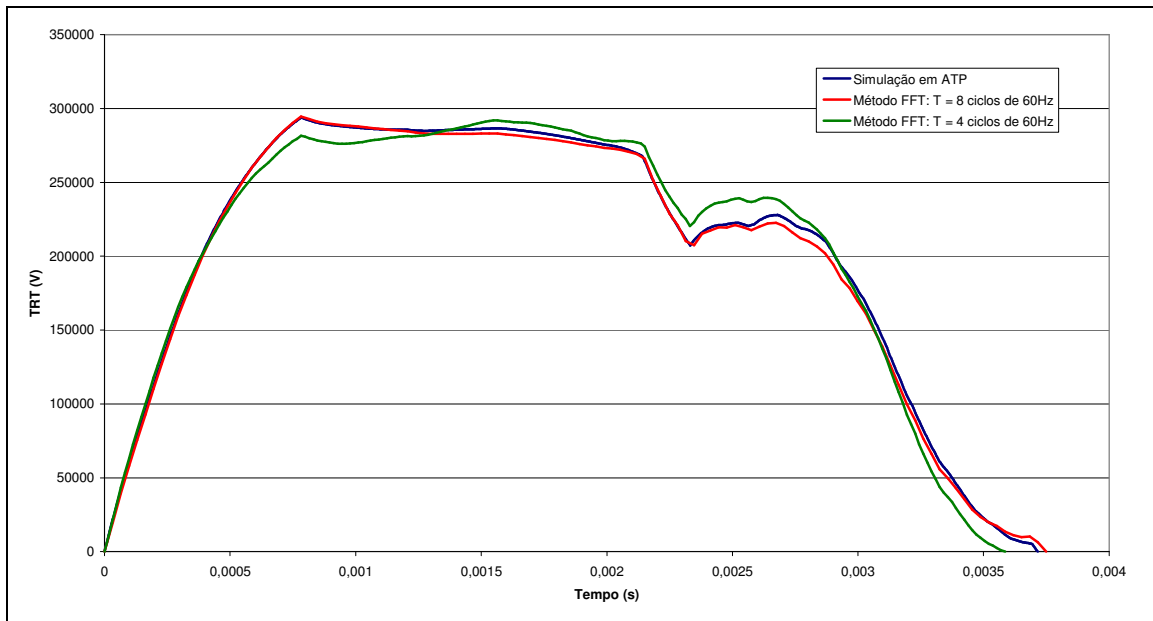


Figura 4.7 – Influência do tamanho da janela de observação

Observa-se que o fenômeno *aliasing* pode ocorrer também no domínio do tempo quando a convolução não cabe na janela de tempo. Dessa forma, ocorre um “vazamento” para a janela seguinte, afetando também, portanto, o início da janela, ou seja, o início da TRT. Este problema também é eliminado de forma simples aumentando-se o tamanho da janela.

Além dos erros acima comentados, existem erros numéricos causados pelo grande número de operações aritméticas envolvido no algoritmo das funções FFT e iFFT. Esses erros não são significativos considerando o nível de amostragem necessário para o cálculo da TRT de disjuntores. Este fato pode ser verificado no MATLAB® por meio da seguinte equação:

$$\text{err\%} = \text{abs}(\text{ifft}(\text{fft}(x)) - x) ./ x * 100 \quad (4.6)$$

Na equação 4.6, err% é um vetor que calcula os erros percentuais para cada elemento transferido (ida e volta) entre os domínios do tempo e da frequência. Para uma frequência de amostragem correspondente a 4096 amostras, o erro é inferior a 0,02%.



Conforme apresentado no item 3.2, o método proposto por Steurer *et al.* [28] para cálculo da TRT é similar ao Método FFT. Aquele utiliza, entretanto, uma aproximação: representa a corrente de curto-circuito por uma reta com a mesma derivada inicial, formando uma onda triangular. Tal aproximação pode causar erros na forma de onda da TRT.

Para estudar o efeito dessa aproximação, o mesmo caso utilizado para mostrar a influência da frequência de amostragem e do tamanho da janela foi calculado com a representação da corrente de curto-circuito em forma de triangular no lugar da representação em sua forma senoidal. Como se pode ver na Figura 4.8, na curva chamada “Método FFT (corrente triangular)”, tal aproximação introduziu erros grandes.

Um outro teste, onde a subida da corrente de curto-circuito foi representada na forma de rampa, é mostrado na Figura 4.8, na curva identificada por “Método FFT (corrente triangular com semi-seno de descida)”. Nesse caso, de forma a minimizar os erros causados pelo corte brusco da corrente de curto-circuito, foi utilizada a função semi-seno para a descida. Tal artifício foi utilizado no método FFT e trouxe bons resultados.

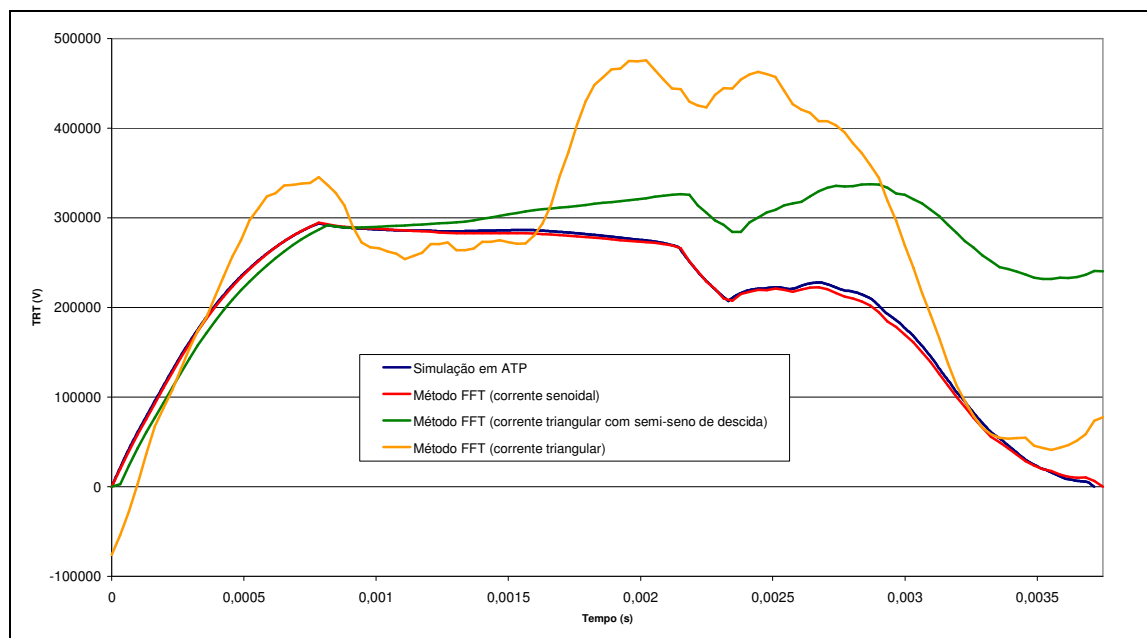


Figura 4.9 – Influência da representação da corrente de curto-circuito

Com a representação aproximada da corrente de curto-circuito, não foi possível evitar o fenômeno de *aliasing*. O método proposto por Steurer *et al.* [28] apresenta bons resultados em seus estudos, por se tratar de uma rede bastante simplificada (transformador em curto-circuito). Tal rede é formada pelas indutâncias do transformador com suas capacitâncias parasitas, além de um grande amortecimento provocado pelas perdas do transformador.

Dessa forma pode-se concluir que a representação da corrente de curto-circuito em sua forma senoidal é de grande importância para o cálculo da TRT de disjuntores instalados em redes de alta tensão densamente malhadas pelo método FFT.

#### **4.7 Utilização de programas de cálculo de harmônicos**

O ATP é o programa comumente utilizado para a simulação de TRT. A complexidade de seu emprego, entretanto, gera grandes esforços e tempo do corpo técnico dos agentes do SEB, considerando-se o grande número de disjuntores que necessitam esse tipo de análise.

O método tempo-freqüência pode ser utilizado para minimizar a necessidade de análises em ATP, contribuindo para tornar possível a detecção da superação por TRT de disjuntores em tempo hábil. Para tanto, pode-se lançar mão de um programa de cálculo de harmônicos e de um programa de análise de curto-circuito como, por exemplo, os programas HARMZS e ANAFAS do CEPEL, respectivamente.

Programas de cálculo de penetração harmônica permitem obter a resposta em freqüência da rede de seqüência positiva  $Z_1(\omega)$  vista de qualquer barra. O programa HARMZS, por exemplo, pode partir de dados de programas de cálculo de fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e curto-circuito para montar sua base de dados. Acredita-se que poderia ser implementado neste programa o cálculo para obtenção da resposta em freqüência da rede de seqüência zero  $Z_0(\omega)$ , já que tais dados encontram-se nos casos de curto-circuito.

A partir de  $Z_0(\omega)$  e  $Z_1(\omega)$  seria possível obter-se a impedância  $Z(\omega)$ , que é a resposta de impulso no domínio da freqüência da rede vista pelos contatos do

disjuntor e, além disso, é um dos principais dados de entrada do método FFT de cálculo de TRT.

No item 4.7.1 será apresentada uma forma de manipular as matrizes de resposta em freqüência de seqüências positiva e zero  $Z_0(\omega)$  e  $Z_1(\omega)$  de forma a obter-se a resposta em freqüência vista pelos contatos do disjuntor  $Z(\omega)$ .

O cálculo de  $Z_0(\omega)$  poderia ser implementado no programa HARMZS de forma similar a como é feito o cálculo de  $Z_1(\omega)$ , com as diferenças da rede de seqüência zero ser mais reduzida e da correção dos parâmetros elétricos ser feita de forma diferente. Como atualmente o programa HARMZS não está preparado para calcular  $Z_0(\omega)$ , será investigada no item 4.7.2 a possibilidade de calcular a TRT de forma simplificada utilizando-se somente a resposta em freqüência de seqüência positiva  $Z_1(\omega)$ .

#### 4.7.1 $Z(\omega)$ a partir de $Z_1(\omega)$ e $Z_0(\omega)$

O cálculo de  $Z(\omega)$  é feito com a rede representada de acordo com o tipo de curto-circuito e a seqüência de abertura de disjuntores e pólos. No caso que estamos considerando, supomos que ocorre um curto-circuito trifásico no “lado linha” de um disjuntor. Consideramos também que o disjuntor do lado oposto da LT interrompe a corrente de curto-circuito antes do disjuntor em análise. Por este motivo, o  $Z(\omega)$  é calculado com a LT aberta, interessando somente a impedância própria de barra do disjuntor.

A partir das impedâncias de seqüência de barra para cada freqüência é possível calcular as impedâncias de fase mediante transformação das impedâncias de seqüência para impedâncias de fase utilizando-se a conhecida matriz de transformação:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Onde:

$$a = e^{j120^\circ}$$

Conhecendo as impedâncias de barra de seqüências positiva  $Z_1(\omega)$  e zero  $Z_0(\omega)$  e sabendo que o sistema é equilibrado, tem-se:

$$Z_{seq}(\omega) = \begin{bmatrix} Z_0(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & Z_1(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & Z_2(\omega) \end{bmatrix}$$

Como pretendemos calcular a TRT de disjuntores do sistema de transmissão, e não de disjuntores de geradores, consideramos  $Z_2(\omega) = Z_1(\omega)$ . Dessa forma, o efeito das máquinas que contribui para que  $Z_2(\omega)$  seja diferente de  $Z_1(\omega)$  é desprezado.

Calcula-se a impedância de fase  $Z_{fase}(\omega)$  com a seguinte relação:

$$Z_{fase}(\omega) = A^{-1} \cdot Z_{seq}(\omega) \cdot A$$

$Z_{fase}$  é uma matriz 3x3 para cada freqüência. Para se obter a impedância vista dos contatos do primeiro pólo aberto do disjuntor (fase A), utilizamos o método de inversão parcial de Shipley-Coleman [35], [36], da forma descrita a seguir.

Consideramos a fase "A" como sendo o primeiro pólo a interromper a corrente de curto-circuito. Portanto, temos  $V_b = V_c = 0$ . Calculamos a admitância de fase  $Y_{fase}(\omega)$  invertendo a matriz  $Z_{fase}(\omega)$  com a função inv do MATLAB®, obtendo dessa forma a relação:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = [Y_{fase}]_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b = 0 \\ V_c = 0 \end{bmatrix}$$

Sabendo que a fase A está aberta e que nela estamos injetando o pulso de corrente de cancelamento da corrente de curto-circuito para se obter a TRT, efetuamos a

inversão parcial da primeira linha/coluna da matriz  $Y_{\text{fase}}$ , obtendo-se a matriz mista  $\underline{m}$  com a seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} Va \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = [m]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} -Ia \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

onde  $Ia$  é a corrente de curto-circuito e  $Va$  é a tensão através dos contatos do pólo A do disjuntor.

Note-se que no método de inversão parcial de Shipley-Coleman os sinais das posições invertidas parcialmente resultam com polaridade oposta. Para efetuar a inversão parcial mencionada foi desenvolvida uma rotina em MATLAB® reproduzida no Apêndice 3, juntamente com o código MATLAB® para obtenção de  $Z(\omega)$  a partir de  $Z_1(\omega)$  e  $Z_0(\omega)$ .

Para comprovar a aplicabilidade da forma mostrada acima de obtenção da resposta em frequência de fase  $Z(\omega)$  da rede vista pelos contatos do disjuntor da fase “A” a partir das respostas em frequência de seqüências positiva e zero de barra, obteve-se do caso de ATP as respostas  $Z_1(\omega)$  e  $Z_0(\omega)$  e aplicou-se o método acima descrito.

Calculou-se dessa forma o  $Z(\omega)$  a partir desses  $Z_1(\omega)$  e  $Z_0(\omega)$  e comparou-se com o  $Z(\omega)$  que pode ser obtido diretamente do programa ATP. Não será mostrada aqui tal comparação de resultados, pois, devido à exatidão deste cálculo, obtiveram-se curvas superpostas.

Portanto, comprova-se que se pode calcular a TRT de disjuntores com alta precisão a partir das respostas em frequência de seqüências positiva e zero, montando a matriz  $Z(\omega)$  a partir de  $Z_1(\omega)$  e  $Z_0(\omega)$ , considerando a rede equilibrada.

#### 4.7.2 Cálculo de TRT utilizando somente a rede de seqüência positiva

Considerando que a rede de seqüência positiva tem influência maior no cálculo de TRT que a rede de seqüência zero e que atualmente o programa HARMZS não efetua o cálculo da resposta em freqüência de seqüência zero, neste item é feita a investigação da possibilidade de utilizar somente a rede de seqüência positiva para tal cálculo.

A rede de seqüência zero pode ser estimada para o fim de cálculo simplificado de TRT, simplesmente fazendo-a idêntica à rede de seqüência positiva com um fator de correção. A Figura 4.10 mostra a TRT calculada estimando-se  $Z_0$  por meio das seguintes relações:

$$\frac{Z_0(\omega)}{Z_1(\omega)} = \frac{1}{10}, \frac{1}{3}, 1 \text{ e } 3$$

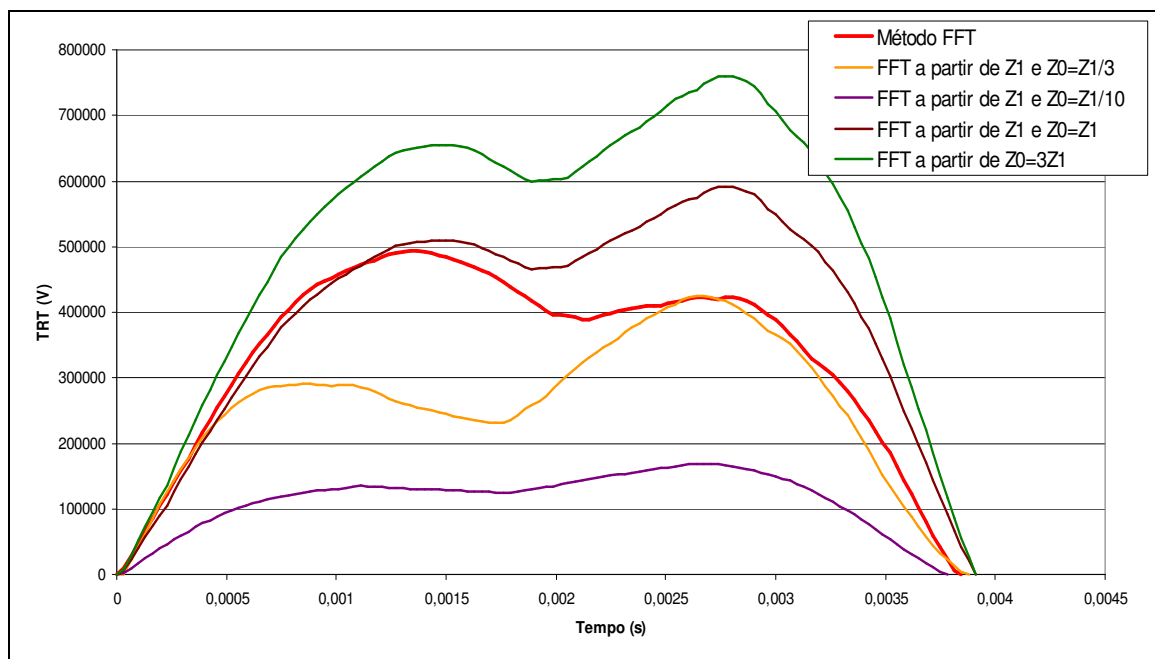


Figura 4.10 – Cálculo de TRT estimando  $Z_0$  a partir de  $Z_1$

A Figura 4.11 mostra a relação  $\frac{Z_0(\omega)}{Z_1(\omega)}$  em forma gráfica.

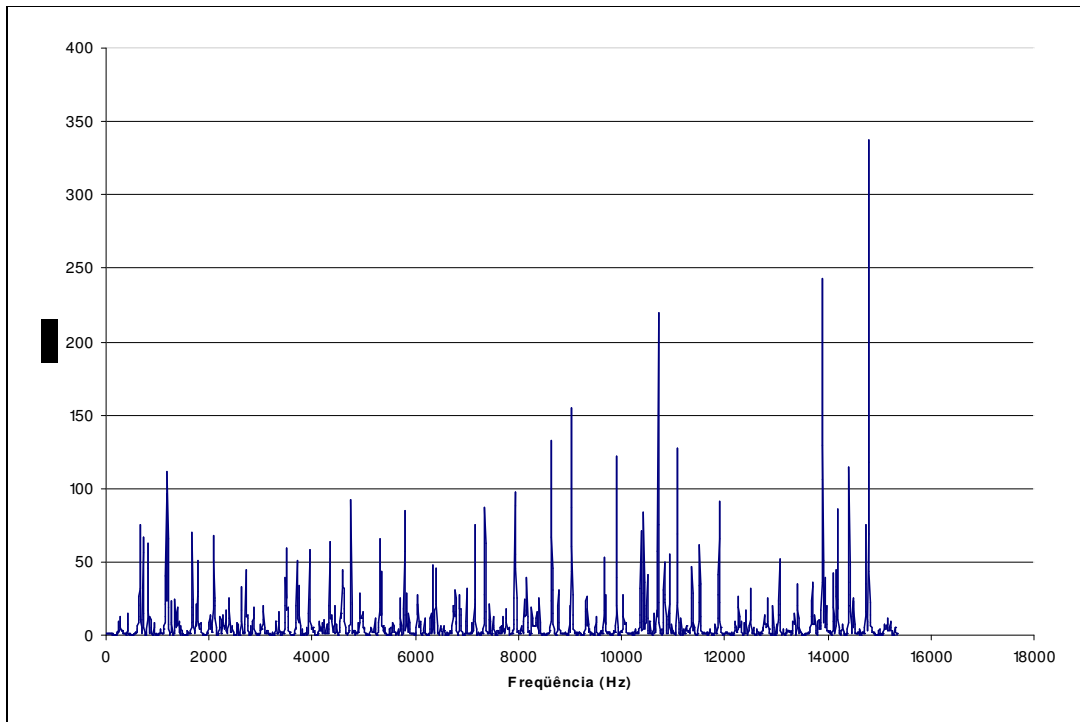


Figura 4.11 – Relação  $Z_0 / Z_1$  em função da frequência

A relação  $\frac{Z_0(\omega)}{Z_1(\omega)} = 3$  é geralmente encontrada para a frequência industrial de 60 Hz, no caso de uma rede de extra alta tensão densamente malhada, que é o caso da rede estudada neste trabalho. Entretanto, como se pode observar na Figura 4.11, tal relação é extremamente variável com a frequência.

Observando-se a Figura 4.10, nota-se que, em princípio, não parece ser possível calcular a TRT de disjuntores estimando-se  $Z_0$  através de uma relação linear e independente da frequência entre  $Z_0$  e  $Z_1$ . No entanto, uma estimativa dessa natureza pode ser explorada em trabalhos posteriores.

---

# 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

## 5.1 Conclusões

O cálculo da TRT de disjuntores através do programa ATP demanda uma trabalhosa preparação de simulações, onde a representação da rede e, principalmente, o ajuste de um caso inicial, necessitam um grande esforço. Visto que no âmbito da análise da superação existe um número cada vez mais elevado de disjuntores que precisam ter a TRT avaliada, surgiu a necessidade de pesquisar a utilização de metodologias alternativas que propiciassem maior agilidade na análise massiva da superação desses equipamentos.

Este trabalho se propôs a investigar métodos de cálculo da TRT que permitissem obter resultados com nível de precisão similar aos calculados com o programa ATP, procurando viabilizar a detecção da superação de disjuntores por TRT.

Analisando os fenômenos físicos relacionados com a superação de disjuntores, viu-se no Capítulo 2 que existem simplificações que podem ser utilizadas no cálculo da TRT. Não é necessário considerar, por exemplo, a assimetria da corrente de curto-circuito no cálculo, já que as solicitações de TRT são superiores quando o disjuntor interrompe correntes simétricas. Também observou-se nesse capítulo que a representação do arco elétrico traz resultados conservativos, além de não influenciar os resultados de forma significativa.

O método do IEEE Std C37.011-2005 [1] se propõe a calcular a TRT de disjuntores de maneira bastante simples. Entretanto, tal método representa as linhas de transmissão como cargas, supondo que não são fontes de corrente de curto-circuito. Nos sistemas malhados de alta tensão, entretanto, existem linhas alimentando o curto-circuito. Os resultados comparativos mostraram que essa simplificação pode provocar grandes erros no cálculo da TRT dos disjuntores de alta tensão de uma rede de transmissão malhada.



Pesquisas realizadas no decorrer deste trabalho mostraram que as análises no domínio da frequência têm vantagens em relação aos métodos baseados no domínio do tempo.

As transformadas de Fourier são poderosas ferramentas de cálculo digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos, pois permitem passar funções no domínio do tempo para o domínio da frequência. A principal desvantagem dessas transformadas é a necessidade de grande esforço computacional, devido ao grande número de operações matemáticas envolvido. Entretanto, tal tempo computacional foi reduzido a poucos segundos com o advento das transformadas rápidas de Fourier (FFT), aliadas ao desenvolvimento de microprocessadores extremamente velozes na última década.

Com o intuito de calcular a TRT de disjuntores associada a faltas terminais no enrolamento secundário de transformadores de potência, Steurer *et al.* [28] apresentaram em 2004 um método que injeta a corrente de curto-circuito, convertida ao domínio da frequência via FFT, na resposta em frequência da impedância de curto-circuito do transformador.

No Capítulo 4 foi proposto e avaliado o chamado método FFT, que é similar ao método de Steurer *et al.* Ao invés de calcular a TRT associada a faltas terminais de transformadores, o método FFT se propõe a calcular a TRT de qualquer disjuntor de uma rede. Portanto, em lugar da resposta em frequência da impedância de curto-circuito do transformador, usou-se a resposta em frequência da rede vista através dos contatos do primeiro pólo a interromper a corrente de curto-circuito.

O método de Steurer *et al.* faz uso de uma simplificação na forma de onda da corrente de curto-circuito, utilizando-a na forma triangular, ao invés da sua forma senoidal. Viu-se que tal simplificação não se aplica a redes de alta tensão densamente malhadas, embora mostre resultados consistentes em circuitos simples como os obtidos aplicando faltas terminais ao secundário de transformadores de potência.

O método FFT, que representa a corrente de curto-circuito na forma senoidal, apresentou resultados muito próximos aos obtidos com os cálculos em ATP, mostrando-se uma

ferramenta potencialmente poderosa para possibilitar análises mais rápidas na análise da superação por TRT de disjuntores.

Para calcular a TRT utilizando o método FFT, é necessário calcular previamente a resposta em frequência da rede vista através dos contatos do primeiro pólo a interromper a corrente de curto-circuito. Esse cálculo pode ser feito através da ferramenta *frequency scan* do ATP. Dessa forma, é possível calcular rapidamente a TRT de disjuntores de regiões onde a rede já está representada em ATP. A vantagem deste procedimento seria evitar o trabalhoso ajuste do caso em regime permanente no ATP, visto que o ajuste dos casos para simulação da TRT diretamente no ATP é muito trabalhoso.

Para possibilitar a avaliação do método FFT, calculou-se no programa ATP a resposta em frequência de uma rede de teste. Comparou-se então a TRT calculada com o método FFT com a calculada através do próprio programa ATP.

Outra forma de obtenção das impedâncias da rede em função da frequência é utilizando programas de cálculo de penetração harmônica, como o HARMZS, do CEPEL. Tal programa, no entanto, não permite obter a resposta em frequência de seqüência zero: ele trabalha somente com a base de dados de seqüência positiva.

## **5.2 Sugestões**

Trabalhos futuros poderão investigar a aplicabilidade do cálculo da resposta em frequência de seqüência positiva através do programa HARMZS no cálculo da TRT pelo método FFT. Após uma homologação desse cálculo, para fins de utilização no método FFT, o cálculo de seqüência zero poderia ser implementado de forma semelhante ao da seqüência positiva. Devido à presença de transformadores de potência com o secundário ligado em delta, a rede de seqüência zero é mais reduzida que a de seqüência positiva.

Outra investigação possível é a estimação simplificada dos dados de seqüência zero de maneira que se possa calcular a TRT de disjuntores utilizando somente as impedâncias de seqüência positiva como dado.

---

## APÊNDICE 1 - Cálculo da Corrente Assimétrica

---

A Figura A1.1 apresenta um circuito RL série alimentado por uma fonte de tensão senoidal e representa um equivalente de curto-circuito em algum ponto do sistema.

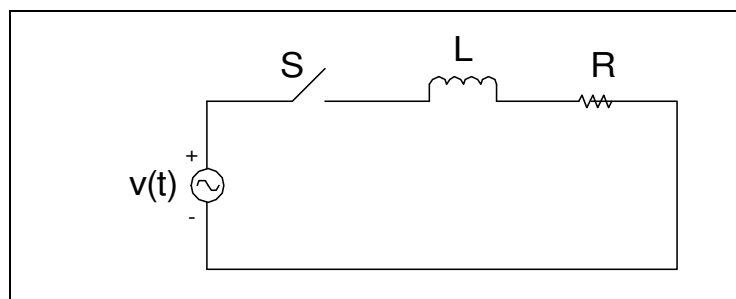


Figura A1.1 – Equivalente de curto-circuito

Em regime permanente, o circuito apresenta o seguinte fator de potência:

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}} \quad (\text{A1.1})$$

onde:

$\omega$  é a frequência natural da rede

R é a resistência equivalente de curto-circuito

L é a indutância equivalente de curto-circuito

O fechamento da chave S representa o estabelecimento do curto-circuito. Nesse momento, a seguinte equação representa o circuito [34]:

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} = v(t) = V_M \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta) \quad (\text{A1.2})$$

O ângulo  $\theta$  representa o instante do em que o curto-circuito se estabeleceu. Em regime permanente, a corrente terá o valor  $V/Z$  e estará atrasada em fase por um ângulo  $\varphi$ . Entretanto, exceto por alguma circunstância especial, a corrente não pode atingir esse valor instantaneamente, devido à inércia de corrente da indutância presente no circuito.

A equação (A1.2) pode ser reescrita:

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} = v(t) = V_M \cdot [\text{sen}(\omega \cdot t) \cdot \cos \theta + \cos(\omega \cdot t) \cdot \text{sen} \theta] \quad (\text{A1.3})$$

Temos, por Laplace, no domínio da frequência:

$$R \cdot I(s) + s \cdot L \cdot I(s) - L \cdot I(0) = V_M \cdot \left( \frac{\omega \cdot \cos \theta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \cdot \text{sen} \theta}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (\text{A1.4})$$

Como  $I(0)=0$  e como  $\text{sen} \theta$  e  $\cos \theta$  são constantes, temos a seguinte solução para  $I(s)$ :

$$I(s) = \frac{V_M}{L} \cdot \frac{1}{s + R/L} \cdot \left( \frac{\omega \cdot \cos \theta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \cdot \text{sen} \theta}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (\text{A1.5})$$

A equação acima pode ser reescrita como a seguir:

$$I(s) = \frac{A}{(s + \alpha) \cdot (s^2 + \omega^2)} + \frac{Bs}{(s + \alpha) \cdot (s^2 + \omega^2)} \quad (\text{A1.6})$$

onde

$$A = \frac{V_M}{L} \cdot \omega \cdot \cos \theta ;$$

$$B = \frac{V_M}{L} \cdot \text{sen} \theta ;$$

$$\alpha = R / L .$$

Sabendo que [[34]]:

$$\frac{1}{(s + \alpha) \cdot (s^2 + \omega^2)} = \frac{1}{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \left[ \frac{1}{s + \alpha} - \frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{\alpha}{s^2 + \omega^2} \right] \quad (\text{A1.7})$$

Temos:

$$L^{-1} \left\{ \frac{1}{(s + \alpha) \cdot (s^2 + \omega^2)} \right\} = \frac{1}{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \left( e^{-\alpha t} - \cos(\omega \cdot t) + \frac{\alpha}{\omega} \text{sen}(\omega \cdot t) \right) \quad (\text{A1.8})$$

Para resolver a parcela  $\frac{Bs}{(s + \alpha) \cdot (s^2 + \omega^2)}$ , utilizamos a derivada da equação (A1.8):

$$L^{-1} \left\{ \frac{s}{(s + \alpha) \cdot (s^2 + \omega^2)} \right\} = \frac{1}{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \left( -\alpha \cdot e^{-\alpha t} + \omega \text{sen}(\omega \cdot t) + \alpha \cdot \cos(\omega \cdot t) + 1 - 1 + 0 \right) \quad (\text{A1.9})$$

Temos, portanto, a seguinte solução para  $i(t)$ :

$$i(t) = \frac{V_M}{L(\alpha^2 + \omega^2)} \left\{ \begin{aligned} &\omega \cdot \cos \theta \cdot \left[ e^{-\alpha t} - \cos(\omega \cdot t) + \frac{\alpha}{\omega} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \right] + \\ &\text{sen} \theta \cdot \left[ \alpha \cdot \cos(\omega \cdot t) + \omega \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) - \alpha \cdot e^{-\alpha t} \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{A1.10})$$

$$i(t) = \frac{V_M}{L(\alpha^2 + \omega^2)} \left\{ \begin{aligned} &[\omega \cdot \cos \theta - \alpha \cdot \text{sen} \theta] \cdot e^{-\alpha t} + [\omega \cdot \cos \theta - \alpha \cdot \text{sen} \theta] \cdot \cos(\omega \cdot t) + \\ &[\omega \cdot \cos \theta + \alpha \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A1.11})$$

Da equação A.1, temos:

$$\text{sen } \varphi = \frac{\omega}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}} \quad (\text{A1.12}) \quad \text{e}$$

$$\text{cos } \varphi = \frac{\alpha}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}} \quad (\text{A1.13})$$

Então, como:

$$\omega \cdot \text{cos } \theta - \alpha \cdot \text{sen } \theta = \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \text{sen } \varphi \cdot \text{cos } \theta - \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \text{cos } \varphi \cdot \text{sen } \theta \quad (\text{A1.14})$$

$$= \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) \quad (\text{A1.15})$$

e como:

$$\alpha \cdot \text{cos } \theta + \omega \cdot \text{sen } \theta = \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \text{cos } \varphi \cdot \text{cos } \theta + \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \theta \quad (\text{A1.16})$$

$$= \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \text{cos}(\varphi - \theta) \quad (\text{A1.17})$$

Temos:

$$i(t) = \frac{V_M \cdot \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}}{L \cdot (\alpha^2 + \omega^2)} \cdot \{ \text{sen}(\varphi - \theta) \cdot e^{-\alpha t} + \text{sen}(\varphi - \theta) \cdot \text{cos}(\omega \cdot t) + \text{cos}(\varphi - \theta) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \} \quad (\text{A1.18})$$

Simplificando:

$$i(t) = \frac{V_M}{L \cdot \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}} \cdot \{ -\text{sen}(\theta - \varphi) \cdot e^{-\alpha t} + \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi - \theta) \} \quad (\text{A1.19})$$

Sendo:

$$\tau = 1/\alpha = L/R \quad (\text{A1.20})$$

Então:

$$i(t) = I_M \cdot \left\{ \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi - \theta) - \text{sen}(\theta - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} \quad (\text{A1.21})$$

onde

$$I_M = \frac{V_M}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (\text{A1.22})$$

$i(t)$  é a corrente de curto-circuito

---

## APÊNDICE 2 - Modelagem do sistema no ATP

---

### A2.1 Introdução

Para se fazer uma simulação de transitórios eletromagnéticos em ATP – *Alternative Transients Program* – é necessário inicialmente definir a sub-rede a ser estudada. A modelagem de uma rede real completa seria desnecessária e extremamente laboriosa. Os fenômenos transitórios são rapidamente amortecidos e não se propagam a grandes distâncias elétricas. Portanto, foram selecionadas as barras mais importantes no entorno da Linha de Transmissão 525 kV Campos Novos – Pólo, de acordo com o “critério duas barras”: considerar no modelo todas as barras conectadas à LT em questão, e as todas as barras conectadas a estas.

Seguindo o “critério duas barras”, chegamos ao subsistema representado na Figura 3.7 do Capítulo 3.

As linhas de transmissão foram modeladas a partir de seus parâmetros distribuídos que foram calculados com a sub-rotina LINE CONSTANTS do ATP para frequência de 1 kHz. Não foi utilizada uma modelagem com variação dos parâmetros com a frequência, pois, para estudo de TRT, as frequências de interesse se restringem a poucos quilohertz. Os transformadores do sistema foram representados pelo cartão TRANSFORMER que simula sua influência através das relações de tensão. O reator presente no subsistema foi representado através de sua impedância para a terra.

### A2.2 Equivalentes de curto-circuito

Para o cálculo dos equivalentes, foi utilizado o programa ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas – do CEPEL. Partindo de uma rede completa, este programa é capaz de



calcular, a partir de um conjunto de barras definido pelo usuário, o as impedâncias equivalentes necessárias à fiel representação das potências de curto-circuito envolvidas.

### **A2.3 Ajuste dos fluxos de potência**

Depois de modelado o subsistema através de suas impedâncias, que representam as potências de curto-circuito das barras escolhidas, é necessário ajustar, através das tensões das fontes, os fluxos de potência que trafegam pelos elementos passivos. Para tanto, foi escolhido um caso de fluxo de potência de carga pesada – pior caso para TRT.

Ajustando as tensões das fontes podem-se obter os fluxos de potência iguais ao do caso escolhido. É importante levar em consideração as quedas de tensão nas impedâncias equivalentes inseridas no subsistema.

### **A2.4 Modelagem da seqüência de eventos**

De posse do “caso base” de ATP que, em regime permanente, representa não só as potências de curto-circuito, mas também as tensões, ângulos e fluxos de potência de um caso de carga pesada, foi modelada a seqüência de eventos representativa de um estudo de TRT, qual seja:

- Simulação em regime permanente;
- Abertura do disjuntor do terminal remoto da LT;
- Abertura do disjuntor em análise;
- Monitoramento da tensão desenvolvida entre os pólos do disjuntor.

## A2.5 Caso de ATP para simulação de TRT

```

BEGIN NEW DATA CASE
C
C      MISCELLANEOUS DATA
C
C
C DELTAT      TMAX      XOPT      COPT      EPSLIN      TOLMAT      TSTART
      .4E-6      0.05      60.0      60.0      1.E-12
C IOUT      IPLOT      IDOUBL      KSSOUT      MAXOUT      IPUN      MEMSAV      ICAT      NENERG      IPRSUP
      0010      1      1      1      1      1
C
C
C*****
C      ESTUDO DE TRT:
C      LT 525 KV CAMPOS NOVOS - PÓLO
C      DISJUNTOR DE CAMPOS NOVOS
C      FALTA NO LADO LINHA DO DISJUNTOR DE CAMPOS NOVOS
C      ABERTURA DE SOMENTE UM PÓLO
C*****
C
C -----
C      LINHAS DE TRANSMISSAO EM 500 KV
C -----
$VINTAGE, 1
C
C LT C.NOVOS - MACHADINHO 500 KV - CIRCUITOS 1 E 2
C
C [BUS1] [BUS2]      [      R      ] [      Xl      ] [      Yc      (uS) ] [      KM      ] I
-1CN500AMA500A      0.3361      1.3368      3.1830      44.0      0
-2CN500BMA500B      0.0189      0.3172      5.2101      44.0      0
-3CN500CMA500C
-1CN500AMA500A      0.2588      1.0141      3.1404      50.6      0
-2CN500BMA500B      0.0257      0.3193      5.1649      50.6      0
-3CN500CMA500C
C
C LT C.NOVOS - AREIA 500 KV
C
C [BUS1] [BUS2]      [      R      ] [      Xl      ] [      Yc      (uS) ] [      KM      ] I
-1CN500AAR500A      0.3464      1.3191      3.1291      176.3      0
-2CN500BAR500B      0.0254      0.3201      5.1649      176.3      0
-3CN500CAR500C
C
C LT CURITIBA - AREIA 500 KV
C
C [BUS1] [BUS2]      [      R      ] [      Xl      ] [      Yc      (uS) ] [      KM      ] I

```

-1CR500AAR500A	0.3464	1.3191	3.1291	235.2	0
-2CR500BAR500B	0.0254	0.3201	5.1649	235.2	0
-3CR500CAR500C					
C					
C LT C.NOVOS - BLUMENAU 500 KV					
C					
C [BUS1][BUS2]	[ R ]	[ Xl ]	[ Yc (uS)]	[ KM ]	I
-1CN500ABL500A	0.3464	1.3191	3.1291	252.0	0
-2CN500BBL500B	0.0254	0.3201	5.1649	252.0	0
-3CN500CBL500C					
C					
C LT C.NOVOS - BIGUACU 500 KV					
C					
C [BUS1][BUS2]	[ R ]	[ Xl ]	[ Yc (uS)]	[ KM ]	I
-1CN500ABI500A	0.3666	1.3425	3.3063	290.0	0
-2CN500BBI500B	0.0171	0.3303	5.0405	290.0	0
-3CN500CBI500C					
C					
C					
C LT BIGUACU - BLUMENAU 500 KV					
C					
C [BUS1][BUS2]	[ R ]	[ Xl ]	[ Yc (uS)]	[ KM ]	I
-1BI500ABL500A	0.3666	1.3425	3.3063	85.0	0
-2BI500BBL500B	0.0171	0.3303	5.0405	85.0	0
-3BI500CBL500C					
C					
C LT CURITIBA - BLUMENAU 500 KV					
C					
C [BUS1][BUS2]	[ R ]	[ Xl ]	[ Yc (uS)]	[ KM ]	I
-1CR500ABL500A	0.3464	1.3191	3.1291	138.0	0
-2CR500BBL500B	0.0254	0.3201	5.1649	138.0	0
-3CR500CBL500C					
C					
C LT C.NOVOS - CAXIAS 500 KV					
C					
C [BUS1][BUS2]	[ R ]	[ Xl ]	[ Yc (uS)]	[ KM ]	I
-1CN500ACI500A	0.3334	1.2079	3.1291	200.0	0
-2CN500BCI500B	0.0256	0.3197	5.1649	200.0	0
-3CN500CCI500C					
C					
C -----					
C LINHAS INSERIDAS PARA O ESTUDO DA LT 525 KV CAMPOS NOVOS - POLO					
C -----					
C					
C LT MACHADINHO - ITA 500 KV					
C					
C [BUS1][BUS2]	[ R ]	[ Xl ]	[ Yc (uS)]	[ KM ]	I
-1MA500AIT500A	0.2894	1.1235	3.1291	79.1	0

-2MA500BIT500B 0.0226 0.3197 5.1649 79.1 0

-3MA500CIT500C

C

C LT GRAVATAI - CAXIAS 500 KV

C

C [BUS1][BUS2] [ R ][ Xl ][ Yc (uS)][ KM ] I

-1GR500ACI500A 0.3334 1.2079 3.1291 81.0 0

-2GR500BCI500B 0.0256 0.3197 5.1649 81.0 0

-3GR500CCI500C

C

C LT ITA - CAXIAS 500 KV

C

C [BUS1][BUS2] [ R ][ Xl ][ Yc (uS)][ KM ] I

-1IT500ACI500A 0.3334 1.2079 3.1291 255.0 0

-2IT500BCI500B 0.0256 0.3197 5.1649 255.0 0

-3IT500CCI500C

C

C LT GRAVATAI - POLO 500 KV

C

C [BUS1][BUS2] [ R ][ Xl ][ Yc (uS)][ KM ] I

-1GR500APO500A 0.3446 1.3195 3.1291 34.0 0

-2GR500BPO500B 0.0254 0.3201 5.1649 34.0 0

-3GR500CPO500C

C

C LT POLO - ITA 500 KV

C

C [BUS1][BUS2] [ R ][ Xl ][ Yc (uS)][ KM ] I

-1PO500AIT500A 0.3446 1.3195 3.1291 314.0 0

-2PO500BIT500B 0.0254 0.3201 5.1649 314.0 0

-3PO500CIT500C

C

C LT CAMPOS NOVOS - POLO 500 KV

C

C [BUS1][BUS2] [ R ][ Xl ][ Yc (uS)][ KM ] I

-1CNPO5APOCN5A 0.3819 1.3506 3.3073 273.0 0

-2CNPO5BPOCN5B 0.0237 0.3328 4.9957 273.0 0

-3CNPO5CPOCN5C

C

\$VINTAGE, 0

C

C

C

C -----

C TRANSFORMADORES DE 3 ENROLAMENTOS Y-ATERRADO, Y-ATERRADO, DELTA

C PARA REFERENCIAR A TERRA O ENROLAMENTO EM DELTA, FORAM ADOTADAS CAPACITANCIAS

C DE 3 nF ENTRE CADA UM DOS TERMINAIS E A TERRA

C -----

C

C \* TRAF0 POLO 1 500 / 230 KV \*

C

TRANSFORMER				TPO1A
9999				
1PO230A	0.069	3.439	132.79	
2PO500A	0.358	17.92	300.08	
3PO_13APO_13B	0.001	0.086	13.80	
TRANSFORMER TPO1A				TPO1B
1PO230B				
2PO500B				
3PO_13BPO_13C				
TRANSFORMER TPO1A				TPO1C
1PO230C				
2PO500C				
3PO_13CPO_13A				
PO_13A			0.003	
PO_13B			0.003	
PO_13C			0.003	

C

C \* TRAF0 POLO 2 500 / 230 KV \*

C

TRANSFORMER				TPO2A
9999				
1PO230A	0.069	3.439	132.79	
2PO500A	0.358	17.92	300.08	
3PO_13APO_13B	0.001	0.086	13.80	
TRANSFORMER TPO2A				TPO2B
1PO230B				
2PO500B				
3PO_13BPO_13C				
TRANSFORMER TPO2A				TPO2C
1PO230C				
2PO500C				
3PO_13CPO_13A				
PO_13A			0.003	
PO_13B			0.003	
PO_13C			0.003	

C

C \* TRAF0 POLO 3 500 / 230 KV \*

C

TRANSFORMER				TPO3A
9999				
1PO230A	0.069	3.439	132.79	
2PO500A	0.358	17.92	300.08	
3PO_13APO_13B	0.001	0.086	13.80	
TRANSFORMER TPO3A				TPO3B
1PO230B				
2PO500B				

3PO\_13BPO\_13C  
 TRANSFORMER TPO3A TPO3C  
 1PO230C  
 2PO500C  
 3PO\_13CPO\_13A  
 PO\_13A 0.003  
 PO\_13B 0.003  
 PO\_13C 0.003  
 C  
 C \* TRAF0 CAMPOS NOVOS 1 500 / 230 KV \*  
 C  
 TRANSFORMER TCN1A  
 9999  
 1CN230A 0.069 3.439 135.31  
 2CN500A 0.358 17.92 303.11  
 3CN\_13ACN\_13B 0.001 0.086 13.80  
 TRANSFORMER TCN1A TCN1B  
 1CN230B  
 2CN500B  
 3CN\_13BCN\_13C  
 TRANSFORMER TCN1A TCN1C  
 1CN230C  
 2CN500C  
 3CN\_13CCN\_13A  
 CN\_13A 0.003  
 CN\_13B 0.003  
 CN\_13C 0.003  
 C  
 C \* TRAF0 CAMPOS NOVOS 2 500 / 230 KV \*  
 C  
 TRANSFORMER TCN2A  
 9999  
 1CN230A 0.069 3.439 135.31  
 2CN500A 0.358 17.92 303.11  
 3CN\_13ACN\_13B 0.001 0.086 13.80  
 TRANSFORMER TCN2A TCN2B  
 1CN230B  
 2CN500B  
 3CN\_13BCN\_13C  
 TRANSFORMER TCN2A TCN2C  
 1CN230C  
 2CN500C  
 3CN\_13CCN\_13A  
 CN\_13A 0.003  
 CN\_13B 0.003  
 CN\_13C 0.003  
 C  
 C \* TRAF0 CAMPOS NOVOS 3 500 / 230 KV \*

```

C
TRANSFORMER TCN3A
          9999
1CN230A      0.069  3.439  135.31
2CN500A      0.358  17.92  303.11
3CN_13ACN_13B 0.001  0.086  13.80
  TRANSFORMER TCN3A      TCN3B
1CN230B
2CN500B
3CN_13BCN_13C
  TRANSFORMER TCN3A      TCN3C
1CN230C
2CN500C
3CN_13CCN_13A
  CN_13A      0.003
  CN_13B      0.003
  CN_13C      0.003

C
C -----
C      REATORES
C -----
C
C
$VINTAGE, 1
C      RRRRRRRRRRRRRRLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLL
C
  BL500A      6.13      1837.5      0
  BL500B      6.13      1837.5      0
  BL500C      6.13      1837.5      0

C
C
$VINTAGE, 0
C -----
C      EQUIVALENTES
C -----
C
C  BLUMENAU 500 KV
C      RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51BL500AEQBL5A 1.7676      30.785
52BL500BEQBL5B 32.121      204.03
53BL500CEQBL5C
C
C
C  GRAVATAI 500 KV
C      RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51GR500AEQGR5A 0.5342      31.507
52GR500BEQGR5B 2.9861      274.04
53GR500CEQGR5C

```

C		
C		
C	ITA 500 KV	
C		RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51IT500AEQIT5A	0.8125	18.962
52IT500BEQIT5B	1.0295	39.296
53IT500CEQIT5C		
C		
C		
C	BIGUACU 500 KV	
C		RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51BI500AEQBI5A	2.7383	62.746
52BI500BEQBI5B	23.005	312.15
53BI500CEQBI5C		
C		
C		
C	AREIA 500 KV	
C		RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51AR500AEQAR5A	1.2089	14.892
52AR500BEQAR5B	0.8305	19.089
53AR500CEQAR5C		
C		
C		
C	MACHADINHO 500 KV	
C		RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51MA500AEQMA5A	0.0000	37.300
52MA500BEQMA5B	0.0000	83.423
53MA500CEQMA5C		
C		
C	CAXIAS 500 KV	
C		RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51CI500AEQCI5A	1.8188	35.062
52CI500BEQCI5B	11.216	203.74
53CI500CEQCI5C		
C		
C	CURITIBA 500 KV	
C		RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51CR500AEQCR5A	1.5545	20.884
52CR500BEQCR5B	3.4941	44.538
53CR500CEQCR5C		
C		
C	CAMPOS NOVOS 230 KV	
C		RRRRRLLLLLLLLLLLLL
51CN230AEQCN2A	0.4363	6.8812
52CN230BEQCN2B	0.5877	10.839
53CN230CEQCN2C		
C		
C	POLO 230 KV	



```

C          RRRRRLLLLLLLLLLLLLL
51PO230AEQPO2A      2.6942      12.371
52PO230BEQPO2B      2.8741      24.919
53PO230CEQPO2C
C
C  BLUMENAU - BIGUACU 500 KV - IMPEDÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA
C          RRRRRLLLLLLLLLLLLLL
51BL500ABI500A      279.84       934.84
52BL500BBI500B      45.839       211.40
53BL500CBI500C
C
C  CURITIBA - AREIA 500 KV - IMPEDÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA
C          RRRRRLLLLLLLLLLLLLL
51CR500AAR500A      107.49       504.20
52CR500BAR500B      7.8360       80.243
53CR500CAR500C
C
C
C  -----
C  EQUIVALENTE DE TRANSFERENCIA ENTRE POLO 230 KV E GRAVATAI 500 KV
C  -----
C
C  TRANSFORMER          AUXI1A
C          9999
C  1GR230A             .00001 132.8
C  2GR500A             .00001 303.1
C  TRANSFORMER AUXI1A          AUXI1B
C  1GR230B             .00001 132.8
C  2GR500B             .00001 303.1
C  TRANSFORMER AUXI1A          AUXI1C
C  1GR230C             .00001 132.8
C  2GR500C             .00001 303.1
51GR230APO230A      9.168 25.333
52GR230BPO230B      0.847 6.7458
53GR230CPO230C
C
C
C  -----
C          FALTA
C  -----
C
C  CAMPOS NOVOS 500 KV
$VINTAGE, 1
C          RRRRRRRRRRRRRRLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLL
C  FALTA      00.001           0
C  FALTAB     00.001           0
C  FALTAC     00.001           0
C  FALTA     1.E6

```

\$VINTAGE, 0

BLANK BRANCH

C

C

C

C

DISJUNTORES

C

C

C FALTA TRIFASICA EM CAMPOS NOVOS 500 KV

CNPO5AFALTAA -1.0 1.00

CNPO5BFALTAB -1.0 1.00

CNPO5CFALTAC -1.0 1.00

C

C DISJUNTOR DE CAMPOS NOVOS - POLO 500 KV

C

CN500ACNPO5A -1.0 0.015 2

C CN500BCNBI5B -1.0 0.015 2

C CN500CCNBI5C -1.0 0.015 2

C

PO500APOCN5A -1.0 0.010

PO500BPOCN5B -1.0 0.010

PO500CPOCN5C -1.0 0.010

C

C

BLANK SWITCH

C

C

C

C

FONTES

C

C

C BIGUACU 500 KV

C

14EQBI5A 500260.4 60.0 -36.88 -1.

14EQBI5B 500260.4 60.0 -156.88 -1.

14EQBI5C 500260.4 60.0 83.12 -1.

C

C POLO 230 KV

C

14EQPO2A 185337.0 60.0 -34.05 -1.

14EQPO2B 185337.0 60.0 -154.05 -1.

14EQPO2C 185337.0 60.0 85.95 -1.

C

C ITA 500 KV

C

14EQIT5A 432587.1 60.0 2.86 -1.

14EQIT5B 432587.1 60.0 -117.14 -1.

14EQIT5C 432587.1 60.0 122.86 -1.

```

C
C   GRAVATAI 500 KV
C
14EQGR5A   385339.5   60.0   -79.58   -1.
14EQGR5B   385339.5   60.0  -199.58   -1.
14EQGR5C   385339.5   60.0    40.42   -1.
C
C   CURITIBA 500 KV
C
14EQCR5A   416295.4   60.0   -28.41   -1.
14EQCR5B   416295.4   60.0  -148.41   -1.
14EQCR5C   416295.4   60.0    91.59   -1.
C
C   CAMPOS NOVOS 230 KV
C
14EQCN2A   178257.3   60.0     4.63   -1.
14EQCN2B   178257.3   60.0  -115.37   -1.
14EQCN2C   178257.3   60.0   124.63   -1.
C
C   BLUMENAU 500 KV
C
14EQBL5A   340722.4   60.0   -57.90   -1.
14EQBL5B   340722.4   60.0  -177.90   -1.
14EQBL5C   340722.4   60.0    62.10   -1.
C
C   CAXIAS 500 KV
C
14EQCI5A   388320.8   60.0   -33.89   -1.
14EQCI5B   388320.8   60.0  -153.89   -1.
14EQCI5C   388320.8   60.0    86.11   -1.
C
C   AREIA 500 KV
C
14EQAR5A   439482.5   60.0    -3.67   -1.
14EQAR5B   439482.5   60.0  -123.67   -1.
14EQAR5C   439482.5   60.0   116.33   -1.
C
C   MACHADINHO 500 KV
C
14EQMA5A   421667.8   60.0     7.30   -1.
14EQMA5B   421667.8   60.0  -112.70   -1.
14EQMA5C   421667.8   60.0   127.30   -1.
C
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

---

## APÊNDICE 3 - Códigos MATLAB®

---

### A3.1 Código do método tempo-freqüência para cálculo de TRT

O código parte do vetor de impedâncias da resposta em freqüência da rede vista dos contatos do pólo do disjuntor que está abrindo, ou seja, do espectro da resposta de impulso da rede.

A resposta em freqüência da rede vista dos pólos do disjuntor a interromper a corrente de curto-circuito pode ser obtida através de um programa de cálculos de harmônicos, como o HARMZS. Este programa calcula um espectro com valores de impedância complexos para freqüências positivas. Da mesma forma, esta resposta pode ser obtida da rede representada em ATP.

Entretanto, como se deseja reproduzir uma convolução no domínio do tempo através de uma multiplicação no domínio da freqüência, é necessário obter a resposta em freqüência da rede em um formato como se ela tivesse sido calculada através da transformada de Fourier da resposta de impulso no tempo. Tal formato apresenta também freqüências negativas, na forma de um espelho conjugado das impedâncias de freqüências positivas.

Por este motivo, a resposta em freqüência calculada pelo HARMZS ou pelo ATP deve ser complementada com os valores conjugados correspondentes às freqüências negativas. Para efetuar esta operação, o código inicia-se com o vetor, *d*, formado mediante a subrotina “espelho conjugado” a partir do vetor de impedâncias *z3* já conhecido:

```
% espelho conjugado
d=zeros(1,4096);% d deve ter o mesmo número de pontos do vetor de
                %correntes
for l=1:4096
    if l<=2048
```

```

        d(l)=z3(l);
    else
    end
end
for l=2050:4096
    d(l)=z3(4098-l); % o ' indica a conjugação
end

```

O código continua com a determinação do pulso de cancelamento da parte inicial da corrente de curto-circuito que circularia pelo pólo do disjuntor se este estivesse fechado. Portanto, o código segue da seguinte forma:

```

lcc=8.7772e3; %exemplo; amplitude da onda
ii=zeros(1,4096); % N=4096 corresponde a 8 ciclos de 60Hz
for l=1:128 % 1/4 ciclo de 60Hz para subida
    ii(l)=lcc*sin((l-1)*pi/256);
end
for l=129:256 %1/4 ciclo de descida
    ii(l)=lcc/2*(1-cos((l-1)*2*pi/256)); % queda suave (meio seno); para reduzir
    %o efeito de fim de janela; já não afeta a TRT, pois, fica depois do pico.
end

```

Note-se que, embora estejamos trabalhando com sistema causal, ou seja, onde as excitações introduzidas nele num instante não têm influência na resposta do sistema nos instantes anteriores, ocorre certa violação do princípio de causalidade devido à aproximação de se utilizar DFT cíclica, em lugar da transformada integral de Fourier. Para minimizar este feito de perda de causalidade é necessário aumentar o período da janela de amostragem, bem como a frequência de amostragem, caso contrário as distorções do final da janela afetam a resposta do sistema no início dela.

A seguir o código leva o pulso de corrente ao domínio da frequência:

```

iw=fft(ii); % tranferência do pulso ao domínio da freq.

```

O código segue multiplicando termo a termo o vetor “d” da resposta em frequência da rede pelo vetor da decomposição espectral do pulso de cancelamento da corrente de curto-circuito, resultando em um vetor de tensões para cada frequência, correspondente à TRT no domínio da frequência:

```
vw=iw.*d; % produto dos 2 vetores na frequência, .* significa termo a termo
```

Finalmente, o código retorna este produto ao domínio do tempo mediante DFT inversa, para se obter a TRT procurada em função do tempo:

```
trt=ifft(vw); % volta ao tempo
```

### A3.2 Código para obtenção de $Z(\omega)$ a partir de $Z_1(\omega)$ e $Z_0(\omega)$

```
%Formação do vetor da impedância vista pelos contatos com inv. parcial;
%começando com a formação das matrizes Zseq e Zfase
z3=zeros(1,2048);
a=-1/2+3^(1/2)/2*i;
Za=[1 1 1;1 a a^2;1 a^2 a];
Nsh=3; % a matriz mista m tem dimensão 3*3, neste caso
N1=1; % N1 é o número de linhas/colunas a serem invertidas
for ll=1:2048
    Zseq=[z03(ll) 0 0;0 z13(ll) 0;0 0 z13(ll)]; %z03 e z13 são os vetores das
    %impedâncias de seqüências da barra do disjuntor, calculados
    %previamente no HARMZw
    Zfase=inv(Za)*Zseq*Za;
    Yfase=inv(Zfase);%como temos a corrente da fase A e as tensões
    %das fases B e C (=zero), inverte-se só a fase A

    %Subrotina de inversão do Shipley para MATLAB®
    m=Yfase; %m vira matriz mista no final da subrotina
    for M=1:N1 % Pivot
        mp=-1/m(M,M);
```

```

m(M,M)=mp;
    for l=1:Nsh
        if l~=M
            for J=1:Nsh
                if J~=M
                    m(l,J)=m(l,J)+m(M,J)*m(l,M)*mp;
                end
            end
        end
    end
    for l=1:Nsh
        if l~=M
            m(M,l)=m(M,l)*mp;
            m(l,M)=m(l,M)*mp;
        end
    end
end % fim da subrotina Shipley

z3(l1)=-m(1,1);% z3 é diretamente a impedância vista dos contatos do
% primeiro pólo aberto do disjuntor, pois este seria o valor
% resultante ao multiplicar m pelo vetor misto IV=[-1 0 0]
end

% aqui termina a montagem do vetor Z(w)=z3 visto dos contatos do primeiro
% pólo a interromper a corrente de curto-circuito.

```

---

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] *IEEE C37.011-2005 Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breaker*, 2006.
- [2] TOLMASQUIM, M.T., FARIAS, J.C.M., ESMERALDO, P.C.V., et al., *EPE-DEE-RE-043/2005 Estudos do Plano Decenal de Expansão do Setor Elétrico – Estudos da Expansão da Transmissão – Análise dos Sistemas Regionais – Subsistema Sudeste / Centro-Oeste e Acre / Rondônia*, 2005.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - Resolução ANEEL nº 505/2001, de 26 de novembro de 2001.
- [4] *Plano de ampliações e reforços na rede básica – período 2006 a 2008*, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, 2005.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - Resolução ANEEL nº 158/2005, de 23 de maio de 2005.
- [6] *Estudos de curto-circuito – período 2005 a 2008*, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, 2006.
- [7] MEIRELLES, M., “Principais fenômenos físicos da interrupção de corrente e sua correlação com o desempenho de disjuntores de alta tensão”, *Workshop sobre repotenciação de disjuntores ar comprimido e SF6*, Ativa; Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, outubro de 2006.
- [8] Figura obtida em pesquisa ao *website* da AREVA. [http://www.aveva-td.com/static/html/TDE-AGF\\_Product-Product\\_Detail3\\_1040237016857.html?&famid=1018253756161&typid=1020357252489&productline=1064483568475](http://www.aveva-td.com/static/html/TDE-AGF_Product-Product_Detail3_1040237016857.html?&famid=1018253756161&typid=1020357252489&productline=1064483568475).
- [9] CARVALHO, A. C., PUENTE, A. P., FUCHS, A., et al., *Disjuntores e Chaves: Aplicação em Sistemas de Potência*, Comitê de Estudos 13 da CIGRE Brasil, ISBN 85-228-0165-7, EDUFF Publisher, Niterói, Brasil, 1995.



- [10] *High-voltage alternating current circuit-breakers, First Edition, May 2001*. In: IEC 62271-100 High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100.
- [11] NBR 7118, Disjuntores de alta tensão - Especificação, 1994.
- [12] IEEE standard test procedure for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis, C37.09.1999.
- [13] CIGRE WG 13.04, Specified time constants for testing asymmetrical current capability of switchgear, ELECTRA no. 173, pp 18-31, 1997.
- [14] MAIA, A. M., D'AJUZ, A., KASTRUP, O.K., et al. "Estudo da redução de correntes de curto-circuito em subestações da área rio através da aplicação de dispositivo limitadores", Relatório ONS-2.1/007/2002.
- [15] CIGRE WG 13.04, Asymmetrical current breaking tests, ELECTRA no. 132, pp. 109-125, October/1990;
- [16] CARVALHO, A.C., D'AJUZ, A., ROCHA, R., *Novo critério para redução da capacidade de interrupção de disjuntores de alta tensão em função da constante de tempo da corrente de curto-circuito*, IX SEPOPE, SP-088, Rio de Janeiro, 2004.
- [17] COSTA, S. F., "Correntes de Curto-Circuito em Seccionadores, Chaves de Terra e Aterramento Rápido. Efeitos Eletrodinâmicos e Ensaio". In: *VIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Grupo VIII – Subestações, Equipamentos Elétricos e Materiais (GSE)*. São Paulo, SP, Brasil, 1986.
- [18] BALZER, G., BOEHLE, B., HANEKE, K., "Switchgear Manual". *Asea Brown Boveri Pocket Book*, ed. 9, Berlim, 1993.
- [19] HERMAN, W., RAGALLER, K., "Interaction between arc and network in the ITRV regime". In: *Current Interruption in High-Voltage Networks. Edited by Klaus Ragaller. BBC Brown Boveri & Company Limited*. Plenum Press, pp. 205-229, Baden, Switzerland, 1978.
- [20] PRIKLER, L., KIZILKAY, M., BÁN, G. et. al., "Improved secondary arc models based on identification of arc parameters from staged fault test records". 14th PSCC, Session 24, Paper 3, Sevilla, 2002.
- [21] ZANETTA, L.C., *Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência*, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

- [22] RAMIREZ, A., GOMEZ, P., MORENO, P., et al. "Frequency Domain Analysis of Electromagnetic Transients through the Numerical Laplace Transform", *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, v. 1, pp. 1136-1139, 2004.
- [23] AMETANI, A. "The Application of the Fast Fourier Transform to Electrical Transient Phenomena", *International Journal of Electrical Engineering Education*, v. 10, n. 4, pp. 277-287.
- [24] SEMLYEN, A., DABULEANU, A., "Fast and Accurate Switching Transient Calculations on Transmission Lines with Ground Return using Recursive Convolutions". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 94, n. 2, pp. 561-571, 1975.
- [25] COOLEY, J. W., TUKEY, J. W., "An algorithm for machine computation of Fourier series". *Comput.*19, pp. 297-301, 1965.
- [26] NUSBAUMER, H. J., "Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms". Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- [27] BRIGHAMM, E. O., "The fast Fourier transform", Prentice Hall, Englewoods Cliffs, N.J. 1974.
- [28] STEURER, M., HRIBERNIK, W., BRUNKE, J.H., "Calculating the Transient Recovery Voltage Associated With Clearing Transformer Determined Faults by Means of Frequency Response Analysis". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 1, pp. 168-173, 2004.
- [29] AMON, J., *Tensão de reestabelecimento transitória de disjuntores – metodologia de estudo*. Dissertação de M.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1986.
- [30] COLCLASER, R. G., Jr., and BUETTNER, D. E., "The traveling-wave approach to transient recovery voltage", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-88, n. 7, pp. 1028-1035, 1969.
- [31] APOSTOL, T. M., "Mathematical Analysis", Edition 2. Publisher: Addison-Wesley, 1974.
- [32] BESSONOV, L., *Applied Electricity for Engineers*, Revised from the 1967 russian edition, Moscow, MIR Publishers, 1968.
- [33] ARRILAGA, J., BRADLEY, D. A., BODGER, P. S., *Power system harmonics*, Chichester, NewYork, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & Sons Ltd., 1985.

- [34] GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*, Wiley-Interscience, 1970.
- [35] BROWN, H.E., *Grandes Sistemas Elétricos: Métodos Matriciais*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos - LTC; Itajubá, Escola Federal de Engenharia Industrial, - EFEI, 1975.
- [36] SHIPLEY, R. B., *Introduction to matrices and power systems*, United States of America, John Wiley & Sons, 1985.