

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO**

**ESTUDO DA ADEQUABILIDADE DE**  
**DISJUNTORES DE CLASSE 15 KV**  
**ÀS SOLICITAÇÕES DE TRT**

**Diana Moreno Nobre**

**Campina Grande – Paraíba – Brasil**

**Novembro de 1999**

---

**ESTUDO DA ADEQUABILIDADE DE  
DISJUNTORES DE CLASSE 15 kV  
ÀS SOLICITAÇÕES DE TRT**

**ESTUDO DA ADEQUABILIDADE DE  
DISJUNTORES DE CLASSE 15 KV  
ÀS SOLICITAÇÕES DE TRT**

*Dissertação apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

**Área de Concentração: Processamento da Energia**

**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, Dr., UFPB**  
**Orientador**

**WASHINGTON L. A. NEVES, Ph.D., UFPB**  
**Orientador**

**Campina Grande – Paraíba – Brasil**

**Novembro de 1999**



ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Setorial do campus II da UFPB

621.316  
N754e

Nobre, Diana Moreno

Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV  
às Solicitações de TRT | Diana Moreno Nobre. – Campina  
Grande, UFPB, 1999.

85 p.

Dissertação (mestrado).

1 TRT

2 Disjuntores de Alta Tensão

3 Transitórios Eletromagnéticos

**ESTUDO DE ADEQUABILIDADE DE DISJUNTORES DE CLASSE 15 KV ÀS  
SOLICITAÇÕES DE TRT**


**DIANA MORENO NOBRE**

Dissertação Aprovada em 09.11.1999

  
**PROF. BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFPB**  
Orientador

  
**PROF. WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFPB**  
Orientador

  
**PROF. MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, Ph.D., UFPE**  
Componente da Banca

  
**PROF. DAGOBERTO LOURENÇO RIBEIRO, D.Sc., UFPB**  
Componente da Banca

  
**PROF. SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFPB**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
Novembro - 1999

*A meus pais, que tanto me incentivam,  
e a minha única irmã, companheira de todos os momentos,*

*DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me fazer acreditar no futuro.

Agradeço ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPQ) o apoio financeiro dado para este projeto de pesquisa.

À Coordenação de Pós-graduação de Engenharia Elétrica (COPELE) pela oportunidade na realização do trabalho.

À Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), principalmente aos Engenheiros Miguel Otávio B. C. Melo, Fernando R. Alves e Josivan S. Monteiro, pela ajuda fornecida na aquisição de dados e discussões.

A meus pais, Delmiro e Zildene, e a minha irmã, Denise, pelo apoio, dedicação e incentivo.

Sou grata ao prof. Benemar (LSP-UFPB) por suas sugestões, discussões e por sua orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos ao prof. Washington Neves (LAT-UFPB) por suas sugestões, sua compreensão e confiança a mim depositadas, sua dedicação e orientação na realização deste trabalho.

Ao prof. Edson Guedes da Costa (LAT-UFPB) pelo apoio dado.

Aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão - UFPB, pela sempre disponibilidade em ajudar.

Aos colegas Alexandre, James, Alécio, Socorro e Damásio, nos quais sempre encontrei incentivo.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação	2
1.2 Trabalhos relevantes	3
1.3 Objetivo	4
1.4 Organização do trabalho	5
<b>CAPÍTULO 2 – TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA</b>	<b>6</b>
2.1 Conceito de TRT	7
2.1.1 Arco Elétrico	7
2.1.2 Reignição do arco elétrico	9
2.2 Formas de onda da TRT	11
2.2.1 Considerações Gerais	11



	viii
2.2.2 TRT de frequência única em faltas terminais	15
2.2.3 TRT de dupla frequência	18
2.2.3.1 Chaveamento de carga indutiva	19
2.2.3.2 TRT do tipo exponencial-cosseno	20
2.2.4 TRT em faltas quilométricas	24
2.3 Fatores que influenciam na TRT	25
2.3.1 Parâmetros do sistema	26
2.3.2 Tipos e localizações de falta	26
<b>CAPÍTULO 3 – ESPECIFICAÇÕES DA TRT – NORMAS TÉCNICAS</b>	<b>28</b>
3.1 Normas ANSI	29
3.1.1 TRT especificada de ensaio em faltas terminais	30
3.1.2 TRT especificada de ensaio em faltas quilométricas	34
3.2 Normas IEC	35
3.2.1 TRT especificada de ensaio em faltas terminais	35
3.2.2 TRT especificada de ensaio em faltas quilométricas	38
3.3 Normas ABNT	39
3.3.1 TRT presumida de ensaio em faltas terminais	39
3.3.2 TRT especificada de ensaio em faltas terminais	40
3.3.3 Comparação da TRT presumida e especificada de ensaio	41
3.3.4 TRT especificada de ensaio em faltas quilométricas	42
<b>CAPÍTULO 4 – REPRESENTAÇÃO DA TRT ESTUDADA</b>	<b>43</b>
4.1 Representação da TRT utilizada no estudo	43
4.2 Comparação entre a TRT obtida no estudo e a TRT especificada	46

	ix
4.3 Cálculo da TRT	46
<b>CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES DIGITAIS</b>	<b>48</b>
5.1 Introdução	48
5.2 Formas de onda da TRT obtidas	55
5.3 Parâmetros da TRT obtidos	60
5.4 Análise de resultados	63
5.5 Alternativas para a redução da TRT	65
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO 2</b>	<b>77</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1 Tensão de restabelecimento transitória.</b>	<b>8</b>
<b>Figura 2.2 Corrente subsequente.</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2.3 Característica da TRT exponencial.</b>	<b>11</b>
<b>Figura 2.4 Característica da TRT oscilatória.</b>	<b>12</b>
<b>Figura 2.5 Característica da TRT para faltas quilométricas.</b>	<b>12</b>
<b>Figura 2.6 Circuito trifásico simplificado.</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2.7 Circuito simplificado que produz uma resposta de frequência única.</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2.8 TRT de frequência única.</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2.9 Circuito puramente indutivo que produz TRT de dupla frequência.</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.10 Tensões no lado da fonte e da carga do disjuntor.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2.11 Circuito simplificado para TRT.</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.12 Componente transitória inicial.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2.13 Forma de onda da TRT total.</b>	<b>23</b>

<b>Figura 2.14 Falta fase-terra à pequena distância dos terminais do disjuntor.</b>	24
<b>Figura 2.15 TRT para falta fase-terra à pequena distância do disjuntor.</b>	25
<b>Figura 2.16 Falta trifásica não aterrada no barramento.</b>	26
<b>Figura 2.17 Falta trifásica não aterrada nos terminais do disjuntor.</b>	26
<b>Figura 2.18 Falta fase-terra à pequena distância dos terminais do disjuntor.</b>	27
<b>Figura 3.1 TRT para ensaio definida pela ANSI em disjuntores de tensão nominal <math>\leq 72,5</math> kV.</b>	31
<b>Figura 3.2 TRT para ensaio definida pela ANSI em disjuntores de tensão nominal <math>&gt; 72,5</math> kV.</b>	32
<b>Figura 3.3 TRT para falta fase-terra à pequena distância do disjuntor.</b>	34
<b>Figura 3.4 Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC em disjuntores de tensão nominal <math>\leq 72,5</math> kV.</b>	36
<b>Figura 3.5 Envoltória a quatro parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC em disjuntores de tensão nominal <math>&gt; 72,5</math> kV.</b>	37
<b>Figura 3.6 Representação por quatro parâmetros de uma TRT presumida.</b>	39
<b>Figura 3.7 Representação por dois parâmetros de uma TRT presumida.</b>	40

<b>Figura 3.8 Exemplo de TRT presumida de ensaio com envolvente a dois parâmetros que atende às condições exigidas pra o ensaio do tipo (caso da TRT especificada com linha de referência a dois parâmetros) .</b>	<b>42</b>
<b>Figura 4.1 Taxa de crescimento da TRT.</b>	<b>44</b>
<b>Figura 4.2 Valor de pico da TRT e sua taxa de crescimento.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 5.1 Subestação Angelim.</b>	<b>49</b>
<b>Figura 5.2 Curva de saturação.</b>	<b>53</b>
<b>Figura 5.3 Linearização por dois segmentos da curva de saturação.</b>	<b>53</b>
<b>Figura 5.4 TRT – Disjuntor 11T4 – Ano 1998 ( Sem carga no barramento de 13,8 kV).</b>	<b>56</b>
<b>Figura 5.5 TRT – Disjuntor 11T4 – Ano 1998 ( Plena carga no barramento de 13,8 kV).</b>	<b>57</b>
<b>Figura 5.6 TRT – Disjuntor 21Y4 – Ano 1998 ( Sem carga no barramento de 13,8 kV).</b>	<b>58</b>
<b>Figura 5.7 TRT – Disjuntor 21Y4 – Ano 1998 ( Plena carga no barramento de 13,8 kV).</b>	<b>58</b>
<b>Figura 5.8 TRT – Disjuntor 21Y3 – Ano 1998 ( Sem carga no barramento de 13,8 kV).</b>	<b>59</b>
<b>Figura 5.9 TRT – Disjuntor 21Y3 – Ano 1998 ( Plena carga no barramento de 13,8 kV).</b>	<b>60</b>

<b>Figura 5.10</b> Valores de pico da TRT sem a representação da curva de saturação e da linha de 13,8 kV.	61
<b>Figura 5.11</b> Valores de <i>TCTRT</i> sem representação da curva de saturação e da linha de 13,8 kV.	61
<b>Figura 5.12</b> Valores de pico da TRT para uma falta quilométrica.	62
<b>Figura 5.13</b> Valores de <i>TCTRT</i> para uma falta quilométrica.	63
<b>Figura 5.14</b> TRT – Disjuntor 11T4.	66
<b>Figura 5.15</b> TRT – Disjuntor 21Y4.	67
<b>Figura 5.16</b> TRT – Disjuntor 21Y3.	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1 Suportabilidade a TRT nos disjuntores 15 kV.</b>	45
<b>Tabela 5.1 Equivalente no barramento de 230 kV.</b>	51
<b>Tabela 5.2 Dados de transformador.</b>	51
<b>Tabela 5.3 Dados de carga.</b>	51
<b>Tabela 5.4 Parâmetros dos cabos.</b>	52
<b>Tabela 5.5 Comprimento dos cabos.</b>	52
<b>Tabela 5.6 Valores de pico da corrente de curto-circuito e valores percentuais da corrente de interrupção nos disjuntores.</b>	62
<b>Tabela 5.7 Valores de pico da TRT e <i>TCTRT</i> com a instalação de pára-raios de ZnO.</b>	66

## RESUMO

A forma de onda da tensão entre os terminais de disjuntores, quando da abertura de seus contatos, é definida como a tensão de restabelecimento e nos seus instantes iniciais como a tensão de restabelecimento transitória (TRT). Considerando a expansão dos sistemas de potência, é possível que disjuntores de alta tensão não estejam mais adequados a interromper correntes de curto-circuito e suportar tensões transitórias. Neste trabalho é apresentado um estudo para a reavaliação dos disjuntores de 15 kV instalados na subestação Angelim, pertencente a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF). É realizado um estudo para três disjuntores, obtendo formas de onda da TRT através de simulações digitais. É feita uma análise dos parâmetros da TRT, comparando-os com os valores estabelecidos em normas técnicas. Alternativas para a redução do pico e da taxa de crescimento da TRT são propostas. A inserção de dispositivos de ZnO entre os terminais dos disjuntores produz redução significativa no pico da TRT.



## ABSTRACT

The voltage transient that occurs across the terminals of a pole of a switching device upon interruption of the current flowing through the pole is called Transient Recovery Voltage (TRV). Due to power system growth, it is possible that high voltage circuit breakers are not able to interrupt short-circuit currents and to withstand the TRV. This is a study for the reevaluation of 15 kV breaker performances at Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) Angelim Substation. Digital simulations are carried out to compute the TRV parameters and to compare them with the standard ones. Alternatives are proposed to reduce the peaks and rate of rise of TRVs. It is shown that ZnO devices placed across the breaker terminals are very effective in reducing TRV peaks.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O estudo de transitórios eletromagnéticos é essencial para a análise e planejamento de sistemas de energia elétrica. Para isso é importante ter o conhecimento das formas de onda de tensão e corrente em pontos estratégicos do sistema elétrico e, dessa forma, poder analisar como o sistema responde aos fenômenos de natureza transitória ou como os sinais produzidos por estas ocorrências se propagam.

Existem diversos exemplos de fenômenos transitórios que ocorrem em sistemas de potência. Um deles refere-se a abertura de um circuito, cuja ocorrência pode implicar em sobretensões nos equipamentos do sistema. Um caso crítico de seccionamento de um sistema de energia elétrica se dá na ocorrência de um curto-circuito. Esta operação envolve rapidez, precisão e segurança, sendo realizada através dos disjuntores de alta tensão.

Os disjuntores são dispositivos capazes de estabelecer, conduzir e interromper corrente elétrica nas condições normais de circuito e conduzir por um tempo

específico e interromper correntes sob condições anormais especificadas de circuito, tais como curto-circuito [GARZON, 1997].

Durante a abertura de um trecho de uma subestação na ocorrência de um curto-circuito, a diferença de potencial entre os contatos dos disjuntores pode ser bastante elevada. A componente transitória desta diferença de potencial é conhecida como Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

Torna-se necessário, então, a realização de um estudo de TRT em disjuntores localizados em subestações existentes considerando a condição que se mostre mais severa para estes disjuntores a fim de auxiliar nos seus dimensionamentos. Este estudo possibilita que se apresentem alternativas para redução da TRT nos casos em que seus parâmetros estejam acima dos valores estabelecidos por normas técnicas.

## 1.1 Motivação

Considerando a expansão dos sistemas de potência, é possível que disjuntores de alta tensão não estejam mais adequados a operar nas condições impostas pela nova configuração, podendo causar danos aos equipamentos e aos próprios disjuntores, comprometendo a confiabilidade do sistema. O alto custo aquisitivo dos disjuntores é também um fator importante. Portanto, é necessário investigar os novos níveis de corrente de curto-circuito que serão interrompidas pelos disjuntores e as tensões de restabelecimento transitória nos seus terminais.

Alguns disjuntores instalados em subestações da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) precisavam ser reavaliados. Iniciou-se um estudo da TRT dos disjuntores de 15 kV das subestações de Currais Novos e Angelim. O caso de Currais Novos foi utilizado como referência e o de Angelim é apresentado neste trabalho.

## 1.2 Trabalhos Relevantes

Estudos importantes em disjuntores de 15 kV foram feitos para reavaliação de seu desempenho quanto à solicitação de TRT, considerando alternativas de redução de TRT.

As bases das normas ANSI e IEC referentes a TRT foram amplamente discutidas por WAGNER & SMITH em 1984. Diferenças significativas entre as normas foram examinadas. Comparando com as bases das normas atuais, não houve mudanças na representação da TRT.

Estudos de TRT em disjuntores de classe 15 kV foram realizados pela CHESF, em 1996, nas subestações Currais Novos e Teresina I. A substituição de disjuntores foi recomendada quando os valores de pico estabelecidos em normas técnicas eram superados.

Recentemente, SWINDLER et. al realizaram estudos de TRT considerando disjuntores conectados a barra de 13,8 kV em uma refinaria de óleo. Os estudos foram feitos utilizando simulações digitais em programas tipo EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*). Alternativas para a redução da TRT como a instalação de células capacitivas foram discutidas.

De uma forma geral, quando o valor de pico da TRT encontra-se acima do valor especificado é proposta a substituição do disjuntor atual por outro de classe superior. Quando a taxa de crescimento da TRT ultrapassa o valor especificado, a instalação de células capacitivas é recomendada para sua redução.

### 1.3 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre o desempenho de disjuntores de classe de tensão de 15 kV, no que se refere a sua suportabilidade às solicitações da TRT, considerando a configuração atual (1998) e a expansão do sistema até um horizonte de 10 anos. A análise do desempenho de disjuntores tem por base o resultado do estudo da condição que se mostre mais severa do ponto de vista dos parâmetros da TRT. Dessa forma, são estudados curto-circuitos trifásico não aterrado nos terminais do disjuntor e fase-terra a pequenas distâncias dos seus terminais, que caracterizam as faltas quilométricas.

Os parâmetros da TRT utilizados no estudo são obtidos através de simulações digitais com o ATP<sup>®</sup> (*Alternative Transients Program*), programa disponível para cálculo de transitórios eletromagnéticos. É feita uma análise da influência da carga do barramento de 13,8 kV da subestação Angelim na TRT. Também é realizada uma análise de sensibilidade com o modelo dos transformadores, em que se considera sua característica de saturação, e com o modelo da linha no setor de 13,8 kV da subestação em estudo.

Comparam-se os resultados obtidos no estudo com os valores estabelecidos pelas normas técnicas referentes a disjuntores de alta tensão, verificando assim a adequabilidade dos disjuntores às solicitações da TRT apresentadas. Alternativas para a redução da TRT são propostas para os casos em que sua superação é constatada.

## 1.4 Organização do Trabalho

A análise do desempenho dos disjuntores de classe 15 kV em subestações existentes, através do estudo de TRT, e alternativas de redução dos seus parâmetros representativos obedece a seqüência abaixo:

- ❖ A TRT é influenciada por parâmetros do sistema elétrico e pelo tipo e localização de curto-circuitos. As formas de onda da TRT e os fatores relacionados com o comportamento da TRT são discutidos no capítulo 2.

- ❖ A TRT pode ser representada através de sua envoltória. A representação da TRT estabelecida por normas técnicas é estudada no capítulo 3.

- ❖ No capítulo 4 são discutidos os parâmetros representativos da TRT utilizados no estudo.

- ❖ No capítulo 5 é apresentado um estudo dos disjuntores referentes à subestação Angelim. As formas de onda da TRT são obtidas através de simulações digitais utilizando o ATP<sup>®</sup>. Alternativas para a redução da TRT são apresentadas.

- ❖ As conclusões deste trabalho são apresentadas no capítulo 6.

## CAPÍTULO 2

### **TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA**

A necessidade de seccionamento de um sistema de energia elétrica pode ocorrer em condições normais ou em condições anormais de operação. Os equipamentos usados na operação de seccionamento classificam-se em chaves seccionadoras, chaves seccionadoras de operação em carga e disjuntores. A escolha entre estes dispositivos está relacionada com os esforços elétricos a que cada qual pode ser submetido.

O chaveamento em condições normais de operação, visando por exemplo a manutenção de um equipamento, não envolve correntes elevadas, podendo em certos casos ser feito através de dispositivos de seccionamento simples como as chaves seccionadoras. Um caso crítico de seccionamento se dá quando ocorre um curto-circuito no sistema elétrico. Os disjuntores devem ser capazes de eliminar qualquer tipo de curto-circuito, submetendo-se a grandes esforços térmicos e elétricos.

O disjuntor tem o objetivo de inserir ou retirar do sistema elétrico máquinas, linhas, transformadores e cargas e interromper o circuito quando ocorrem curto-circuitos. A operação dos disjuntores realiza-se, normalmente, de maneira automática, de modo que

o processo de estabelecimento e interrupção de corrente ocorra em um intervalo de tempo bastante curto.

## 2.1 Conceito de TRT

### 2.1.1 Arco elétrico

A eliminação de uma falta é iniciada com a separação física dos contatos do disjuntor. No instante inicial da ocorrência de um curto-circuito, a tensão entre os contatos fechados do disjuntor é praticamente zero. Durante a abertura dos contatos, ocorre a ionização do meio dielétrico na câmara de extinção do disjuntor, havendo a formação do arco elétrico, através do qual a corrente de curto-circuito continuará a ser conduzida. Nesse período se estabelece a tensão de arco entre os contatos do disjuntor, de valor bastante reduzido comparado com a tensão do sistema. Durante sua ocorrência, o arco elétrico é resfriado, pelo meio dielétrico do disjuntor. O resfriamento do arco reduz sua temperatura e condutividade a fim de favorecer sua extinção na primeira passagem da corrente pelo zero para evitar maiores sobretensões. Mesmo assim, ocorre a elevação da tensão de arco e a redução da corrente de curto-circuito quando esta aproxima-se do seu zero natural. Desse modo, o arco elétrico é extinto, interrompendo a corrente de curto-circuito.

Quando ocorre a interrupção da corrente surge uma tensão de restabelecimento entre os contatos do disjuntor, que consiste em duas componentes. A primeira é a componente transitória da tensão, a qual ocorre imediatamente após a interrupção da corrente. A segunda é a componente de regime permanente, a qual forma a linha de referência em torno da qual a componente transitória oscila. No primeiro destes



intervalos de tempo, a diferença de potencial entre os contatos do disjuntor é chamada de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

Pode-se considerar que o disjuntor faça a conexão entre dois circuitos elétricos. De um lado produz-se potência (lado da fonte) e do outro consome-se potência (lado da carga). A figura 2.1 apresenta o sistema desta forma simplificada e ilustra o conceito de TRT.

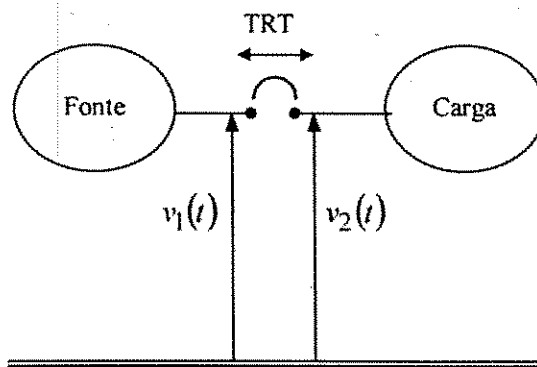


Figura 2.1 Tensão de restabelecimento transitória

No momento em que os contatos do disjuntor são abertos, as duas redes são desconectadas e cada uma delas redistribui sua energia entre suas capacitâncias e indutâncias, adequando-se a um novo estado elétrico. Como resultado, a tensão de restabelecimento,  $v_1(t) - v_2(t)$ , apresentará oscilações transitórias até que o regime permanente seja atingido.

Após o instante de interrupção de corrente, o meio extintor possui uma certa condutância residual devido à inércia térmica. Com o aparecimento da TRT e a existência da condutividade residual tem-se uma pequena corrente subsequente. Na figura 2.2, em que se apresenta o gráfico desta corrente,  $t_0$  é o instante da abertura dos contatos do

disjuntor e  $t_f$  é o instante da extinção do arco elétrico (interrupção de corrente de curto-circuito).

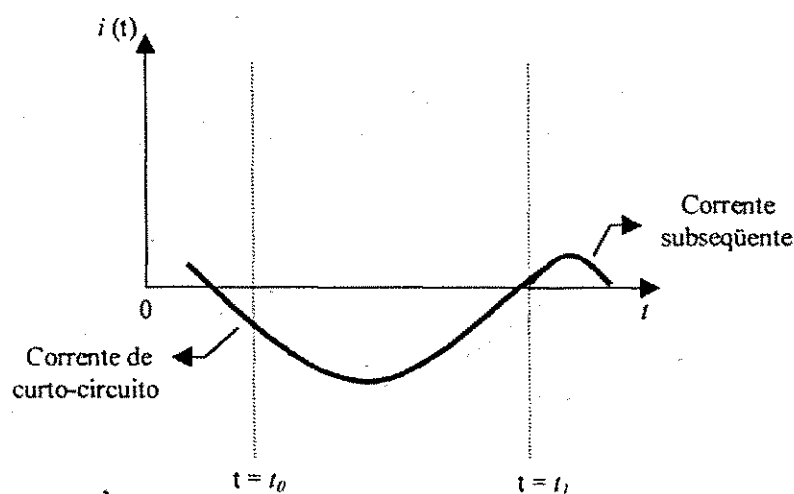


Figura 2.2 Corrente subsequente

Para circuitos trifásicos considera-se a TRT que aparece no primeiro pólo do disjuntor que se abre para eliminação de uma falta, pois essa tensão é geralmente mais elevada que a tensão transitória entre os terminais dos outros dois pólos.

### 2.1.2 Reignição do arco elétrico

Uma vez extinto, o arco elétrico pode ser reacendido, o que é bastante prejudicial ao sistema pois este voltará a conduzir correntes de curto-circuito elevadas. Assim, após a interrupção da corrente de curto-circuito, o meio do arco elétrico recebe uma certa potência através da corrente subsequente, chamada de potência recebida. O balanço entre a potência recebida e a potência de perdas pelo processo de convecção, por irradiação e movimento das moléculas dissociadas durante o período de arco, determinará o comportamento da condutância do meio.

Se a potência de perdas for maior que a potência recebida, a condutância do meio diminuirá até a extinção total da corrente. Se a potência de perdas for inferior à potência recebida, a condutância poderá aumentar, levando à uma reignição térmica.

Considerando o caso de não ocorrer reignição térmica no período da corrente subsequente, será iniciado o período de esforço dielétrico sobre o meio de extinção de arco. Nesse período, a TRT crescerá no sentido de atingir seu maior valor de pico.

Se a rigidez dielétrica do meio aumentar, de modo que sua tensão disruptiva mantenha-se superior à TRT, não ocorrerá reignição por ruptura dielétrica. Entretanto, se no crescimento da TRT, seu valor ultrapassar o valor da tensão disruptiva do meio dielétrico, poderá ocorrer reignição por ruptura dielétrica.

Através da redução do tempo para a interrupção e da manutenção da tensão de arco aproximadamente zero, tem-se conseguido reduzir sensivelmente a energia dissipada nos disjuntores durante o processo de interrupção de corrente, diminuindo, assim, os esforços térmicos na câmara do disjuntor.

O tempo para a interrupção é o tempo considerado a partir do instante do fechamento dos contatos do relé, que comanda a abertura dos contatos do disjuntor, até o instante em que a corrente é interrompida. Em disjuntores mais rápidos o tempo de interrupção varia entre 2,5 a 4 ciclos. Em outros disjuntores o tempo de interrupção é maior, chegando até a 8 ciclos.

Quanto à rigidez dielétrica, esta é restabelecida com o auxílio de mecanismos existentes nos disjuntores que utilizam o próprio meio extintor. A forma dos contatos do disjuntor e a pressão estabelecida no meio também constituem fatores importantes.

## 2.2 Formas de onda da TRT

A corrente de curto-circuito e a TRT contribuem de forma significativa para o sucesso na operação do disjuntor e são funções das características do circuito e do tipo e localização da falta a ser interrompida. O comportamento da TRT é fundamental para o estudo da adequabilidade de disjuntores.

### 2.2.1 Considerações Gerais

As formas de onda da TRT apresentam-se de acordo com o tipo e localização de falta no sistema. Em muitos casos, a característica predominante da TRT pode ser representada por uma função exponencial, oscilatória ou triangular [ANSI C37.011, 1994].

Uma TRT de forma exponencial típica é mostrada na figura 2.3. A TRT exponencial geralmente ocorre quando o disjuntor interrompe uma falta trifásica não aterrada nos seus terminais na presença de, no mínimo, um transformador e uma linha de transmissão conectada na barra da falta.

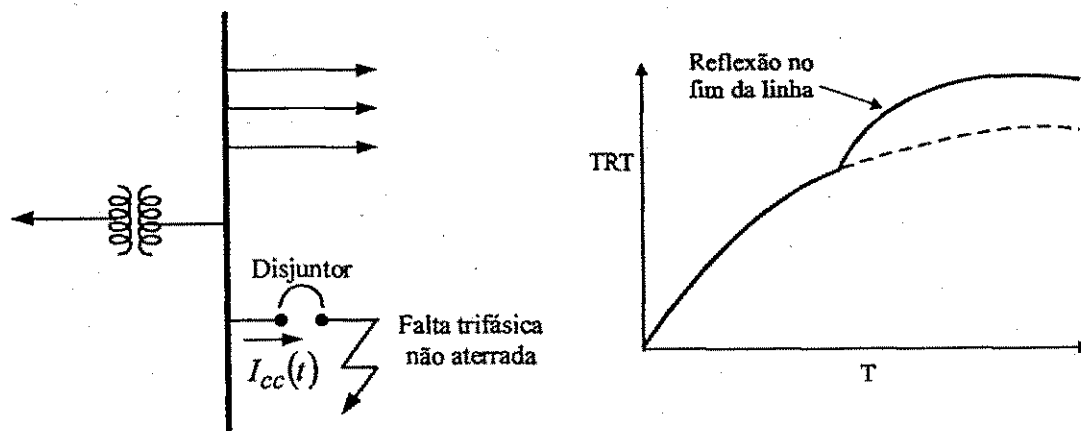


Figura 2.3 Característica da TRT exponencial

A TRT de resposta oscilatória, na figura 2.4, ocorre quando uma falta é limitada por um transformador ou reator em série, e não há presença de linhas de transmissão ou cabos conectados na barra de falta.

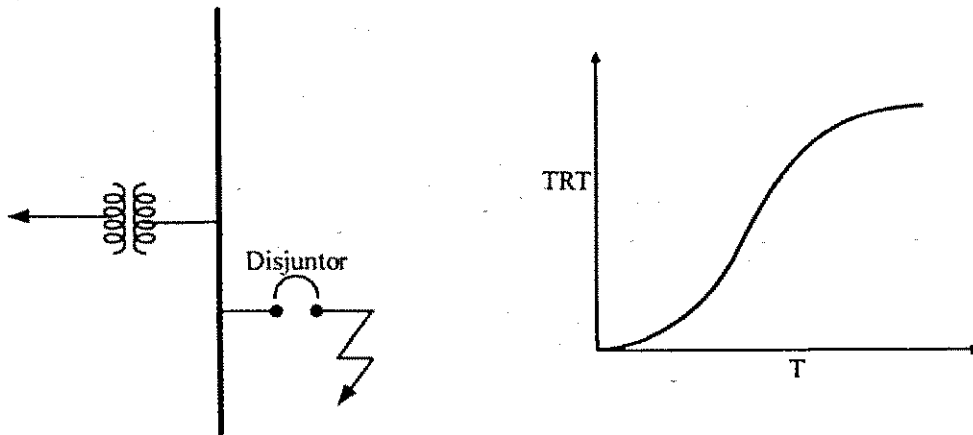


Figura 2.4 Característica da TRT oscilatória

Numa falta a pequena distância dos terminais do disjuntor, denominada de falta quilométrica, a TRT apresenta a característica triangular, também conhecida como “dente de serra”. Esta característica é mostrada na figura 2.5.

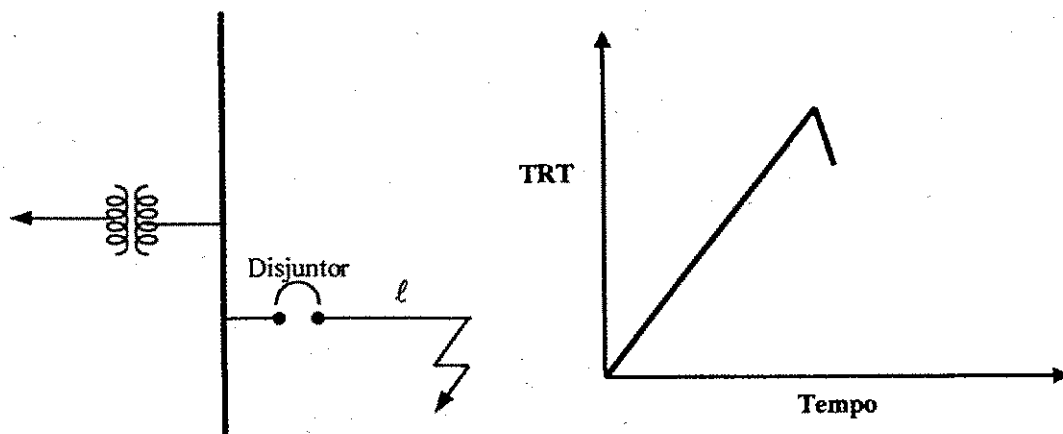


Figura 2.5 Característica da TRT para faltas quilométricas

O estudo para a avaliação do desempenho de disjuntores existentes quanto à solicitação da TRT é geralmente realizado considerando o tipo e a localização da falta que se mostrem mais severos em relação a TRT.

Em uma falta nos terminais do disjuntor a corrente é limitada apenas pela seção do sistema no lado da fonte. Nesse caso, tem-se o mais elevado valor de corrente de curto-circuito para o disjuntor. A TRT é particularmente crítica no caso de faltas trifásicas. Deve-se ressaltar que o tipo de falta apresenta uma importância significativa no desempenho do disjuntor e no sucesso da interrupção da corrente de curto-circuito.

A TRT para falta trifásica, por apresentar valor de pico elevado, é utilizada pelos fabricantes nos ensaios de disjuntores. As faltas quilométricas geralmente têm maiores taxas de crescimento da TRT do que as faltas nos terminais do disjuntor, porém com amplitudes de tensão menores.

Para a falta trifásica não aterrada, a tensão em regime permanente entre os terminais do primeiro pólo do disjuntor que se abre atinge 1,5 p.u., como mostrado a seguir. Considerando o circuito trifásico simplificado da figura 2.6, tem-se que  $V_{TRT} = V_a - V_d = V_{ad}$ , em que  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  são as correntes nas fases a, b e c respectivamente.  $Z$  é a impedância total no terminal do disjuntor no lado da fonte.

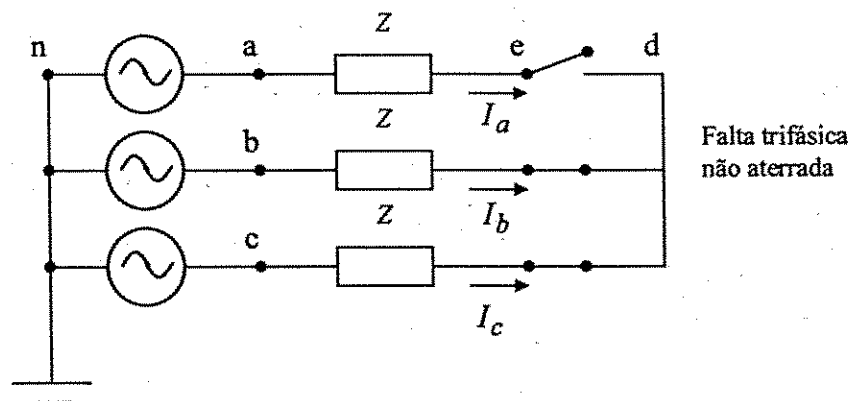


Figura 2.6 Circuito trifásico simplificado

De acordo com a figura 2.6, têm-se as seguintes equações:

$$V_{ed} = V_{bd} + V_{nb} + V_{an} + V_{ea} \quad (2.1)$$

$$I_b = -I_c \quad (2.2)$$

$$V_{bd} = I_b \cdot Z \quad (2.3)$$

Como,

$$I_b = \frac{V_{bc}}{2Z} \quad (2.4)$$

A equação (2.3) torna-se,

$$V_{bd} = \frac{V_{bc}}{2} \quad (2.5)$$

Substituindo a equação (2.5) na equação (2.1), tem-se que:

$$V_{ed} = \frac{V_{bc}}{2} + V_{nb} + V_{an} \quad (2.6)$$

Sendo  $V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$ , então a equação (2.6) resulta em:

$$V_{ed} = \frac{V_{bn} - V_{cn}}{2} + V_{nb} + V_{an} \quad (2.7)$$

Como  $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ ,  $V_{ed}$  é expressa por:

$$V_{TRT} = V_{ed} = 1,5 V_{an} \quad (2.8)$$

Na falta trifásica não aterrada a corrente de curto-circuito é semelhante a falta trifásica aterrada, sendo que esta atinge amplitudes diferentes para TRT.

Para faltas nos terminais do disjuntor dá-se maior atenção durante o restabelecimento dielétrico do meio no intervalo de tempo de aproximadamente 20  $\mu$ s a 1 ms após a interrupção da corrente [GARZON, 1997].

Para as faltas quilométricas, o meio dielétrico apresenta maior possibilidade de ruptura durante seu restabelecimento térmico, verificado aproximadamente nos primeiros 10  $\mu$ s após a interrupção da corrente, período em que o equilíbrio térmico ainda não tem sido restabelecido [GARZON, 1997].

Dependendo das características da rede elétrica e do tipo da falta, as curvas típicas de TRT podem ser representadas por formas de onda de:

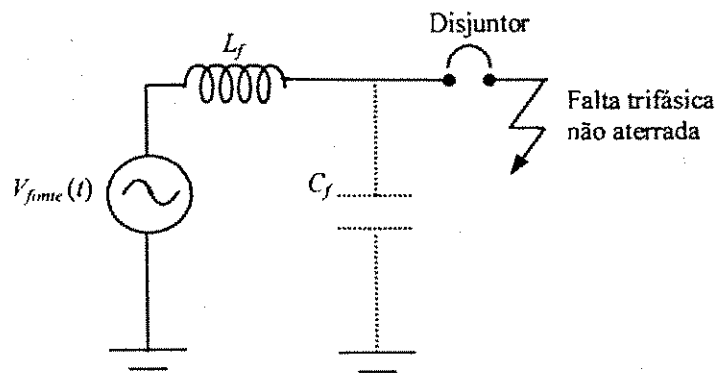
- Freqüência única, em faltas terminais;
- Freqüência dupla, na abertura de uma carga indutiva e em faltas terminais;
- Freqüência múltipla, que inclui uma componente em forma de dente de serra, para faltas quilométricas.

### **2.2.2 TRT de freqüência única em faltas terminais**

As faltas terminais são definidas na ocorrência de um curto-circuito exatamente nos terminais do disjuntor ou bastante próximo de seus terminais.

A TRT de freqüência única resulta, geralmente, da condição de um curto-circuito alimentado por um transformador, considerando que não existam linhas de transmissão conectadas na barra em curto-circuito, como mostrado na figura 2.7.





**Figura 2.7** Circuito simplificado que produz uma resposta de frequência única

A figura 2.7 representa o circuito equivalente monofásico simplificado de um sistema trifásico alimentado por uma fonte senoidal.  $L_f$  representa a indutância no terminal do disjuntor no lado da fonte, incluindo a indutância do transformador. A capacitância em derivação,  $C_f$ , representa a capacitância total fase-terra dos enrolamentos do transformador e dos cabos do secundário do transformador. A falta em estudo é do tipo trifásica não aterrada.

Após a abertura dos contatos do disjuntor, tem-se:

$$V_{fonte}(t) = V_{L_f}(t) + V_{C_f}(t), \quad (2.9)$$

sendo

$V_{fonte}(t)$  a tensão da fonte,

$V_{L_f}$  a tensão no elemento indutivo e

$V_{C_f}$  a tensão no elemento capacitivo.

Como a tensão na fonte é senoidal,

$$V_{fonte}(t) = V \cos \omega t \quad (2.10)$$

Assim, se  $i(t)$  denota a corrente fornecida pela fonte, então

$$V \cos \omega t = L_f \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C_f} \int i(t) dt \quad (2.11)$$

Aplicando a transformada de Laplace às funções do tempo que constam na equação (2.11), tem-se a expressão:

$$V \frac{s}{s^2 + \omega^2} = s L_f I(s) + \frac{I(s)}{s C_f} \quad (2.12)$$

Ou ainda:

$$I(s) = V \frac{s}{s^2 + \omega^2} \times \frac{s C_f}{s^2 C_f L_f + 1} \quad (2.13)$$

Como a TRT é a tensão sobre o capacitor, tem-se:

$$V_{TRT}(t) = V_{C_f}(t) \quad (2.14)$$

Considerando as condições iniciais nulas, a transformada de Laplace de  $V_{C_f}(t)$  é:

$$V_{TRT}(s) = \frac{I(s)}{s C_f} \quad (2.15)$$

Substituindo a equação (2.13) na equação (2.15), resulta em:

$$V_{TRT}(s) = V \omega_o^2 \left[ \frac{1}{s^2 + \omega^2} \right] \left[ \frac{1}{s^2 + \omega_o^2} \right] \quad (2.16)$$

Em que  $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$  é a frequência natural do circuito da figura 2.7.

Com a transformada inversa de Laplace, a expressão da  $V_{TRT}(t)$  torna-se:

$$V_{TRT}(t) = V \omega_o^2 \left[ \frac{\cos \omega t - \cos \omega_o t}{\omega_o^2 - \omega^2} \right] \quad (2.17)$$

Considerando  $\omega_0 \gg \omega$ , então:  $\frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega} \cong 1$  e  $\cos \omega t \cong 1$

Logo,

$$V_{TRT}(t) = V(1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.18)$$

A equação (2.18) expressa uma forma de onda da TRT de frequência única do tipo um-menos-cosseno de amplitude constante  $V$ . Porém, nela é desprezado o efeito do amortecimento produzido pelas perdas do circuito. A resposta mais realista tem a forma de onda mostrada na figura 2.8.

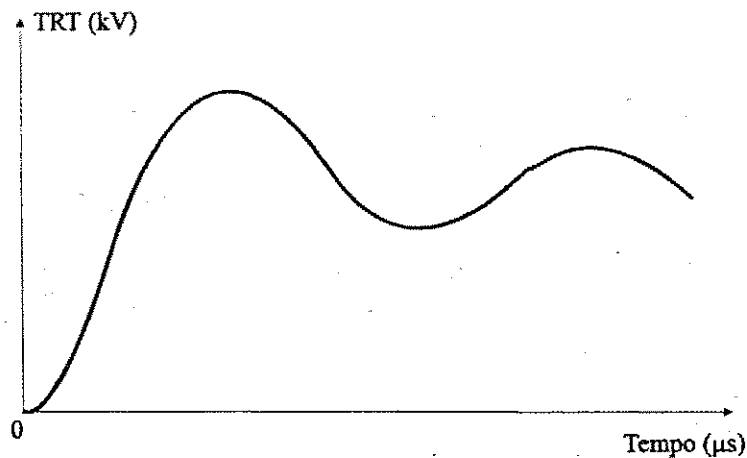


Figura 2.8 TRT de frequência única

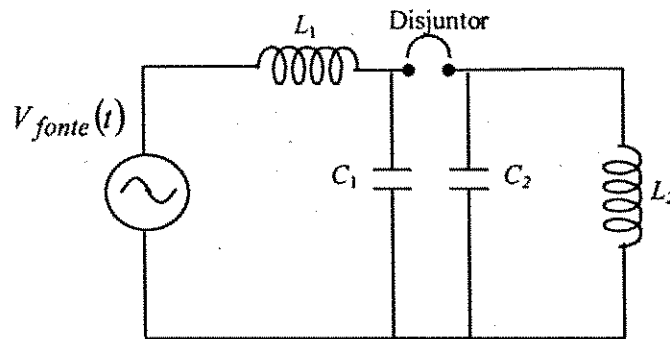
### 2.2.3 TRT de dupla frequência

Dois casos são abordados para a TRT de dupla frequência. O primeiro é a abertura de carga indutiva, em que a TRT resulta da composição de formas de onda do tipo um-menos-cosseno, correspondentes às duas frequências do circuito, independentes uma da outra. O segundo é o caso em que a TRT resulta de duas formas de onda distintas, na interrupção de uma falta trifásica não aterrada nos terminais do disjuntor. A componente inicial da TRT seria do tipo exponencial e a outra parte da resposta seria a forma de onda

do tipo um-menos-cosseno. Desse modo, a curva da TRT tem forma composta exponencial-cosseno.

### 2.2.3.1 Chaveamento de carga indutiva

Um circuito simples que produz TRT de dupla frequência é mostrado na figura 2.9. Neste circuito  $V_{fonte}(t) = V_m \cos \omega t$ ,  $L_1$  e  $C_1$  são definidos como a indutância e as capacitâncias no terminal do disjuntor no lado da fonte, a carga indutiva é representada por um indutor  $L_2$  e  $C_2$  representa as capacitâncias parasitas adjacentes ao disjuntor no lado da carga.



**Figura 2.9 Circuito puramente indutivo que produz TRT de dupla frequência.**

Admitindo que a interrupção é feita no instante em que a corrente passa pelo zero, a tensão em  $L_2$  tem valor máximo aproximadamente igual a  $\frac{L_2}{L_1 + L_2} V_m$ . Em seguida, a tensão em  $C_2$  e em  $L_2$  oscila com uma frequência natural  $f_2$  dada por:

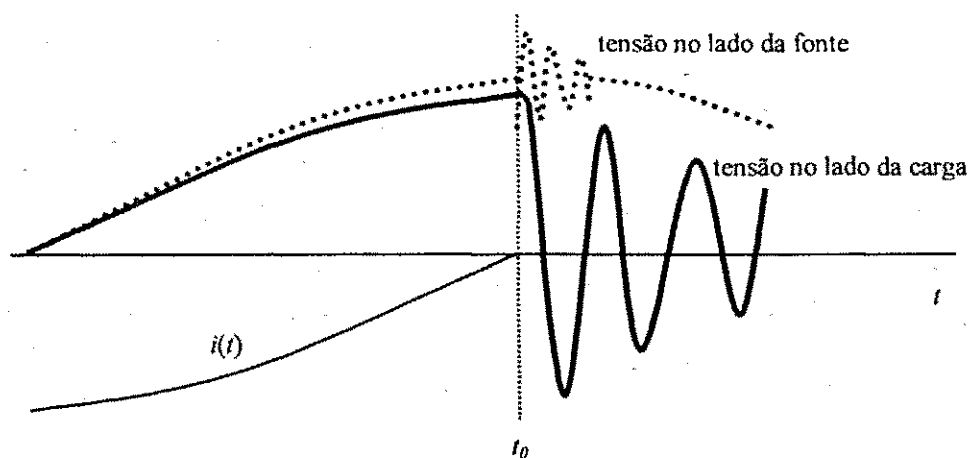
$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.19)$$

No lado da fonte, a tensão em  $C_1$  e no indutor  $L_1$  oscila com uma frequência natural  $f_1$  dada por:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \quad (2.20)$$

A tensão no terminal do disjuntor no lado da fonte é composta por um sinal de frequência superposto ao sinal da fonte  $V_{fonte}(t)$  até alcançar o regime permanente.

As formas de onda da tensão no lado da fonte e no lado da carga são apresentadas na figura 2.10, em que  $t_0$  representa o instante de interrupção da corrente.



**Figura 2.10 Tensões no lado da fonte e da carga do disjuntor**

A TRT resultante é a diferença das tensões no lado da fonte e da carga do disjuntor.

### 2.2.3.2 TRT do tipo exponencial-cosseno

A figura 2.11 mostra um circuito monofásico simplificado em que ocorre TRT de dupla frequência. É o caso de uma falta trifásica não aterrada nos terminais do

disjuntor alimentada por um transformador e por linhas de transmissão conectadas na barra de falta.  $I_{cc}(t)$  é a corrente de curto-circuito.

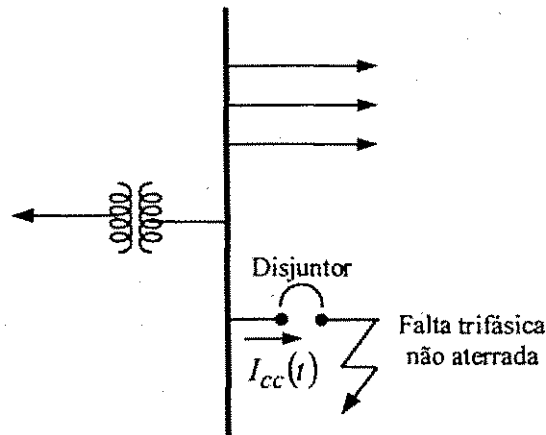


Figura 2.11 Circuito simplificado para TRT

No cálculo da TRT do primeiro pólo do disjuntor a abrir emprega-se o método de injeção de corrente por sua simplicidade. Este método consiste em considerar as fontes de tensão igual a zero e injetar um pulso de corrente de amplitude igual e sentido oposto da corrente de curto-circuito nos terminais fechados do disjuntor. Admite-se que a interrupção ocorra exatamente quando a corrente passa por seu primeiro zero após a abertura do pólo do disjuntor.

Desde que o tempo de interesse da onda de TRT seja bastante pequeno comparado com a metade do ciclo da onda da frequência industrial, 60 Hz, a corrente injetada no instante de interrupção da corrente pode ser considerada como uma função rampa [WAGNER & SMITH, 1984]. Isto é, para ângulos pequenos,  $\text{sen } \omega t \cong \omega t$ , de modo que a equação

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{rms} \text{sen } \omega t \quad (2.21)$$

é aproximadamente

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{rms} \omega t \quad (2.22)$$

Calculando-se a impedância equivalente do circuito e desprezando o efeito da capacitância de barra e do transformador no período de interesse, obtém-se a expressão da TRT que é dada por:

$$V_{TRT}(t) = 1,5\sqrt{2}\omega I_{rms} L_f \left[ 1 - e^{-\frac{Z_{eq}}{L_f} t} \right], \quad (2.23)$$

sendo  $Z_{eq}$  a impedância de surto equivalente das linhas conectadas na barra de falta,  $L_f$  a indutância total no terminal do disjuntor no lado da fonte e  $I_{rms}$  o valor eficaz da componente senoidal da corrente de falta,  $I_{cc}(t)$ . A equação (2.23) é deduzida na norma ANSI C37.11 do ano de 1994.

A equação (2.23) define  $V_{TRT}(t)$  como uma onda exponencial de valor de pico igual a  $1,5\sqrt{2}\omega I_{rms} L_f$ . O fator 1,5 é devido a tensão nos terminais do primeiro pólo do disjuntor a abrir atingir 1,5 p.u. em regime permanente.

A figura 2.12 mostra a taxa de crescimento inicial da tensão, dada por

$$\frac{dV_{TRT}(t=0)}{dt} = 1,5\sqrt{2}\omega I_{rms} Z_{eq} \text{ [SCHMUNK \& O'LEARY, 1987].}$$

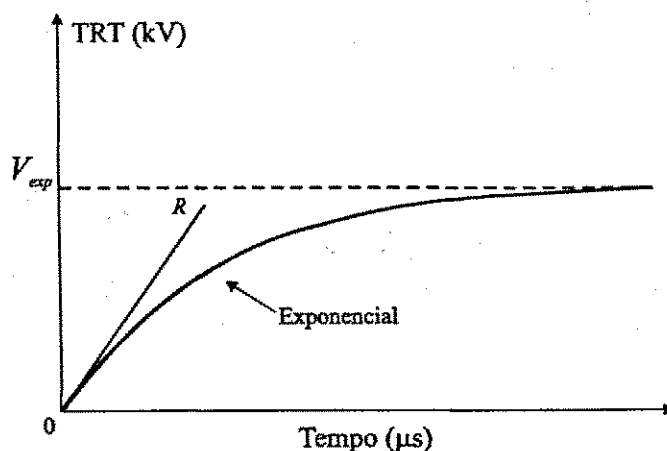


Figura 2.12 Componente transitória inicial

Nesta figura  $V_{exp}$  é o valor máximo da onda exponencial e  $R$  é a taxa de crescimento inicial.

A tensão  $V_{TRT}(t)$  comporta-se como uma onda viajante de tensão. Essa onda se inicia no ponto de falta e viaja ao longo de cada linha de transmissão conectada na barra até encontrar uma descontinuidade. Nesse ponto, uma parte da onda é refletida e viaja de volta em direção a barra de falta. Outra parte é transmitida para os demais ramos do circuito. Para o cálculo da tensão  $V_{TRT}(t)$  é necessário considerar apenas a onda incidente e o efeito da primeira reflexão de  $V_{TRT}(t)$  já que as demais reflexões em pontos de descontinuidades mais distantes são bastante atenuadas devido a perdas na rede. A primeira onda refletida é a onda incidente multiplicada por um coeficiente de reflexão,  $K_r$ , no ponto de descontinuidade. Devendo então ser multiplicada por um coeficiente de refração,  $K_t$ , no ponto de falta e adicionada à onda incidente original, como mostra a figura 2.13.

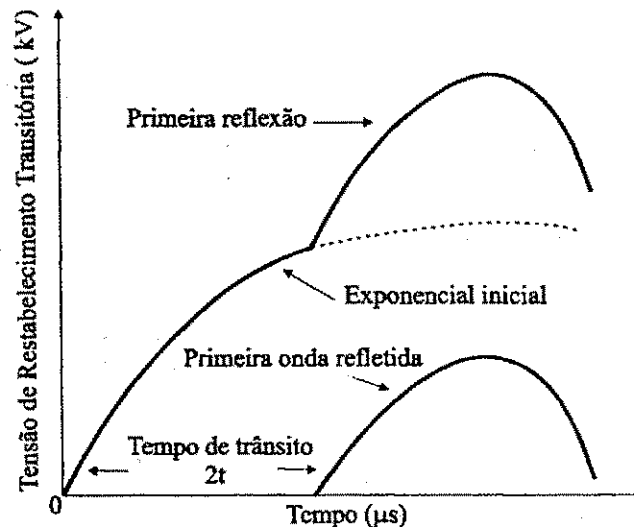


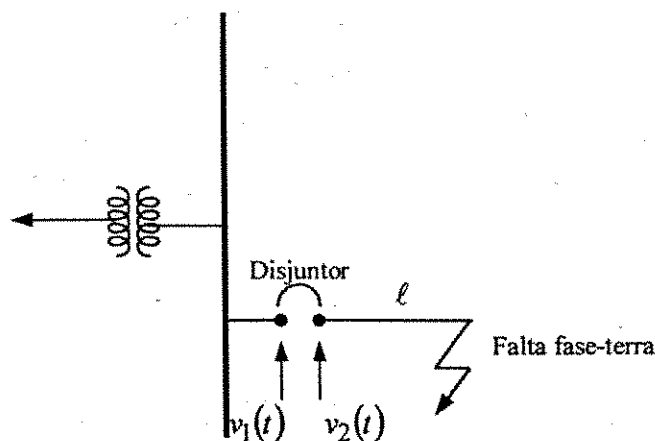
Figura 2.13 Forma de onda da TRT total



### 2.2.4 TRT em faltas quilométricas

Faltas quilométricas são curto-circuitos que ocorrem em linhas de transmissão a uma pequena distância dos terminais do disjuntor, no lado da carga. No caso da falta ser do tipo fase-terra, o valor da corrente de curto-circuito é menor do que em faltas terminais devido ao aumento da impedância do circuito pela adição da impedância do trecho da linha entre o disjuntor e o ponto de falta. O valor de pico da TRT produzido é menor, mas sua taxa de crescimento pode alcançar valores elevados.

A figura 2.14 mostra um circuito monofásico representando uma falta fase-terra a pequena distância dos terminais do disjuntor.



**Figura 2.14 Falta fase-terra à pequena distância dos terminais do disjuntor**

A falta está localizada ao longo da linha a uma distância  $l$ , no lado da carga do disjuntor. Após a interrupção de corrente, a tensão que aparece no lado da linha do disjuntor,  $v_2(t)$ , apresenta uma forma de onda do tipo dente de serra. Considera-se que a interrupção da corrente acontece no instante em que seu valor passar pelo primeiro zero após a abertura do disjuntor. A rampa inicial da tensão impõe condições severas no meio

dielétrico do disjuntor antes que este recupere sua rigidez dielétrica possibilitando uma reignição do arco elétrico.

A forma de onda da tensão no lado da fonte,  $v_1(t)$ , geralmente é do tipo exponencial-cosseno. Dependendo do sistema considerado  $v_1(t)$  pode ser do tipo um-menos-cosseno.

A TRT nos terminais do disjuntor pode ser vista na figura 2.15.

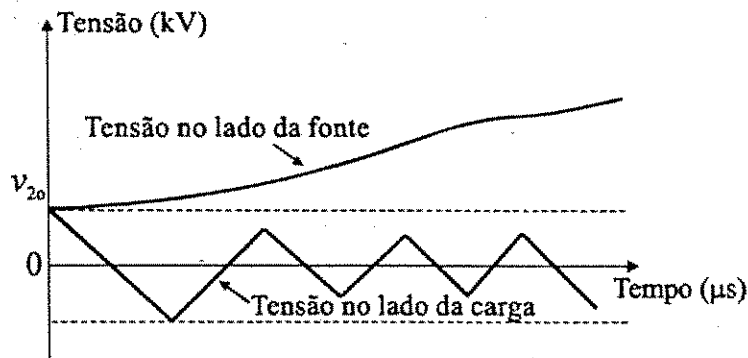


Figura 2.15 TRT para falta fase-terra à pequena distância do disjuntor

A TRT é igual a diferença de  $v_1(t)$  e da onda do tipo dente de serra,  $v_2(t)$ . Para um sistema sem perdas, a onda “dente de serra” teria seu ponto inicial com uma tensão residual  $v_{2o}$  e alcançaria o pico mínimo em  $-(v_{2o})$ , continuando a viajar atingindo os mesmos picos.

### 2.3 Fatores que influenciam na TRT

A TRT está diretamente relacionada com os parâmetros do sistema elétrico e pelo tipo e localização de falta ocorrida no sistema.

### 2.3.1 Parâmetros do sistema

Os parâmetros do sistema são importantes na determinação da TRT. A TRT é função do nível de tensão do sistema e da amplitude do valor da corrente de curto-circuito. A impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor tem grande influência no valor de pico da TRT e na sua taxa de crescimento.

### 2.3.2 Tipos e localizações de falta

Como explicado anteriormente, é importante verificar a TRT considerando a eliminação de faltas terminais e faltas monofásicas à pequena distância dos terminais do disjuntor. As condições de falta estudadas são mostradas nas figuras 2.16, 2.17 e 2.18.

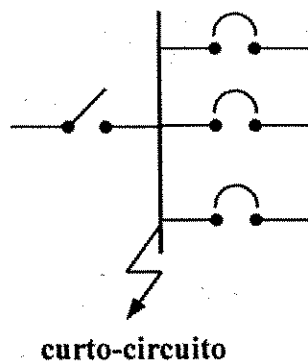


Figura 2.16 Falta trifásica não aterrada no barramento

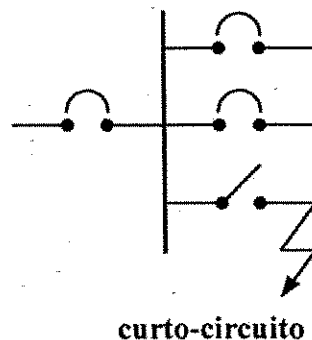
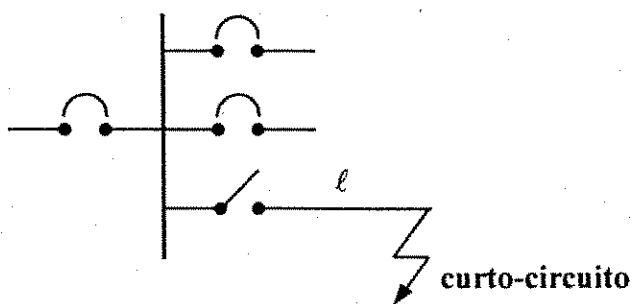


Figura 2.17 Falta trifásica não aterrada nos terminais do disjuntor



**Figura 2.18** Falta fase-terra à pequena distância dos terminais do disjuntor

## CAPÍTULO 3

### ESPECIFICAÇÕES DA TRT - NORMAS TÉCNICAS

Os parâmetros de circuitos de ensaio de curto-circuito, os parâmetros de TRT e os valores nominais de disjuntores são estabelecidos por normas técnicas. Estas normas, nacionais e internacionais, tem evoluído ao longo do tempo, podendo, assim, sofrer alterações a fim de refletir as mudanças nos sistemas elétricos.

Quanto às organizações de normas referentes a disjuntores, as duas maiores são:

- ANSI (*American National Standard Institute*);
- IEC (*Internacional Electrotechnical Commission*).

Ambas são muito influentes e mundialmente reconhecidas. As normas ANSI têm a preferência nos Estados Unidos e nos países que têm tido forte influência americana no desenvolvimento de seu setor elétrico. Hoje, a construção da maioria dos disjuntores que são vendidos no mundo seguem as orientações prescritas nas normas da IEC.

No Brasil a norma NBR-7118 - Disjuntores de alta tensão da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) fixa as características exigíveis dos disjuntores de corrente alternada projetados para sistemas de tensões acima de 1000 V e frequências iguais ou inferiores a 60 Hz [NBR-7118, 1994]. A norma utilizada no estudo é válida a partir de 31/10/1994 e baseia-se na norma IEC-56 - High-voltage alternating-current circuit-breakers do ano de 1987.

Quanto à tensão de restabelecimento transitória presumida e especificada de um circuito as normas estabelecem requisitos específicos para cada situação de falta no sistema, que são as faltas nos terminais do disjuntor e a pequena distância dos seus terminais. A TRT presumida é devida unicamente as características do circuito obtidas em ensaios de curto-circuito e a TRT especificada é aquela em que seus parâmetros são considerados como valores de referência.

Para facilitar o cálculo e a aplicação da TRT considera-se a TRT produzida apenas pela configuração do sistema sem levar em consideração as modificações ou distorções que podem surgir pela interação do disjuntor com o sistema. Esta TRT é chamada TRT típica. Dessa forma, um disjuntor ideal possui impedância zero, quando conduzindo e, no instante da corrente zero, sua impedância muda de zero para infinito. Para normalização, a TRT é representada através das envoltórias de suas formas de onda.

### **3.1 Normas ANSI**

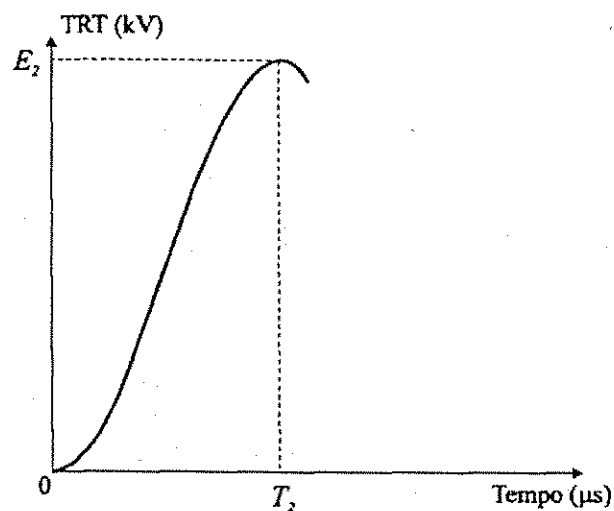
As normas da ANSI definem quatro tipos diferentes de TRT para todos os tipos de disjuntores:

- 1) Um-menos-cosseno: forma de onda que pode resultar da associação paralela de um indutor e um capacitor na interrupção de faltas trifásicas localizadas no secundário do transformador.
- 2) Exponencial-cosseno: forma de onda que pode ocorrer na interrupção de faltas trifásicas no secundário do transformador com a presença de linhas de transmissão na barra de falta.
- 3) TRT inicial: forma de onda adicional do tipo rampa, em que aparece na parte inicial da onda do tipo exponencial-cosseno.
- 4) TRT em falta quilométrica: forma de onda do tipo dente de serra que ocorre na interrupção de faltas em linhas de transmissão.

### **3.1.1 TRT especificada de ensaio em faltas terminais**

A ANSI tem adotado duas formas de onda para a representação da TRT em faltas nos terminais do disjuntor. São elas:

- Em disjuntores de tensão nominal igual ou abaixo de 72,5 kV, para qualquer faixa da capacidade de interrupção do disjuntor, a forma de onda da TRT é do tipo um-menos-cosseno. A TRT é definida através de dois parâmetros, como visto na figura 3.1.



**Figura 3.1 TRT para ensaio definida pela ANSI em disjuntores de tensão nominal  $\leq 72,5$  kV.**

Nesta figura:

$E_2$  corresponde à tensão de referência (valor de pico da TRT), em kV.

$T_2$  é o tempo para atingir  $E_2$ , em  $\mu s$ .

$E_2$  é igual a 1,88 vezes a máxima tensão nominal do disjuntor,  $V_n$ , e  $T_2$  varia em função da tensão, do tipo de disjuntor e da corrente de curto-circuito.

A TRT é definida como:

$$V_{TRT}(t) = E_2(1 - \cos \omega t), \quad (3.1)$$

sendo  $\omega = \frac{\pi}{T_2}$

- Em disjuntores de tensão nominal igual ou acima de 121 kV, nos quais a corrente de curto-circuito alternada é superior a 30% da sua máxima corrente de interrupção, a forma de onda é possivelmente do tipo exponencial-cosseno. Igual ou abaixo de 30%, a TRT é do tipo um-menos-cosseno.



Os parâmetros da curva exponencial-cosseno definidos pela ANSI são mostrados na figura 3.2.

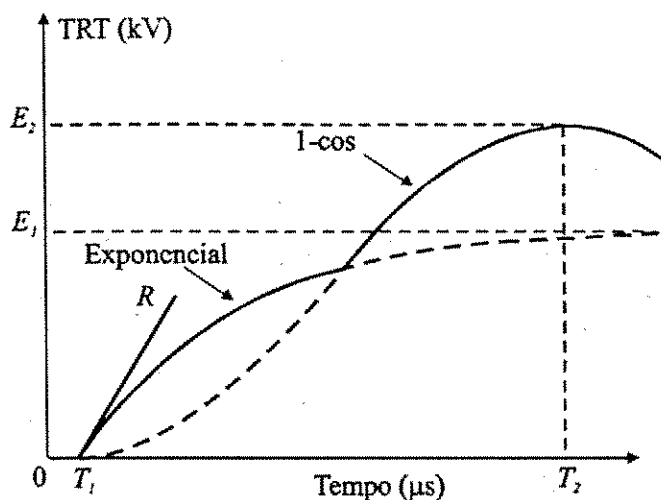


Figura 3.2 TRT para ensaio definida pela ANSI em disjuntores de tensão nominal > 72,5 kV.

A parte exponencial é definida por uma taxa de crescimento inicial,  $R$ , e o valor de pico,  $E_1$ .  $R$  varia com os valores nominais de tensão e corrente do disjuntor e  $E_1$  é igual a  $1,5 \sqrt{\frac{2}{3}} V_n = 1,225 V_n$ . O fator 1,5 representa o fator de primeiro pólo para falta trifásica não aterrada. A onda  $1 - \cos \alpha$  é definida por  $E_2$  e  $T_2$ . O valor de  $E_2$  é considerado igual a  $1,51 \alpha \cdot E_1 V_n = 1,76 V_n$ , em que 1,51 é um fator estabelecido a partir de resultados de testes de campo e  $\alpha$  corresponde a um fator de amortecimento igual a 0,95.  $T_2$  varia com a tensão e corrente nominais do disjuntor e  $T_1$  é o tempo de atraso correspondente ao efeito de retardamento na onda exponencial devido à capacitância do disjuntor no lado da fonte. Para disjuntores de 121 kV, a ANSI especifica  $T_1$  igual a 2,9  $\mu\text{s}$  e para disjuntores de 800 kV, um valor de 7,9  $\mu\text{s}$ .

Desprezando o efeito da capacitância do transformador e da barra de falta nos instantes iniciais após a interrupção de corrente, a TRT é definida como:

$$V_{TRT}(t) = 1,5\sqrt{2}\omega I_{rms} L_f \left[ 1 - e^{-\frac{Z_{eq}}{L_f} t} \right], \quad (3.2)$$

sendo  $Z_{eq}$  a impedância de surto equivalente das linhas de transmissão conectadas na barra de falta,  $L_f$  é a indutância do transformador e  $I_{rms}$  é o valor eficaz da componente senoidal da corrente de falta. A taxa de crescimento da TRT,  $R$ , determinada pela derivada da equação 3.2 em  $t = 0$  é dada por:

$$\frac{dV_{TRT}(0)}{dt} = R = 1,5\sqrt{2}I_{rms}\omega Z_{eq} \cdot 10^{-6} \quad (\text{kV}/\mu\text{s}), \quad (3.3)$$

Os valores especificados de  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $R$ ,  $I$ ,  $T_1$  e  $T_2$  encontram-se na tabela 5 da ANSI C37.06-1979.

De acordo com ANSI C37.011-1994, o tempo em que a onda viaja a partir do disjuntor até a primeira descontinuidade e retorna à barra de falta é:

$$T_s = 10,7 d \sqrt{\mu k} \quad (\mu\text{s}), \quad (3.4)$$

sendo

$d$  o comprimento até a primeira descontinuidade, em milha.

$\mu$  é a permeabilidade magnética relativa do meio.

$k$  é a constante dielétrica do meio onde está o circuito.

Em linhas aéreas, o valor de  $k$  para o ar é 1,00059.  $\sqrt{\mu k} = 1$ , então  $T_s$  é:

$$T_s = 10,7d \quad (\mu\text{s}). \quad (3.5)$$

### 3.1.2 TRT especificada de ensaio em faltas quilométricas

Para faltas a pequena distância a forma de onda da tensão no disjuntor no lado da linha é do tipo rampa como visto na figura 3.3. A amplitude do maior pico dessa tensão é  $d v_2(t)$ . Em que  $d$  é um fator de amplitude, considerando as perdas no sistema.

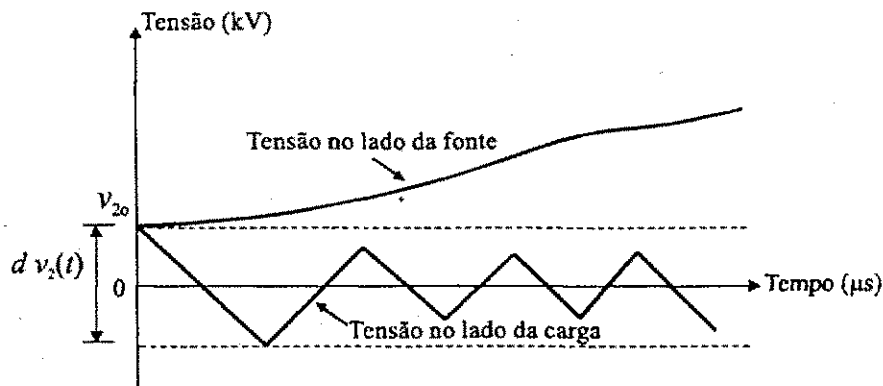


Figura 3.3 TRT para falta fase-terra à pequena distância do disjuntor

A taxa de crescimento da tensão no lado da linha,  $R$ , é dada por [ANSI C37.011, 1994]:

$$R = \sqrt{2} \omega I_L Z_\ell \cdot 10^{-6} \quad (\text{kV}/\mu\text{s}), \quad (3.6)$$

em que  $Z_\ell$  é a impedância de surto na linha e  $I_L$  é o valor eficaz da componente alternada da corrente de curto-circuito em falta fase-terra na linha.

De acordo com a norma ANSI C37.04-1979, a impedância de surto da linha e a constante  $d$  possuem os seguintes valores especificados:

- Para sistemas de tensão menor ou igual a 242 kV (linha com um condutor por fase):

$$Z_\ell = 450 \, \Omega \quad \text{e} \quad d = 1,8$$

- Para sistemas de tensão maior ou igual a 362 kV (linha com mais de um condutor por fase):

$$Z_c = 360 \Omega \quad e \quad d = 1,6$$

O tempo em que a tensão no lado da linha atingirá seu valor de pico é:

$$T_c = \ell \times t_L, \quad (3.7)$$

sendo

$\ell$  a distância do disjuntor até o ponto de falta, em milhas.

$t_L$  é duas vezes o tempo de trânsito para 1 mi ou 1,61 km de linha (10,7  $\mu$ s para linhas aéreas)

O pico da tensão no lado da linha é igual a:

$$V_{pico-linha} = T_c \times R \quad (\text{kV}) \quad (3.8)$$

A tensão no lado da linha possui um tempo de atraso devido a influência da capacitância na sua taxa de crescimento inicial. A norma da ANSI não considera esse tempo de atraso.

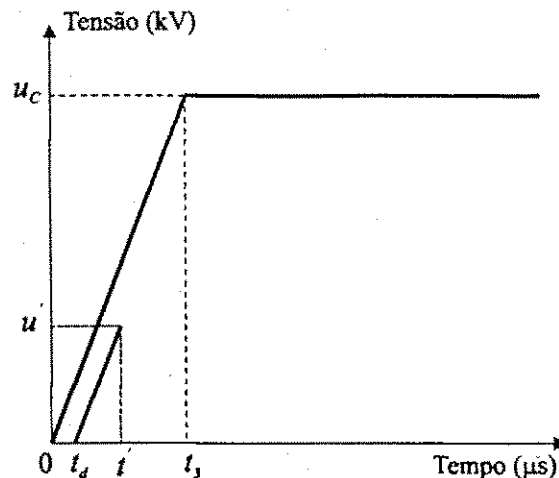
### 3.2 Normas IEC

A representação da TRT segue a norma IEC-56 High-voltage alternating-current circuit-breakers.

#### 3.2.1 TRT especificada de ensaio em faltas terminais

Para faltas terminais, a IEC define duas envoltórias para TRT presumidas:

- Para disjuntores de tensão nominal igual ou abaixo de 72,5 kV a TRT é representada por uma envoltória definida pelo método de dois parâmetros. A envoltória da TRT é definida por dois segmentos de reta, como visto na figura 3.4.



**Figura 3.4 Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC em disjuntores de tensão nominal  $\leq 72,5$  kV.**

Nesta figura:

$u_c$  é o maior valor de pico da TRT, em kV;

$t_3$  é o tempo para atingir a tensão  $u_c$ , em  $\mu s$ .

$t_d$  é o retardo nominal, em  $\mu s$ .

$u'$  é uma tensão de referência, em kV e

$t'$  é o tempo para atingir a tensão  $u'$ , em  $\mu s$ .

O segmento de reta definindo um retardo é considerado somente para testes de ensaio. Parte de um ponto situado sobre o eixo dos tempos, correspondendo ao retardo nominal,  $t_d$ , e se desenvolve paralelamente ao primeiro segmento de reta do traçado de

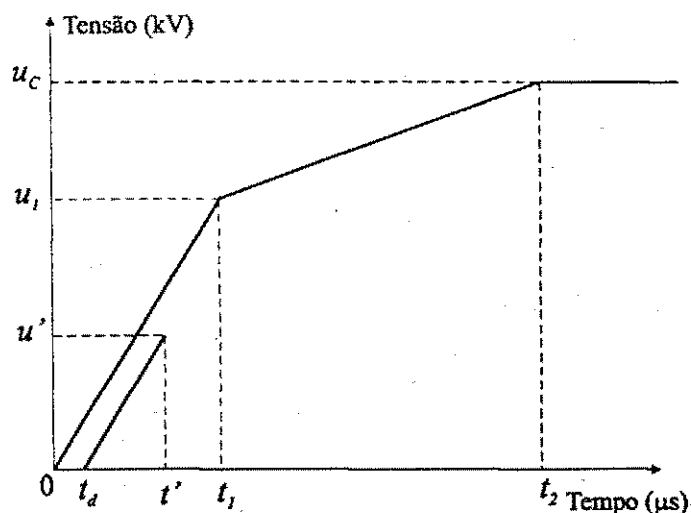
referência da TRT até um ponto correspondente a uma tensão dada  $u'$  e a um tempo  $t'$ . O

valor de  $u_c$  é igual a  $1,4 \times 1,5 \times \sqrt{\frac{2}{3}} = 1,715 V_n$  e  $t_3$  varia com a tensão nominal do disjuntor.

Os valores de  $t_d$ ,  $u'$  e  $t'$  representam o efeito similar ao tempo de atraso,  $T_1$ , das normas

ANSI. Para disjuntores de tensão nominal menor ou igual a 72,5 kV,  $u' = \frac{1}{3} u_c$ .

- Para disjuntores de tensão nominal acima de 72,5 kV, a envoltória da TRT é definida pelo método de quatro parâmetros. A envoltória é definida por três segmentos de reta, como visto na figura 3.5.



**Figura 3.5** Envoltória a quatro parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC em disjuntores de tensão nominal  $> 72,5$  kV.

Nesta figura:

$u_1$  é a primeira tensão de referência, em kV;

$t_1$  é o tempo para atingir a tensão  $u_1$ , em  $\mu s$ ;

$u_c$  é a segunda tensão de referência (maior valor de pico da TRT), em kV;

$t_2$  é o tempo para atingir a tensão  $u_c$ , em  $\mu s$ .

Para disjuntores de tensão nominal entre 100 e 170 kV aplicados em sistemas não aterrados,  $u_1$  é igual a  $1,225 V_n$  e  $u_c$  é igual a  $1,4u_1 = 1,715 V_n$ . Para disjuntores com a mesma faixa de tensão aplicados em sistemas aterrados e para todos os disjuntores de tensão igual e acima de 245 kV,  $u_1$  é igual a  $1,3\sqrt{\frac{2}{3}} = 1,061 V_n$ . O fator de primeiro pólo considerado é 1,3.  $u_c$  é igual a  $1,4u_1 = 1,485 V_n$ . O valor de  $t_1$  varia com a tensão nominal do disjuntor assim como  $T_2$  nas normas ANSI. O valor de  $t_2$  é sempre três vezes  $t_1$ .

Para disjuntores acima de 121 kV, a IEC especifica o tempo de atraso,  $t_d$ , igual a  $2 \mu s$ .

As normas IEC fazem a distinção entre sistemas aterrados e não aterrados através dos fatores de primeiro pólo 1,3 e 1,5 respectivamente. Enquanto que as normas ANSI usam apenas o fator de primeiro pólo igual a 1,5.

### 3.2.2 TRT especificada de ensaio em faltas quilométricas

A IEC recomenda a representação da TRT apenas para disjuntores de tensão igual ou acima de 52 kV e capacidade de interrupção nominal em curto-circuito superior a 12,5 kA. Estes disjuntores são designados para a conexão direta com linhas aéreas. O valor do tempo de atraso da tensão no lado da linha é de  $0,2 \mu s$  para sistemas de tensão menor ou igual a 170 kV e  $0,5 \mu s$  para sistemas de tensão maior ou igual a 245 kV. Os valores da impedância de surto da linha,  $Z$ , e o fator de pico,  $k$  são  $450 \Omega$  e 1,6, respectivamente. O valor de  $k$  representa o mesmo que o fator de amplitude  $d$ , mencionado no item 3.1.2.

### 3.3 Normas ABNT

A ABNT utiliza no estudo de TRT a norma NBR-7118 (Disjuntores de alta tensão, válida a partir de 31/10/1994) que se baseia na norma IEC-56 (High-voltage alternating-current circuit-breakers, de 1987).

#### 3.3.1 TRT presumida de ensaio em faltas terminais

Para as faltas nos terminais, é adotado o mesmo critério de representação da TRT escrito na norma IEC-56.

Para disjuntores de tensão nominal igual ou abaixo de 72,5 kV, a envoltória da TRT é definida por dois segmentos de reta e para disjuntores de tensão nominal acima de 72,5 kV a envoltória é definida por três segmentos de reta.

Para a construção dos segmentos de reta que constituem a envoltória da curva da TRT são seguidos procedimentos estabelecidos em norma. As figuras 3.6 e 3.7 mostram a representação de uma TRT presumida por quatro e dois parâmetros.

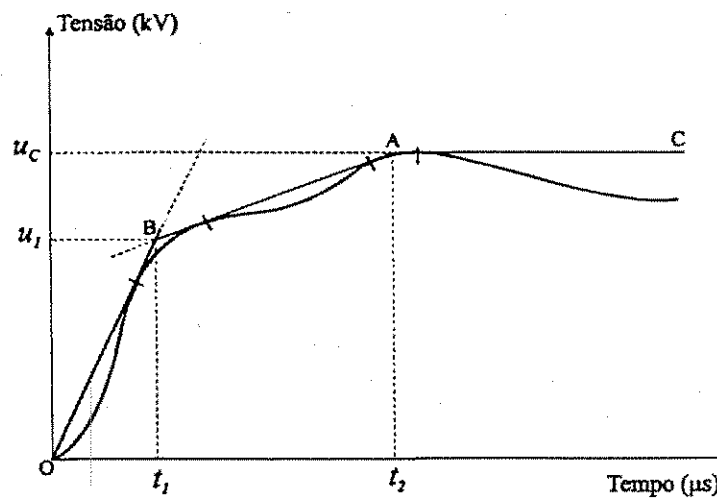


Figura 3.6 Representação por quatro parâmetros de uma TRT presumida .



capacitância local do disjuntor no lado da fonte de alimentação, a qual reduz a taxa de crescimento da TRT durante alguns microsegundos, após a interrupção de corrente.

As envoltórias da TRT especificadas são as mesmas da norma IEC-56, figuras 3.4 e 3.5. As linhas de referência especificadas, de retardo e da TRTI para os ensaios de  $100\%I$  são dadas pelos valores encontrados nas tabelas 4 a 7 do anexo B da norma NBR-7118 (1994), em que  $I$  corresponde ao valor eficaz da componente alternada da capacidade de interrupção nominal em curto-circuito. Para os ensaios de  $60\%I$ ,  $30\%I$  e  $10\%I$ , os valores especificados da linha de referência a dois parâmetros são indicados nas tabelas 31 e 35 do anexo B da norma NBR-7118 (1994).

A TRTI não é especificada para ensaios referentes a  $60\%I$ ,  $30\%I$ ,  $10\%I$  e inferiores. [NBR-7118, 1994].

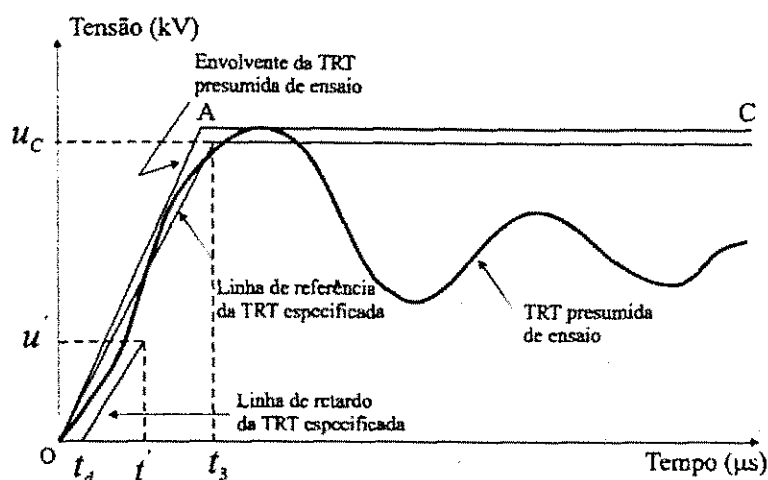
### 3.3.3 Comparação da TRT presumida e especificada de ensaio

A onda da TRT presumida de ensaio deve estar de acordo com duas exigências:

1) Sua envoltória não deve, em nenhum ponto, estar situada abaixo da linha de referência especificada.

2) Quando for especificada uma TRTI (tensão de restabelecimento transitória inicial), a parte inicial da TRT deve atingir a crista especificada da TRTI,  $u_i$ , em um tempo não superior a  $t_i$  e não deve cortar a linha de retardo da TRT especificada.

A figura 3.8 mostra um exemplo de TRT presumida de ensaio com uma envoltória a dois parâmetros, que atende às condições exigidas de uma TRT especificada a dois parâmetros.



**Figura 3.8** Exemplo de TRT presumida de ensaio com envoltório a dois parâmetros que atende às condições exigidas para o ensaio de tipo (caso da TRT especificada com linha de referência a dois parâmetros).

### 3.3.4 TRT especificada de ensaio em faltas quilométricas

A ABNT só exige ensaios de faltas monofásicas em linhas para disjuntores de tensão nominal igual ou superior a 72,5 kV e de capacidade de interrupção nominal em curto-circuito superior a 12,5 kA. Para sistemas de tensão nominal menor ou igual a 145 kV, o tempo de retardo é 0,2  $\mu\text{s}$  e para tensão maior ou igual a 242 kV, é de 0,5  $\mu\text{s}$ . Os valores da impedância de surto nominal da linha,  $Z$ , do fator de crista nominal,  $k$ , são os mesmos da norma IEC. Os valores da TRT especificada no caso da faltas na linha são apresentados nas tabelas 8 e 9 da NBR-7118 (1994).

## CAPÍTULO 4

### REPRESENTAÇÃO DA TRT ESTUDADA

Este capítulo mostra a representação da TRT e os valores dos seus parâmetros estabelecidos na norma que são utilizados no estudo.

#### 4.1 Representação da TRT utilizada no estudo

Grande parte das formas de onda de TRT da subestação Angelim, obtidas através das simulações digitais, são do tipo exponencial-cosseno. Pela NBR-7118, este tipo de curva é representada por uma envoltória de quatro parâmetros. Como a tensão nominal dos disjuntores em estudo é 15 kV, a TRT é representada por uma envoltória de dois parâmetros.

Os dois parâmetros representativos da TRT correspondem ao valor de pico da TRT ( $U_c$ ), definido como o maior valor de tensão da TRT, e a taxa de crescimento da TRT ( $TCTRT$ ) como sendo a variação da tensão de restabelecimento transitória em relação

ao tempo. A *TCTRT* pode ser expressa de quatro maneiras diferentes, de acordo com a figura 4.1 [CCON, 1991].

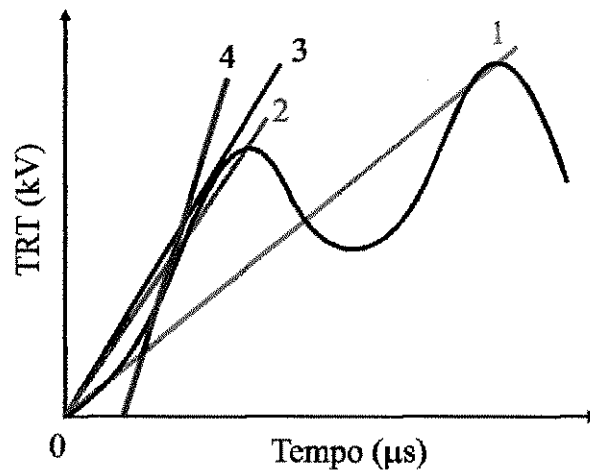


Figura 4.1 Taxa de Crescimento da TRT

Nesta figura:

- 1 é a taxa média de crescimento de zero ao pico máximo da TRT.
- 2 é a taxa média de crescimento de zero ao primeiro pico da TRT.
- 3 é a taxa máxima de crescimento, expressa como a tangente da TRT pela origem.
- 4 é a valor máximo da TCTRT.

Na figura 4.2 são mostrados  $U_c$  (kV) e *TCTRT* (kV/μs).  $U_c$  corresponde ao maior valor da tensão no seu período transitório, quando da abertura do circuito em condições de falta.

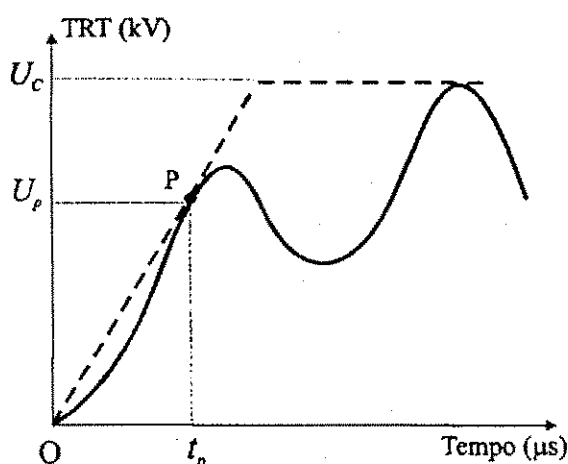


Figura 4.2 Valor de pico da TRT e sua taxa de crescimento

Em situações práticas, a *TCTRT* é considerada a máxima taxa de crescimento, expressa pela inclinação da reta *OP*.

Os valores de pico da TRT e das suas taxa de crescimento estabelecidos pela norma NBR-7118, considerando 100%, 60% e 30% da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores de classe 15 kV, são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Suportabilidade a TRT nos disjuntores 15 kV

Capacidade de Interrupção Simétrica	$U_c$ (kV)	<i>TCTRT</i> (kV/μs)
0 - 30%	27,6	1,97
30% - 60%	27,6	0,95
60% - 100%	25,7	0,38

A percentagem da corrente de interrupção nos disjuntores é obtida através da equação 4.1 [CCON, 1991].

$$I_{cc} \% = \frac{I_{cc}}{I_{máx}} \times 100 \quad (4.1)$$

em que

$I_{cc}$  é o valor de pico da corrente de curto-circuito através dos contatos do disjuntor e  $I_{m\acute{a}x}$  é o valor de pico da componente alternada da capacidade de interrupção nominal em curto-circuito.

#### 4.2 Comparação entre a TRT obtida no estudo e a TRT especificada

Para os disjuntores instalados em subestações estarem adequados às solicitações de TRT, a envoltória da TRT obtida no estudo deve estar abaixo da TRT especificada. Ou seja, os parâmetros representativos da TRT obtidos devem estar abaixo dos parâmetros estabelecidos em norma.

#### 4.3 Cálculo da TRT

Considerando as indutâncias, capacitâncias e resistências dos circuitos, o cálculo da TRT torna-se muito complexo, assim é necessário utilizar programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos para estimar a TRT em disjuntores, como programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*).

Testes de campo têm validado estudos feitos com o EMTP. Em 1988, na França, foram realizados estudos de TRT em disjuntores de média tensão em subestações pertencentes à EDF (*Electricite de France*). Foram realizadas simulações digitais e testes de campos em várias configurações de uma subestação de tensão 225/20 kV, em Paris. Nas simulações foram utilizadas redes equivalentes. As simulações com um programa do tipo

EMTP forneceram resultados bastante próximos aos resultados obtidos através dos testes de campo.

Neste trabalho de dissertação é utilizado o ATP<sup>®</sup> (*Alternative Transient Program*) para o cálculo de transitórios eletromagnéticos. O ATP<sup>®</sup> utiliza métodos no domínio do tempo, que consiste em calcular os valores das tensões e correntes nos componentes do sistema em função do tempo. O procedimento é feito passo a passo ao longo do tempo em intervalos constantes. Partindo-se das condições iniciais em  $t = 0$ , calculam-se as tensões e correntes nos componentes em  $t = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ , até o tempo máximo de simulação,  $t_{\text{máx}}$ . O ATP<sup>®</sup> é amplamente utilizado dentre as concessionárias de energia elétrica.

O estudo de transitórios eletromagnéticos em disjuntores pode ser feito através de simulações digitais, analisando as formas de onda da TRT entre os terminais dos disjuntores no domínio do tempo.

No programa, são representados os componentes do sistema como os transformadores, cabos, linhas, disjuntores, carga e outros. Na prática atual, estes componentes são representados a partir de um determinado ponto do sistema. Para o estudo de TRT, este ponto corresponde no mínimo à segunda barra além daquela onde o disjuntor em estudo está conectado. A representação do sistema elétrico até esta barra é feito através de uma fonte de tensão em série com a impedância equivalente de Thévenin. Esse procedimento tem mostrado ser suficiente para não afetar a resposta transitória durante o período de interesse do fenômeno [CCON, 1991].

## CAPÍTULO 5

### SIMULAÇÕES DIGITAIS

Neste capítulo é feito um estudo detalhado da adequabilidade dos disjuntores quanto à solicitação de TRT da subestação Angelim, pertencente à CHESF, localizada no estado de Pernambuco. Uma configuração atual do sistema elétrico de transmissão da região nordeste encontra-se no anexo I. A subestação Angelim assume grande importância quanto à sua localização.

#### 5.1 Introdução

O estudo compreende simulações digitais de TRT, utilizando o ATP, quando da abertura do primeiro pólo do disjuntor por ocasião da eliminação do curto-circuito trifásico não aterrado em seus terminais para a determinação dos parâmetros da TRT ( $U_c$  e  $TCTRT$ ). É considerado também faltas quilométricas. As simulações são realizadas no setor de 13,8 kV da subestação, considerando o ano de 1998 e a expansão do



sistema até o ano de 2007. A figura 5.1 mostra a configuração da subestação Angelim utilizada nas simulações.

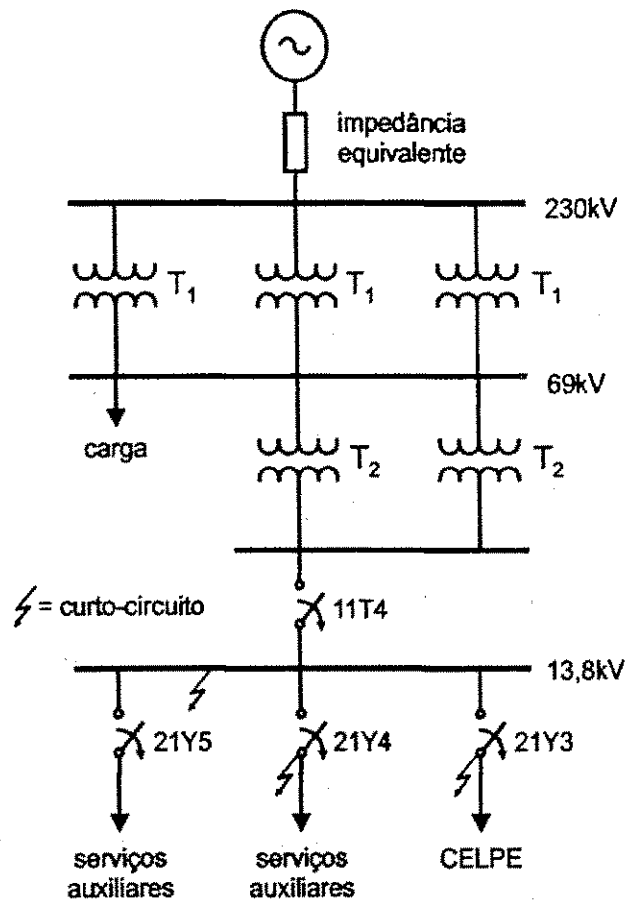


Figura 5.1 Subestação Angelim

Nesta figura  $T_1 = 33,3$  MVA para o ano de 1998 e  $T_1 = 100$  MVA para o ano de 2003.  $T_2$  é igual a 5 MVA para as configurações desses dois anos.

A forma de onda da TRT é analisada nos seguintes casos:

- 1) Análise de TRT nos terminais do disjuntor de posição 11T4, na ocorrência de um curto-circuito trifásico não-aterrado no segundo barramento de 13,8 kV;

- 2) Análise de TRT nos terminais do disjuntor de posição 21Y4, na ocorrência de um curto-circuito trifásico não-aterrado em seus terminais.
- 3) Análise de TRT nos terminais do disjuntor de posição 21Y3, na ocorrência de um curto-circuito trifásico não aterrado em seus terminais;

Normalmente as concessionárias de energia elétrica representam os transformadores sem incluir os efeitos da saturação. Porém, estudos realizados pela Ontario Hydro sugerem uma representação detalhada do núcleo do transformador, através de modelos dependentes da frequência [TARASIEWICZ, et al, 1993]. Para verificar se o efeito da saturação é importante na TRT em cada caso em estudo da subestação Angelim, são feitas simulações sem e com a representação da característica de saturação.

Para analisar a influência da linha de 13,8 kV na TRT, simulações são feitas utilizando parâmetros distribuídos. Esta linha é considerada como um alimentador trifásico com 15 km de comprimento. Os valores da resistência ( $R$ ), reatância indutiva ( $\omega L$ ) e susceptância ( $\omega C$ ) por unidade de comprimento, no domínio modal, são obtidos através da subrotina do EMTP, MTLIN. Nas simulações é feita uma análise de sensibilidade de carga, considerando as situações de sem carga, carga de 0,5 MW e plena carga no setor de 13,8 kV da subestação. Foi realizada também a análise de TRT no disjuntor 21Y3, considerando a ocorrência de um curto-circuito fase-terra a uma distância de 1, 3 e 5 km dos seus terminais.

De acordo com os dados fornecidos pela CHESF, os disjuntores de posições 11T4, 21Y4 e 21Y3 de fabricação Wenco, de modelo 144G1000, utilizam o óleo como meio de extinção e têm tensão máxima operativa de 15,5 kV. O disjuntor 11T4 possui as seguintes características:

Máxima corrente de interrupção simétrica: 40 kA

Corrente Nominal: 1200 A

Ano de fabricação: 1967

Enquanto que os disjuntores 21Y4 e 21Y3 possuem os seguintes valores:

Máxima corrente de interrupção simétrica: 16 kA

Corrente Nominal: 560 A

Ano de fabricação: 1975

Os dados representativos dos componentes da subestação no ATP são apresentados nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 [CHESF, 1998].

**Tabela 5.1 Equivalente no barramento de 230 kV**

Seqüência	1998		2003	
	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )
Positiva	0,0025	0,0205	0,0023	0,0187
Zero	0,0049	0,0224	0,0029	0,0165

**Tabela 5.2 Dados de transformador**

Potência nominal (MVA)	33,3	5	100
$X_{ab}$ (%) seqüência positiva $S_{base} = 100$ MVA	73,15	12,52	13,20

**Tabela 5.3 Dados de carga**

Tensão na Barra (kV)	1998		2003	
	MW	MVA <sub>r</sub>	MW	MVA <sub>r</sub>
69	104	27,4	123	32,3
13,8	3	0	4,2	0

Tabela 5.4 Parâmetros dos cabos

R (ohm/km/fase)	$X_L$ (ohm/km/fase)	C (nF/km/fase)
0,147	0,349	12,35

Tabela 5.5 Comprimento dos cabos

Barra 230 kV – Transformador 33,3 MVA	45m
Barra 69 kV – Transformador 5 MVA	30m
Transformador 5 MVA – Disjuntor 11T4	15m
Disjuntor 11T4 - Barra 13,8 kV	3m
Barra 13,8 kV - Disjuntor 21Y5	5m
Barra 13,8 kV - Disjuntor 21Y3	10m
Barra 13,8 kV – Disjuntor 21Y4	2m

O sistema é representado, no ATP, através de uma fonte de tensão em série com a impedância equivalente de Thévenin no barramento de 230 kV, seguido dos demais componentes da subestação. A tensão no barramento de 230 kV é calculada admitindo-se uma tensão de 1,05 p.u. no primeiro barramento de 13,8 kV. A carga no barramento de 13,8 kV é puramente resistiva.

Um exemplo de simulação de TRT realizada neste trabalho é o arquivo de entrada de dados no ATP mostrado no anexo 2. Se o usuário desejar incluir a representação da linha de 13,8 kV, a característica de saturação e a carga no barramento de 13,8 kV basta habilitar os cartões de comentários nas seções correspondentes. O mesmo procedimento deverá ser seguido para a representação dos dispositivos de ZnO entre os terminais do disjuntor, como alternativa para a redução da TRT.

Em simulações de transitórios eletromagnéticos, a curva de saturação, vista na figura 5.2, é representada através da linearização por segmentos, como mostra a figura 5.3.

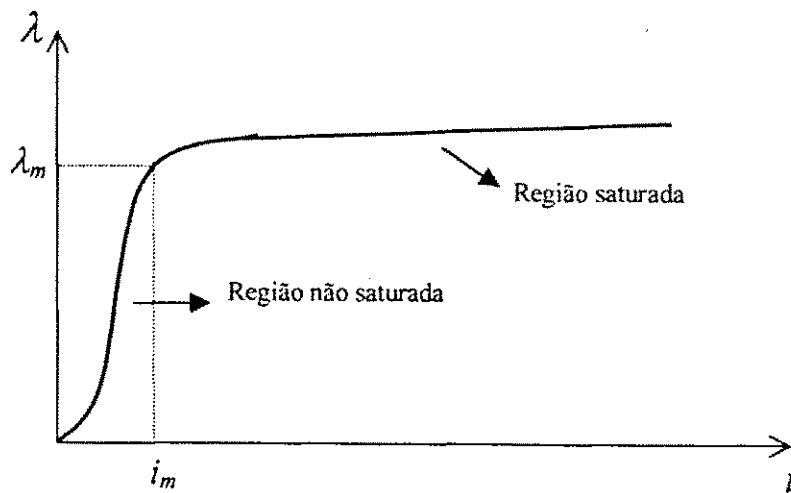


Figura 5.2 Curva de saturação

sendo  $\lambda_m$  e  $i_m$  o fluxo e a corrente de magnetização, respectivamente.

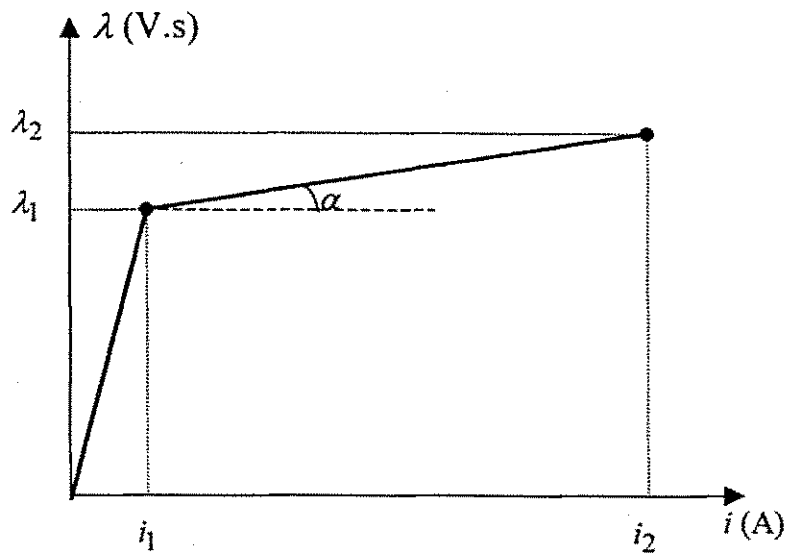


Figura 5.3 Linerização por dois segmentos da curva de saturação

em que

$\lambda$  é igual ao fluxo enlaçado pelo enrolamento secundário do transformador,

em V.s,

$i$  corresponde a corrente no enrolamento secundário do transformador, em A, e  $\alpha$  é a inclinação da reta na região de saturação.

A linearização por dois segmentos mostra-se ser suficiente na representação da curva de saturação [DOMMEL, 1992]. O fluxo,  $\lambda_1$ , possui valores típicos na faixa de  $(1,25 \text{ a } 1,3)\lambda_n$ , sendo  $\lambda_n$  igual ao fluxo nominal enlaçado. A corrente,  $i_1$ , está na faixa de  $(0,1 \text{ a } 0,5\%)I_n$ , em que  $I_n$  é a corrente nominal no enrolamento do transformador. E a inclinação está na faixa de  $(1,5 \text{ a } 5)L_{cc}$ , sendo  $L_{cc}$  a indutância de curto-circuito. São utilizados os valores de pico de  $i$  e  $\lambda$ . O valor de  $\lambda_1$  utilizado é:

$$\lambda_1 = 1,25\lambda_n\sqrt{2} \quad (5.1)$$

sendo  $\lambda_n$  expresso por:

$$\lambda_n = \frac{V_f}{\omega} \quad (\text{V.s}) \quad (5.2)$$

em que

$V_f$  é o valor eficaz da tensão no enrolamento secundário do transformador, em V, e  $\omega = 2\pi f = 377 \text{ rad/s}$ ; para  $f = 60 \text{ Hz}$ .

A inclinação,  $\alpha$ , utilizada é:

$$\alpha = 1,5L_{cc} \quad (5.3)$$

em que  $L_{cc} = \frac{X_{ab}}{2\pi f}$ , sendo  $X_{ab}$  igual a reatância de dispersão do enrolamento, em  $\Omega$ .

Os valores dos pontos  $(i, \lambda)$  utilizados para o transformador trifásico equivalente com potência nominal de 100 MVA são:

$i$ (A)	$\lambda$ (V.s)
0,8540	323,5436
14037,3582	970,6308

Para o transformador trifásico equivalente com potência nominal de 10 MVA, os valores são:

$i$ (A)	$\lambda$ (V.s)
0,197024	37,3596
15753,5682	112,0788

Para o transformador trifásico equivalente com potência nominal de 300 MVA:

$i$ (A)	$\lambda$ (V.s)
2,5625	323,5436
77684,0991	970,6308

## 5.2 Formas de onda da TRT obtidas

Os resultados obtidos nas simulações<sup>1</sup> para um curto-circuito trifásico não aterrado nos terminais dos disjuntores de posições 11T4, 21Y4 e 21Y3 podem ser divididos em 3 grupos para cada disjuntor:

**Grupo 1)** Sem a representação da curva de saturação do núcleo dos transformadores e sem a representação da linha de 13,8 kV;

**Grupo 2)** Com a representação da curva de saturação do núcleo dos transformadores;

**Grupo 3)** Com a representação da linha de 13,8 kV.

---

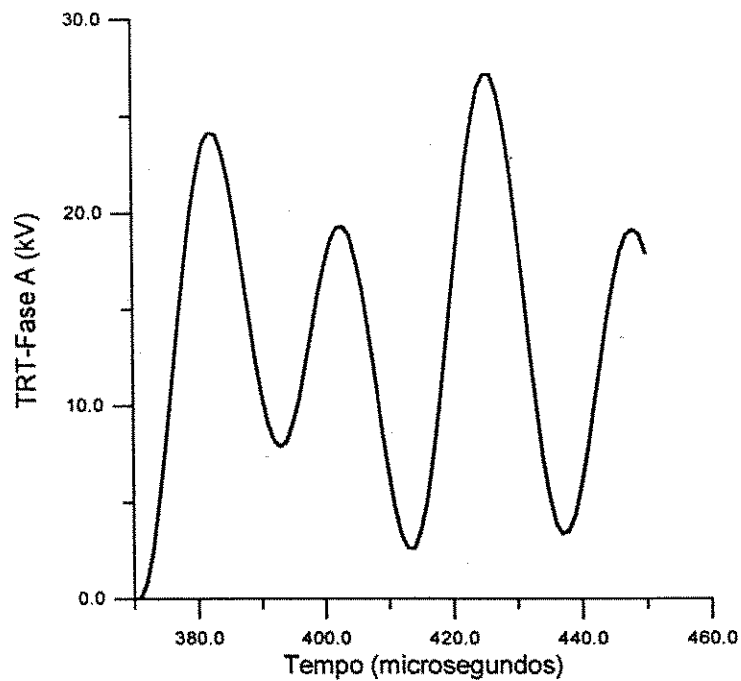
<sup>1</sup> O passo de tempo,  $\Delta t$ , é de 1  $\mu$ s para as simulações de curto-circuito trifásico não aterrado e curto-circuito fase-terra.

Em condições normais de operação, o valor de pico da tensão fase-terra na barra do equivalente ( barra de 230 kV) é de:

$$V_{F.T} = 219 \text{ kV} - 1998$$

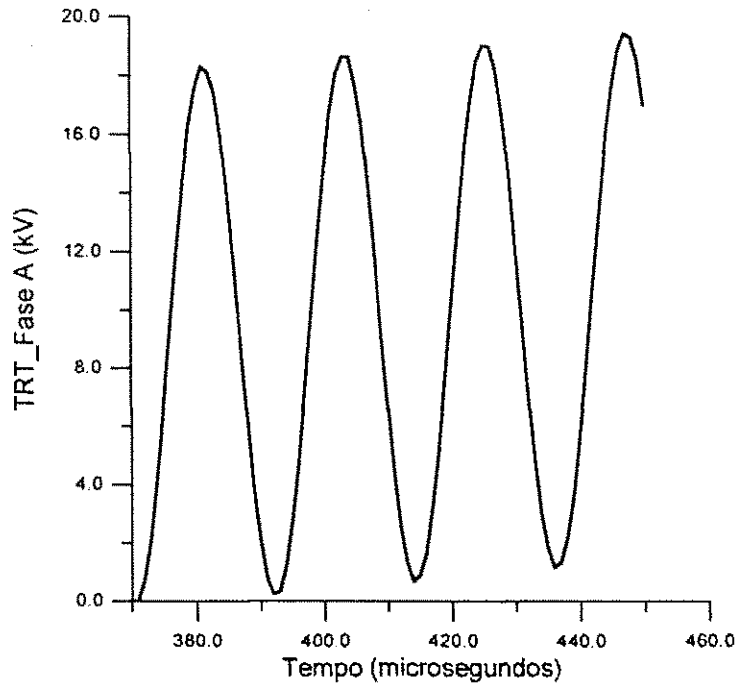
$$V_{F.T} = 202 \text{ kV} - 2003$$

As figuras 5.4 e 5.5 mostram a TRT na fase A nos terminais do disjuntor 11T4, considerando o grupo 1, ano de 1998, nas configurações de sem carga e plena carga no barramento de 13,8 kV, respectivamente.



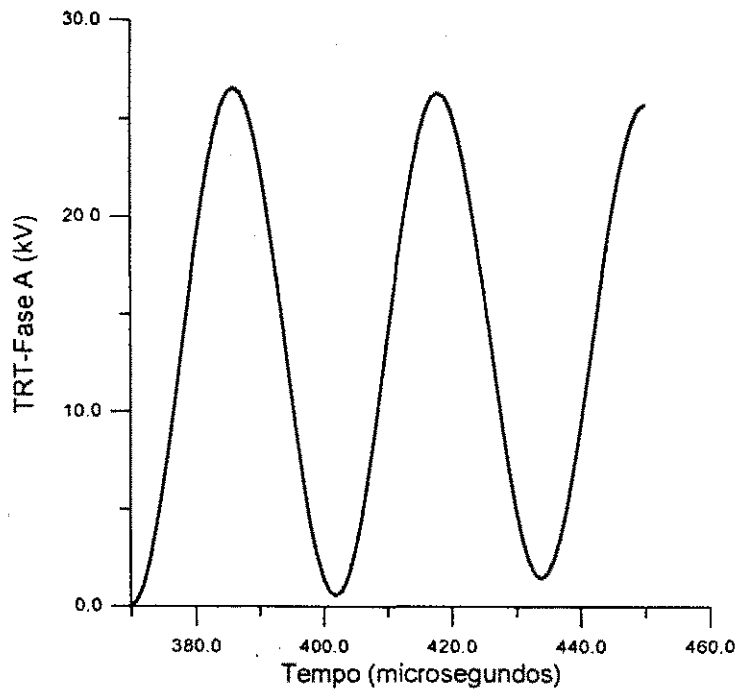
**Figura 5.4 TRT – Disjuntor 11T4 – Ano 1998  
( Sem carga no barramento de 13,8 kV)**



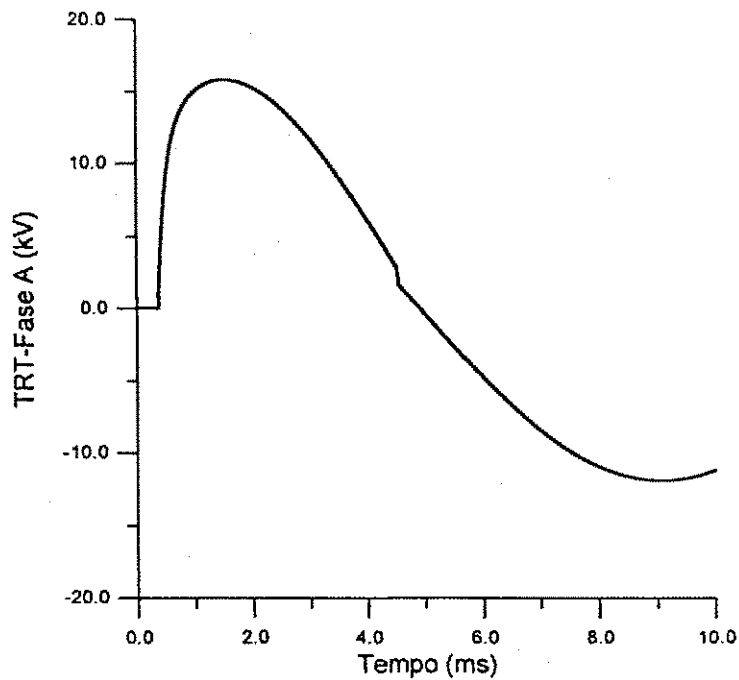


**Figura 5.5 TRT – Disjuntor 11T4 – Ano 1998  
( Plena carga no barramento de 13,8 kV)**

Nas figuras 5.6 e 5.7 são apresentadas as formas de onda da TRT nos terminais do disjuntor 21Y4, considerando o grupo 1, ano de 1998, nas configurações de sem carga e plena carga no barramento de 13,8 kV, respectivamente.

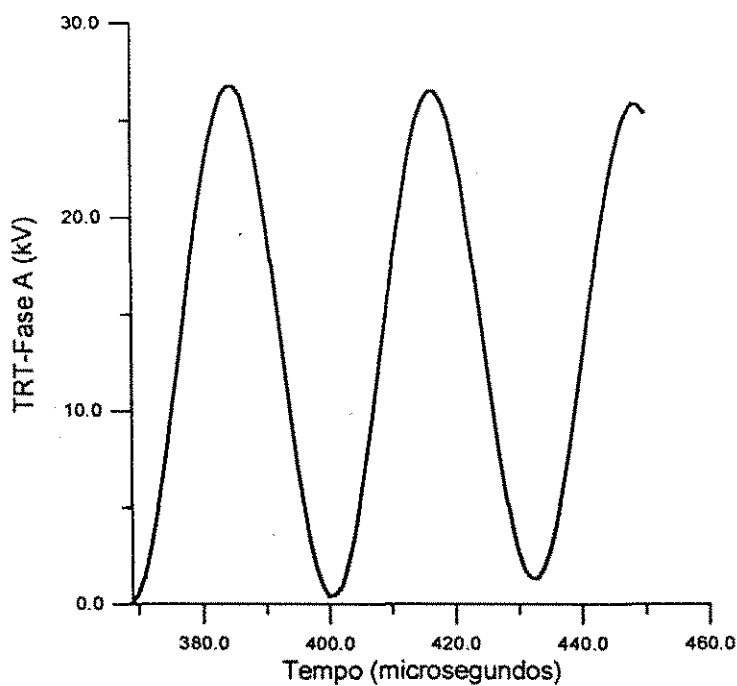


**Figura 5.6 TRT – Disjuntor 21Y4 – Ano 1998**  
**( Sem carga no barramento de 13,8 kV)**



**Figura 5.7 TRT – Disjuntor 21Y4 – Ano 1998**  
**( Plena carga no barramento de 13,8 kV)**

Nas figuras 5.8 e 5.9 são apresentadas as formas de onda da TRT nos terminais do disjuntor 21Y3, considerando o grupo 1, ano de 1998, nas configurações de sem carga e plena carga no barramento de 13,8 kV, respectivamente.



**Figura 5.8 TRT – Disjuntor 21Y3 – Ano 1998**  
**( Sem carga no barramento de 13,8 kV)**

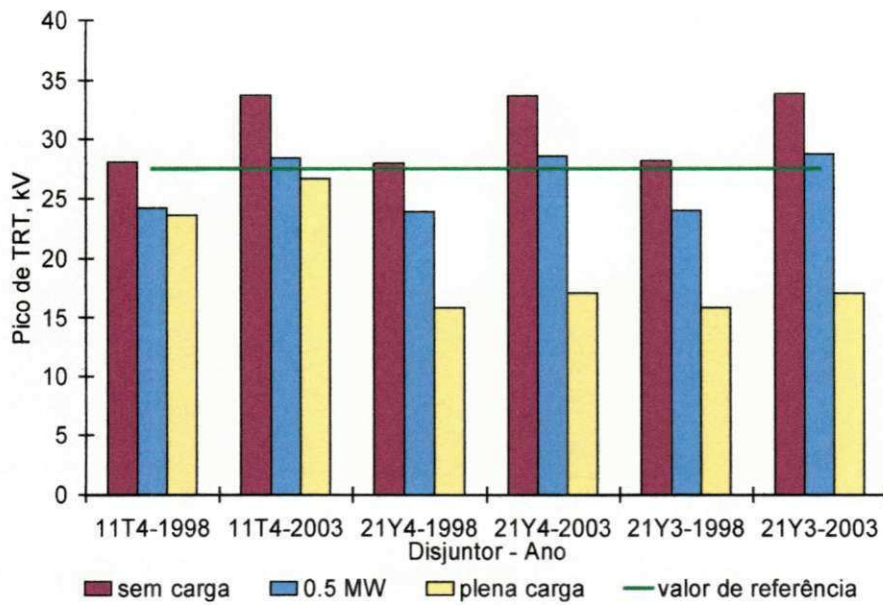


**Figura 5.9 TRT – Disjuntor 21Y3 – Ano 1998**  
(Plena carga no barramento de 13,8 kV)

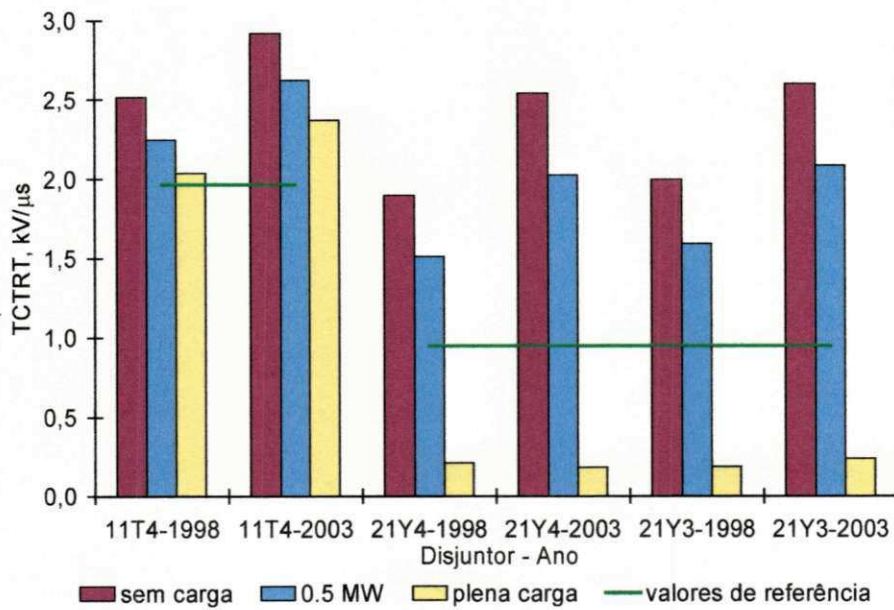
### 5.3 Parâmetros da TRT obtidos

Os valores do primeiro pico da TRT, o valor do maior pico,  $U_c$ , e a  $TCTRT$  são calculados através da implementação de um programa computacional, na linguagem FORTRAN 90. Este programa lê os pontos de tempo e valores de tensão nos terminais do disjuntor nas fases a, b e c no arquivo de saída do ATP (.lis). O valor de pico da corrente de curto-circuito em regime permanente,  $I_{cc}$ , é obtido a partir da leitura do arquivo (.lis). O programa compara os valores obtidos com os valores estabelecidos por norma, calculando a percentagem da corrente de interrupção no disjuntor.

Os resultados das simulações para todos os disjuntores na interrupção de um curto-circuito trifásico não aterrado são apresentados nas figuras 5.10 e 5.11.



**Figura 5.10** Valores de pico da TRT sem a representação da curva de saturação e da linha de 13,8 kV



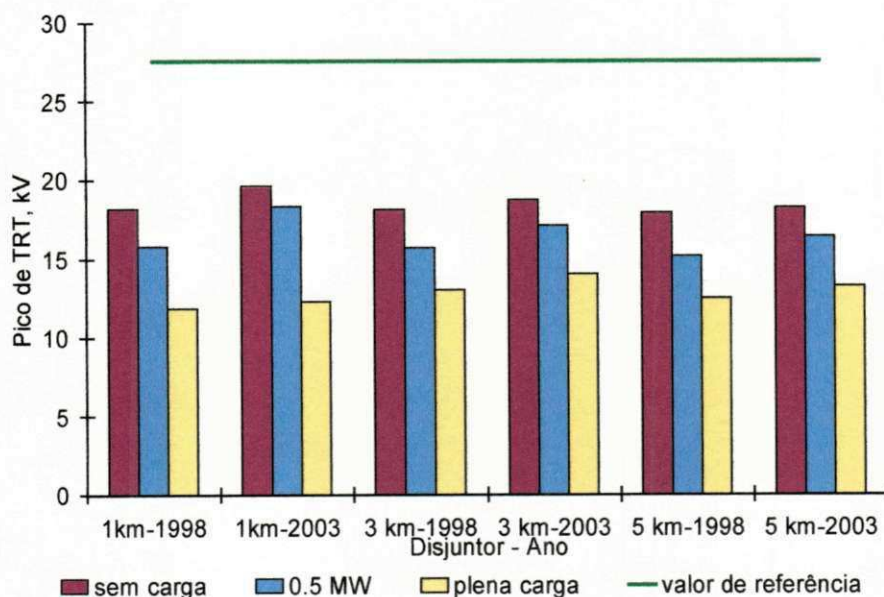
**Figura 5.11** Valores de TCTRT sem a representação da curva de saturação e da linha de 13,8 kV

Os valores de pico da corrente de curto-circuito e os valores percentuais da corrente de interrupção nos disjuntores 11T4, 21Y4 e 21Y3 são mostrados na tabela 5.6.

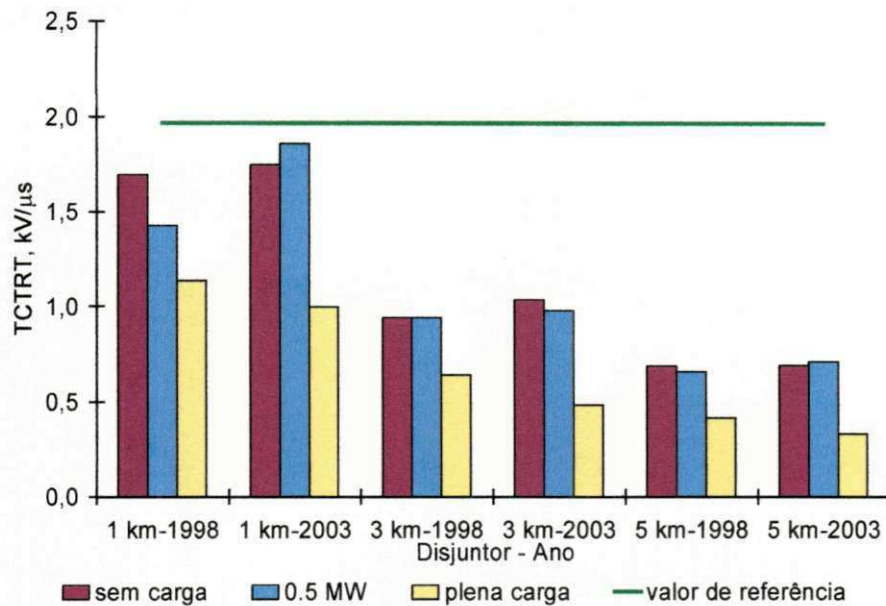
**Tabela 5.6 Valores de pico da corrente de curto-circuito e valores percentuais da corrente de interrupção nos disjuntores**

Disjuntor	Ano	$I_{cc}$ (kA)	$I_{cc}$ %
11T4	1998	7,39	13,07
	2003	9,30	16,44
21Y4	1998	7,39	32,66
	2003	9,29	41,07
21Y3	1998	7,38	32,60
	2003	9,27	40,98

Os resultados obtidos nas simulações para a TRT, na interrupção de um curto-circuito fase-terra a 1, 3 e 5 km dos terminais do disjuntor 21Y3, são apresentados na figura 5.12 e 5.13.



**Figura 5.12 Valores de pico da TRT para uma falta quilométrica**



**Figura 5.13** Valores de *TCTRT* para uma falta quilométrica

#### 5.4 Análise de Resultados

A representação da curva de saturação tem influência mínima tanto para o valor de pico da TRT como na *TCTRT*, apresentando valores de pico da TRT com uma variação bastante pequena de no máximo 0,06 kV. O mesmo ocorre para os valores de *TCTRT*, em que a variação máxima é de 0,01 kV/μs. Verifica-se que o efeito de saturação dos transformadores apresenta pequena influência nos parâmetros da TRT nos disjuntores da subestação em estudo.

Com a representação da linha de 13,8 kV nos terminais do disjuntor 21Y3, verifica-se que o pico da TRT na maioria das simulações é amortecido de um valor máximo de 3,15 kV. Nos casos em que é verificado o aumento do valor de  $U_c$ , a variação máxima é aproximadamente 1,2 kV. Estas configurações são em carga leve e plena carga para o disjuntor 11T4, nos anos de 1998 e 2003; carga leve e plena carga para o disjuntor 21Y3, no ano de 2003 e carga leve para o disjuntor 21Y4, no ano de 2003. O efeito de

amortecimento da *TCTRT* é mais significativo, principalmente para os disjuntores 21Y4 e 21Y3. A variação da *TCTRT* no disjuntor 21Y4 alcança 1,43 kV/ $\mu$ s

Para a comparação dos parâmetros obtidos com os valores estabelecidos por norma, é necessário inicialmente analisar o valor percentual da corrente de interrupção nos disjuntores.

De acordo com as figuras 5.10 e 5.11, comparam-se os resultados obtidos para o disjuntor 11T4 com os valores estabelecidos na norma NBR-7118 em 30% da capacidade de interrupção simétrica e para os disjuntores 21Y4 e 21Y3 com os valores da norma em 60% da capacidade de interrupção simétrica.

#### **Disjuntor de barramento (11T4):**

Para o disjuntor 11T4, o limite de  $U_c$  estabelecido na NBR-7118 é ultrapassado nas situações:

- Sem carga no barramento de 13,8 kV nos anos de 1998 a 2002;
- Recomposição da carga até 0,5 MW no barramento de 13,8 kV, nos anos de 2003 a 2007.

O limite da *TCTRT* estabelecido na norma é ultrapassado em todas as situações.

#### **Disjuntores 21Y4 e 21Y3:**

Para os disjuntores 21Y4 e 21Y3, o limite de  $U_c$  estabelecido na norma é ultrapassado nas situações:



- Sem carga no barramento de 13,8 kV nos anos de 1998 a 2002;
- Recomposição de carga até 4,2 MW no barramento de 13,8 kV, considerando a expansão de 2003.

O limite da *TCTRT* estabelecido na norma é ultrapassado quando a carga é de até 3 MW (1998) e até 4,2 MW (2003).

Para o curto-circuito monofásico a pequena distância do disjuntor 21Y3, os parâmetros da TRT para 1 km são os mais severos, mas os valores de  $U_c$  e *TCTRT* encontram-se dentro dos limites estabelecidos em norma, para todas as configurações de carga, conforme figuras 5.12 e 5.13.

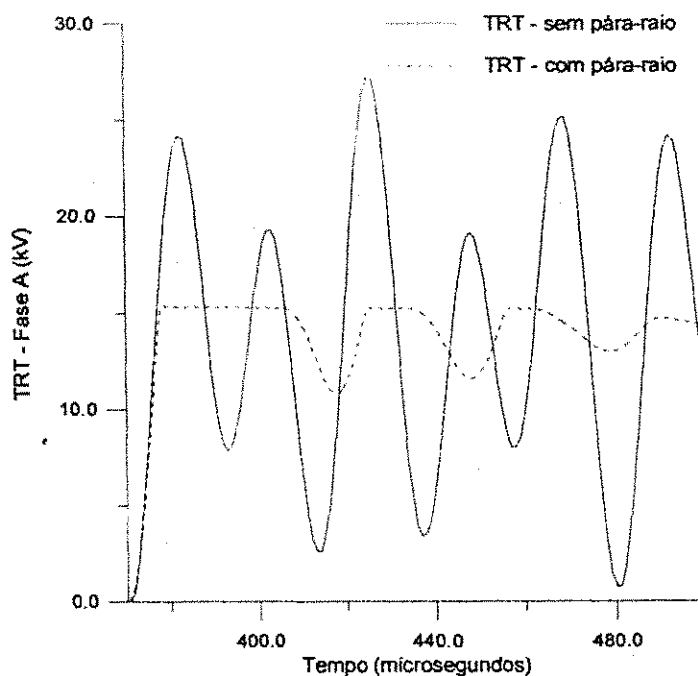
### 5.5 Alternativas para a redução da TRT

Considerando a configuração da subestação, uma solução para a redução do pico da TRT nos disjuntores 11T4, 21Y4 e 21Y3 é a instalação de dispositivos de ZnO entre seus terminais para que suas substituições sejam evitadas. Para um curto-circuito trifásico não aterrado, verifica-se através de simulação digital que utilizando-se três pastilhas de óxido de zinco ( $ZnO$ ) com dimensões de 62 mm de diâmetro e 23 mm de altura (padrão comercial)  $U_c$  e *TCTRT* têm seus valores reduzidos nos anos de 1998 a 2007, como mostra a tabela 5.7. Não está sendo considerado carga no barramento de 13,8 kV.

**Tabela 5.7 Valores de pico da TRT e TCTRT com a instalação de pára-raios de ZnO**

Ano	Disjuntor	$U_c$ (kV)		TCTRT (kV/ $\mu$ s)	
		sem pára-raio	com pára-raio	sem pára-raio	com pára-raio
1998	11T4	28,07	15,44	2,51	2,14
	21Y4	27,92	15,50	1,90	1,72
	21Y3	28,17	15,56	1,99	1,72
2003	11T4	33,73	16,86	2,92	2,43
	21Y4	33,72	15,60	2,54	1,93
	21Y3	33,94	15,67	2,60	1,98

As figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam a TRT com e sem a utilização dos pára-raios nos disjuntores 11T4, 21Y4 e 21Y3, respectivamente.



**Figura 5.14 TRT – Disjuntor 11T4.**

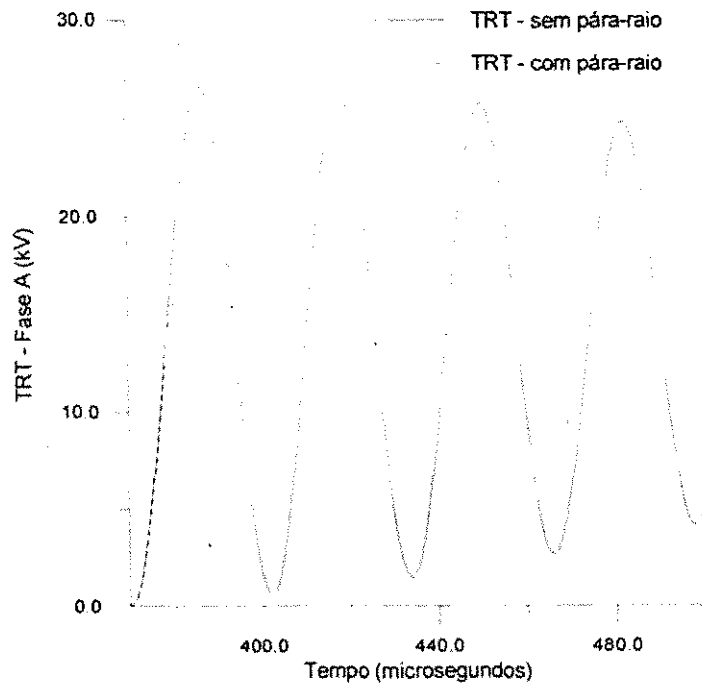


Figura 5.15 TRT – Disjuntor 21Y4.

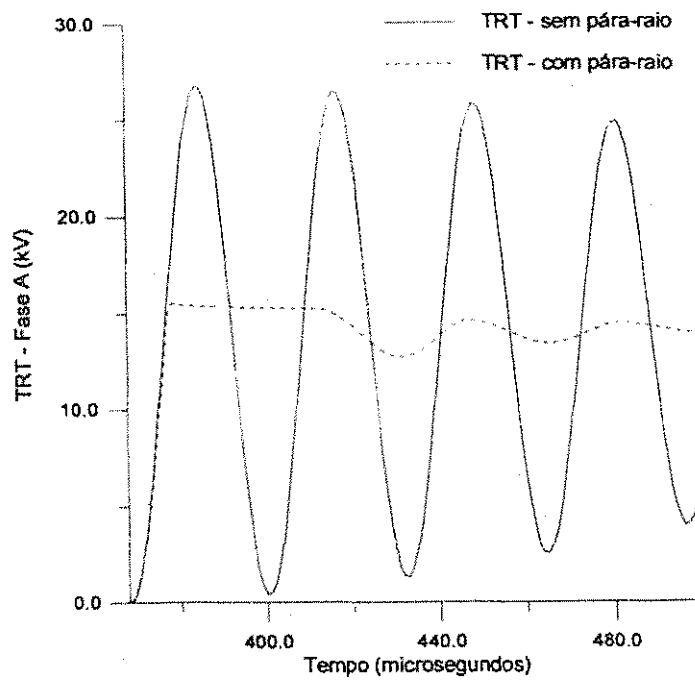


Figura 5.16 TRT – Disjuntor 21Y3.

Os valores da *TCTRT* simulados ainda encontram-se acima da norma. Dessa forma, propõe-se a instalação de células capacitivas nos terminais dos disjuntores no lado da fonte.

Para o disjuntor 11T4, os valores mínimos simulados da capacitância *C* para produzir a máxima *TCTRT* permitida são aproximadamente 875 pF (1998) e 2,6 nF (2003). Considerando a redução da *TCTRT* para a metade do valor da norma, o valor de *C* proposto é 29 nF. Para os disjuntores 21Y4 e 21Y3, os valores mínimos simulados da capacitância *C* para produzir a máxima *TCTRT* permitida são aproximadamente 20 nF (1998) e 29 nF (2003). Considerando a redução da *TCTRT* para a metade do valor da norma, o valor de *C* proposto é 133 nF.

A energia absorvida pelos pára-raios é calculada através de uma subrotina em FORTRAN, utilizando o método de integração trapezoidal. O seu valor máximo é de 3,5 J, o qual está bem abaixo da energia que os pára-raios de ZnO podem dissipar.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Grande parte das formas de onda de TRT da subestação de Angelim obtidas através das simulações digitais apresentaram-se do tipo exponencial-cosseno, sendo que este tipo de curva é representada por uma envoltória especificada por norma através de quatro parâmetros. Como a tensão nominal dos disjuntores em estudo é inferior a 72,5 kV, a TRT foi representada por meio de dois parâmetros. Os parâmetros representativos da TRT utilizados no estudo foram o valor de pico da TRT ( $U_c$ ) e sua taxa de crescimento (TCTRT).

O cálculo da TCTRT utilizado foi considerado adequado quanto à sua própria severidade na influência na TRT. O parâmetro,  $U_c$ , utilizado na análise de TRT, em contrapartida à utilização do primeiro pico da onda de tensão, justificou-se por verificar que o tempo em que a TRT atinge seu valor de crista é bastante próximo ao tempo em que se atinge o primeiro pico da onda. O tempo para a onda atingir seu primeiro valor de pico ( $U_c$ ), obtido nas simulações, encontrou-se na faixa de 360  $\mu$ s a 380  $\mu$ s, após a interrupção de corrente. A reignição do arco elétrico por rigidez dielétrica (valor de pico da TRT igual

ou maior que a tensão disruptiva do meio extintor) poderia ocorrer, devido o meio extintor ainda não ter finalizado a recomposição da sua rigidez dielétrica. Dessa forma, acreditou-se que a combinação do valor de pico escolhido e a *TCTRT* revelaram maior segurança na análise de adequabilidade dos disjuntores de 15 kV.

Para as configurações da subestação em estudo, tornam-se dispensáveis as representações da curva de saturação, das perdas no núcleo do transformador e da linha de 13,8 kV. Na realidade, de uma forma geral pode-se verificar a necessidade da representação dos efeitos de saturação do núcleo do transformador. Considere o caso típico em que a saturação é atingida quando o fluxo enlaçado por um dos enrolamentos (normalmente o de menor tensão nominal) estiver 30% acima do seu valor nominal. Numa primeira simulação, sem incluir os efeitos de saturação, determina-se a forma de onda do fluxo. Se seu valor de pico ultrapassar o valor de saturação torna-se necessário fazer uma nova simulação representando a curva de saturação.

Para o curto-circuito fase-terra, os valores de pico e taxa de crescimento da TRT estavam dentro dos valores especificados em todas as situações. O pior caso verificou-se para a falta à distância de 1 km dos terminais do disjuntor.

Na interrupção do curto-circuito trifásico não aterrado, os valores de pico e taxa de crescimento da TRT dos disjuntores 11T4, 21Y4 e 21Y3 encontraram-se acima dos valores especificados em algumas situações. A instalação de dispositivos de ZnO entre os terminais desses disjuntores reduziu os valores de pico da TRT para valores aceitáveis, evitando a substituição dos disjuntores atuais visto o alto custo aquisitivo desses componentes. Para a redução das taxas de crescimento da TRT, foi bastante viável a instalação das células capacitivas nos terminais do disjuntor.

Este trabalho faz parte de um estudo inicial para o prosseguimento de outros projetos de pesquisa. Um trabalho importante seria a realização de testes de campo com a

inserção dos dispositivos de ZnO em paralelo com os contatos do disjuntor a fim de comprovar a redução no pico da TRT.

Outros estudos poderiam ser desenvolvidos como realizar testes de campo para comparar as formas de onda da TRT simuladas, fazer estudos de TRT em disjuntores de classes superiores a 15 kV e verificar a necessidade da representação de arco elétrico em disjuntores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMON FILHO J., PEREIRA M. P. Curso Básico sobre a utilização do ATP. São Paulo, s. ed., out. 1994.

ANSI/IEEE. C37.011-1994 IEEE Application guide for transient recovery voltage for AC high voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis. New York, IEEE, Inc., jun 1995.

————— C37.04-1979 IEEE Standard rating structure for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis. New York, IEEE, Inc., apr. 1979. (includes supplements ANSI/IEEE C37.04c - 1985).

————— C37.06-1979 IEEE American national standard preferred ratings and related required capabilities for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis. New York, ANSI, Inc., apr. 1979.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7118 Disjuntores de alta tensão. Rio de Janeiro, ABNT, 1994, 161 p.

BELLO, J. C. A. ; ALVES, F. R. Estudos de tensão de restabelecimento transitória (TRT) no setor de 13, 8 kV. Recife, CHESF/DES-DEAT, out. 1996. (Relatório interno CHESF/DES-DEAT. RT-07-07-10).



- COMITÊ COORDENADOR DE OPERAÇÕES NORTE-NORDESTE. Metodologia e critérios para a análise de adequação de disjuntores quanto à tensão de restabelecimento transitória. Recife, jun. 1991.
- DOMMEL, H. W. EMTP theory book. Vancouver, 1992.
- EMTP REVIEW. Madison, University of Wisconsin, v. 2, n. 1, jan. 1998.
- FERNANDES Jr., D., NOBRE D. M., NEVES W. L. A., SOUZA B. A., ALVES F.R., MELO M. O. B. C., MONTEIRO J. S. Estudos de TRT em disjuntores de classe 15 kV. III CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, São Paulo, set. 1998. Anais. São Paulo, Tec Art Editora LTDA, 1998. p. 483-485.
- GARZON, R. D. High voltage circuit breakers design and applications. New York, Marcel Dekker, Inc., 1997, 365 p.
- GREENWOOD, A. Electrical transients in power systems. 2. ed., New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991, 751 p.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 56 High-voltage alternating-current circuit breakers. 4. ed. Swiss, 1987, 329 p.
- LEUVEN EMTP CENTER. ATP Alternative transients program rule book. Belgium, ago. 1987.
- MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION. Microtran reference manual. Vancouver, sep. 1992.
- NAIDU, S. R. Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Campina Grande, Grafset, 1985, 316 p.
- NOBRE, D. M. Adequabilidade de disjuntores de 15 kV às solicitações de TRT. Proposta de dissertação, Campina Grande, UFPB, nov. 1998.

NOWACKI, K. Disjuntores de alta tensão. Campina Grande, s. ed., 1983, 91 p. / Apostila de aulas para o curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica - UFPB.

REID, W. E. Effect of transient recovery voltage (TRV) on power circuit interruption. IEEE Seminar/Report Power systems transient recovery voltages. Chapter 1, p. 5-14, New York, IEEE, 1987.

SCHMUNK E. W., O'LEARY R. P. Power system transient recovery voltage (TRV) characteristics. IEEE Seminar/Report Power systems transient recovery voltages. Chapter 2, p. 15-25, New York, IEEE, 1987.

SLEMON, G.R.; STRAUGHEN, A. Electric machines. Toronto, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1982, 575 p.

SWINDLER D. L., SCHWARTZ P., HAMER P. S., LAMBERT S. R. Transient recovery voltage considerations in the application of medium voltage circuit breakers. IEEE Transaction on industry applications, v. PAS-33, n. 2, p. 383-388, mar./apr. 1997.

TARASIEWICZ E. J., MORCHED A. S., NARANG A., DICK E. P. Frequency dependent eddy current models for nonlinear iron cores. IEEE Transaction on power systems, v.-8, n. 2, p. 588-597, may 1993.

UFPB, Disjuntores de corrente alternada. Campina Grande, s. ed., s. d., 64 p. / Trabalho realizado no laboratório de alta tensão.

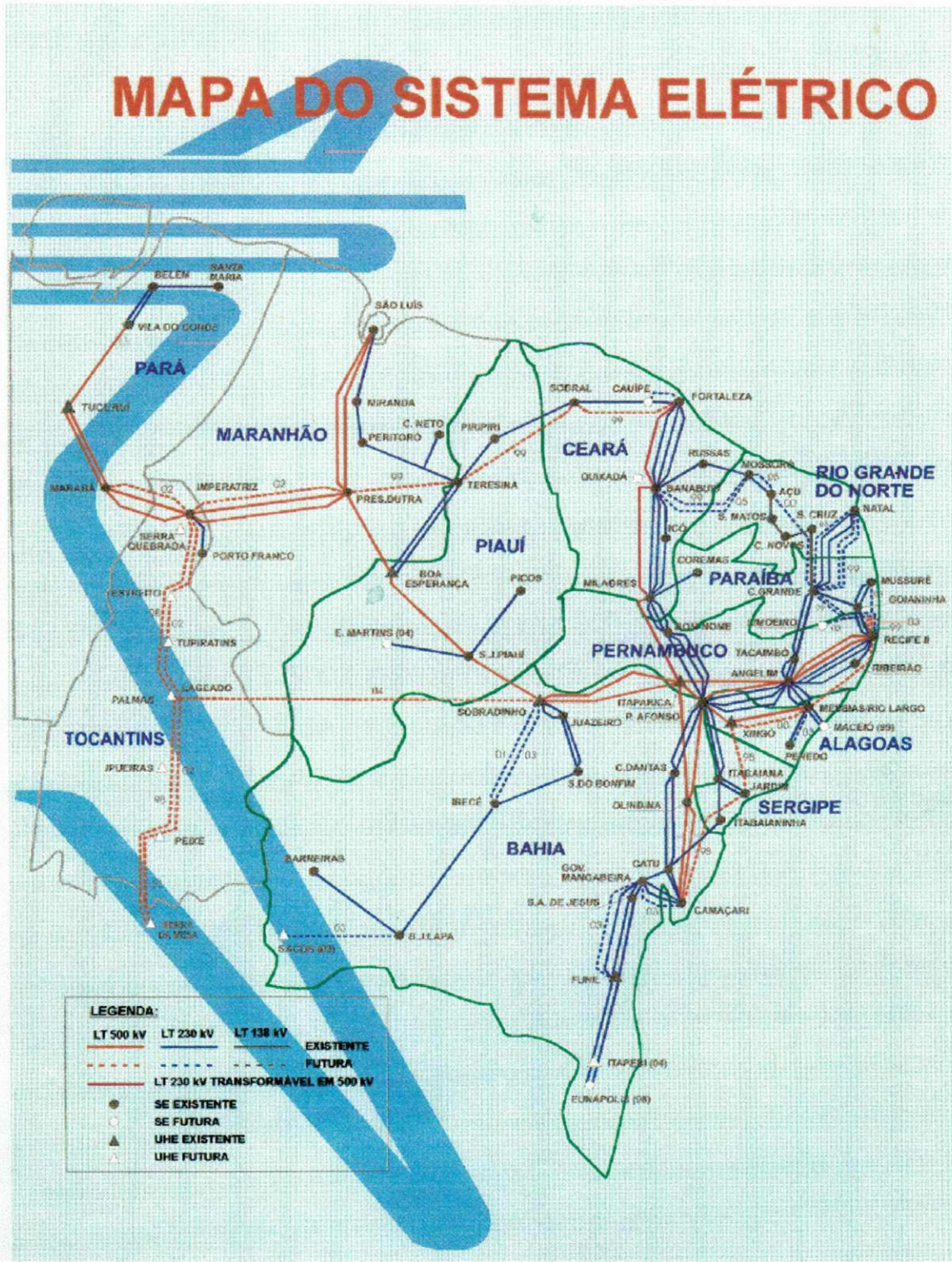
WAGNER C. L., SMITH H. M. Analysis of transient recovery voltage (TRV) rating concepts. IEEE Transaction on power apparatus and systems, v. PAS-103, n. 11, p. 3354-3363, nov. 1984.

---

Transient recovery voltage (TRV) standards. IEEE Seminar/Report Power systems transient recovery voltages. Chapter 3, p. 26-43, New York, IEEE, 1987.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Electric utility engineering reference book - distribution systems. 1. ed. East Pittsburgh, 1965, 567 p.

ANEXO 1. SISTEMA ELÉTRICO DE TRANSMISSÃO (1998)





```

C XAB = 73.15 %
C XAB = 0.7315 PU
C **PARA TRES TRAFOS EM PARALELO**
C ** EQUIVALENTE **
C XAB = 0.7315/3 = 0.2438
C **DOIS ENROLAMENTOS**
C XAB = 0.2438/2
C XA = 0.1219 PU
C XB = 0.1219 PU
C
C **REATANCIA EM OHMS NO ENROLAMENTO DE ALTA**
C IMPEDANCIA DE BASE - 230 kV , 100 MVA
C ZBASE = V2/SBASE
C ZBASE = (230)2/100
C ZBASE = 529 OHMS
C XA = 0.1219 X 529 = 64.4851 OHMS
C
C **REATANCIA EM OHMS NO ENROLAMENTO DE BAIXA**
C IMPEDANCIA DE BASE - 69 kV , 100 MVA
C ZBASE = V2/SBASE
C ZBASE = (69)2/100
C ZBASE = 47.61 OHMS
C XB = 0.1219 X 47.61 = 5.8036 OHMS
C
C LIGACAO EM DELTA - 69 kV
C XB = 5.8036 X 3 = 17.4109 OHMS
C
C FATOR X/R = 50 DE ACORDO NORMA ANSI
C RA = 1.2897 OHMS, RB = 0.3482 OHMS
C
C
C TRAFO 33.3 MVA 230-69 kV
C ESPECIFICACAO DE TRANSFORMADOR
C
C TRANSFORMER TC2A
C 9999
C 102B1A 02B1B 0.348 17.41 69.00
C 2TR230A 1.290 64.48 132.79
C TRANSFORMER TC2A TC2B
C 102B1B 02B1C
C 2TR230B
C TRANSFORMER TC2A TC2C
C 102B1C 02B1A
C 2TR230C
C
C CURVA DE SATURACAO
C
C TRANSFORMER .8540 323.54TC2A
C .8540 323.5436
C 14037.3582 970.6308
C 9999
C 102B1A 02B1B 0.348 17.41 69.00
C 2TR230A 1.290 64.48 132.79
C TRANSFORMER TC2A TC2B
C 102B1B 02B1C
C 2TR230B
C TRANSFORMER TC2A TC2C
C 102B1C 02B1A
C 2TR230C
C

```

```

C
C *****
C   TRANSFORMADORES DE 5 MVA   BARRAMENTOS: 69-13.8 kV
C *****
C
C
C   PARAMETROS DOS TRAFOS DE 5 MVA 69-13.8 KV - ANGELIM
C   TRAFOS - 02T4-A / 02T4-B
C
C   **REATANCIA NA BASE DE 5 MVA**
C   XAB = 6.26 %
C   XAB = 0.0626 PU
C
C   **MUDANÇ A PARA A BASE DE 100 MVA
C   ZN = ZV x SN/SV
C   XAB = 0.0626 X 100/5 = 1.252 PU
C
C   **PARA DOIS TRAFOS EM PARALELO**
C   ** EQUIVALENTE **
C   XAB = 1.252/2 = 0.626 PU
C
C   DOIS ENROLAMENTOS
C   XAB = 0.626/2
C   XA = 0.313 PU
C   XB = 0.313 PU
C
C   **REATANCIA EM OHMS NO ENROLAMENTO DE ALTA**
C   IMPEDANCIA DE BASE - 69 kv , 100 MVA
C   ZBASE = V2/SBASE
C   ZBASE = (69)2/100
C   ZBASE = 47.61
C   XA = 0.313 X 47.61 = 14.9019 OHMS
C
C   LIGACAO EM DELTA
C   XA = 14.9019 X 3 = 44.7057 OHMS
C
C   **REATANCIA EM OHMS NO ENROLAMENTO DE BAIXA**
C   IMPEDANCIA DE BASE - 13.8 kv , 100 MVA
C   ZBASE = V2/SBASE
C   ZBASE = (13.8)2/100
C   ZBASE = 1.9044
C   XB = 0.313 X 1.9044 = 0.5961 OHMS
C
C   FATOR X/R = 30 DE ACORDO NORMA ANSI
C   RA = 1.49019 OHMS, RB = 0.01987 OHMS
C
C
C   TRAF0 5 MVA 69-13.8 KV
C   ESPECIFICACAO DE TRANSFORMADOR
C
C   TRANSFORMER          TC3A
C       9999
C   1T13.8A              0.020 0.596 7.97
C   2TR69A TR69B        1.490 44.70 69.00
C   TRANSFORMER TC3A          TC3B
C   1T13.8B
C   2TR69B TR69C
C   TRANSFORMER TC3A          TC3C
C   1T13.8C
C   2TR69C TR69A

```

```

C
C CURVA DE SATURACAO
C
C TRANSFORMER .7396 37.359TC3A
C .7396 37.3596
C 23646.0560 112.0788
C 9999
C 1T13.8A 0.020 0.596 7.97
C 2TR69A TR69B 1.490 44.70 69.00
C TRANSFORMER TC3A TC3B
C 1T13.8B
C 2TR69B TR69C
C TRANSFORMER TC3A TC3C
C 1T13.8C
C 2TR69C TR69A
C
C
C *****
C CABOS AEREOS
C *****
C
C
C CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE BARRA DE 230 KV DE ANGELIM E O TRAFIO DE
33.3 MVA
C TRAFIO 04T1
C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE )
C R = 0.147 OHMS, X = 0.349 OHMS, C = 12.35 NF
C D = 0.045 KM
BC230ATR230A 6.6E-31.6E-2
BC230BTR230B 6.6E-31.6E-2
BC230CTR230C 6.6E-31.6E-2
BC230A 0.10
BC230B 0.10
BC230C 0.10
TR230A 0.10
TR230B 0.10
TR230C 0.10
C
C
C CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE BARRA DE 69 KV E TRAFIO DE 5 MVA
C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE )
C R = 0.147 OHMS, X = 0.349 OHMS, C = 12.35 NF
C D = 0.030 KM
02B1A TR69A 4.4E-31.0E-2
02B1B TR69B 4.4E-31.0E-2
02B1C TR69C 4.4E-31.0E-2
02B1A 0.07
02B1B 0.07
02B1C 0.07
TR69A 0.07
TR69B 0.07
TR69C 0.07
C
C
C CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE A BARRA DO ENROLAMENTO DE 13.8 KV DOS
TRAFIOS
C DE 5 MVA E DISJUNTOR 11T4
C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE )
C R = 0.147 OHMS, X = 0.349 OHMS, C = 12.35 NF
C D = 0.015 KM

```



T13.8ADISJ1A	2.2E-35.2E-3	
T13.8BDISJ1B	2.2E-35.2E-3	
T13.8CDISJ1C	2.2E-35.2E-3	
T13.8A		0.035
T13.8B		0.035
T13.8C		0.035
DISJ1A		0.035
DISJ1B		0.035
DISJ1C		0.035

C

C CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE O DISJUNTOR 11T4 E BARRA DE 13.8 KV

C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE )

C R = 0.147 OHMS, X = 0.349 OHMS, C = 12.35 NF

C D = 0.003 KM

DISJ2AB13.8A	0.4E-31.0E-3	
DISJ2BB13.8B	0.4E-31.0E-3	
DISJ2CB13.8C	0.4E-31.0E-3	
DISJ2A		0.007
DISJ2B		0.007
DISJ2C		0.007
B13.8A		0.007
B13.8B		0.007
B13.8C		0.007

C

C CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE A BARRA DE 13.8 KV E O DISJUNTOR 21Y4

C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE )

C R = 0.147 OHMS, X = 0.349 OHMS, C = 12.35 NF

C D = 0.002 KM

B13.8ADISJ5A	0.3E-30.7E-3	
B13.8BDISJ5B	0.3E-30.7E-3	
B13.8CDISJ5C	0.3E-30.7E-3	
DISJ5A		0.005
DISJ5B		0.005
DISJ5C		0.005
B13.8A		0.005
B13.8B		0.005
B13.8C		0.005

C

C CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE A BARRA DE 13.8 KV E O DISJUNTOR 21Y3

C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE )

C R = 0.147 OHMS, X = 0.349 OHMS, C = 12.35 NF

C D = 0.010 KM

B13.8ADISJ7A	1.5E-33.5E-3	
B13.8BDISJ7B	1.5E-33.5E-3	
B13.8CDISJ7C	1.5E-33.5E-3	
B13.8A		0.02
B13.8B		0.02
B13.8C		0.02
DISJ7A		0.02
DISJ7B		0.02
DISJ7C		0.02

C

C CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE A BARRA DE 13.8 KV E O DISJUNTOR 21Y5

C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE )

C R = 0.147 OHMS, X = 0.349 OHMS, C = 12.35 NF

C D = 0.005 KM

B13.8ADISJ3A	0.7E-31.7E-3	
B13.8BDISJ3B	0.7E-31.7E-3	
B13.8CDISJ3C	0.7E-31.7E-3	
B13.8A		0.01

B13.8B 0.01  
 B13.8C 0.01  
 DISJ3A 0.01  
 DISJ3B 0.01  
 DISJ3C 0.01

C  
 C  
 C  
 C  
 C  
 C

REPRESENTACAO DA LINHA ENTRE O TERMINAL DO DISJUNTOR 21Y3  
 E O SEU TERMINO A PARAMETROS DISTRIBUIDOS  
 D = 15.0 KM

C-1DISJ8AFIMLIA .447672.11461.5869 15.0 0 0 3  
 C-2DISJ8BFIMLIB .27423.431503.8605 15.0 0 0 3  
 C-3DISJ8CFIMLIC .27446.326625.1787 15.0 0 0 3  
 C 6.38758E-01-8.08107E-01 1.28956E-01  
 C-4.46639E-02-1.24164E-02 9.78962E-03  
 C 5.21973E-01 2.92823E-01-7.59366E-01  
 C 4.47066E-02-1.29538E-02 5.69291E-03  
 C 5.61729E-01 5.10696E-01 6.37631E-01  
 C-5.55945E-04-9.21716E-03 5.65321E-03

C  
 C

\*\*\*\*\*

PARAMETROS DE CARGA MW)

\*\*\*\*\*

C  
 C  
 C

\*\*\*\*\*

BARRAMENTO DE 69 kV

\*\*\*\*\*

C

PARAMETROS DE CARGA NO BARRAMENTO DE 69 KV

C 104 MW; 27.4 MVAR  
 C  $R = V^2 / P$   $X = V^2 / Q$   
 C  $R = 45.78$  OHMS,  $X = 173.76$  OHMS

02B1A	45.78	
02B1B	45.78	
02B1C	45.78	
02B1A		173.76
02B1B		173.76
02B1C		173.76

C  
 C

\*\*\*\*\*

BARRAMENTO DE 13.8 kV

\*\*\*\*\*

C

PARAMETROS DE CARGA - 13.8 kV  
 ALIMENTADOR CELPE E SERVIÇOS AUXILIARES

C 3 MW  
 C  $R = V^2 / P$   
 C  $R = 63.48$  OHMS

C DISJ4A	63.48
C DISJ4B	63.48
C DISJ4C	63.48

C

C DISJ6A	63.48
C DISJ6B	63.48
C DISJ6C	63.48

C DISJ8A 63.48  
 C DISJ8B 63.48  
 C DISJ8C 63.48

C  
 C

C \*\*\*\*\*  
 C REPRESENTACAO DAS CAPACITANCIAS  
 C \*\*\*\*\*

C  
 C

C CAPACITANCIAS PARA TERRA (BUCHA + ENROLAMENTO)

C

TR230A 1.13  
 TR230B 1.13  
 TR230C 1.13  
 02B1A 1.13  
 02B1B 1.13  
 02B1C 1.13  
 TR69A 1.13  
 TR69B 1.13  
 TR69C 1.13  
 T13.8A 1.13  
 T13.8B 1.13  
 T13.8C 1.13

C

C CAPACITANCIAS NOS TERMINAIS DOS DISJUNTORES

C

DISJ1A .24  
 DISJ1B .24  
 DISJ1C .24  
 DISJ2A .24  
 DISJ2B .24  
 DISJ2C .24

C

DISJ3A .24  
 DISJ3B .24  
 DISJ3C .24  
 DISJ4A .24  
 DISJ4B .24  
 DISJ4C .24

C

DISJ5A .24  
 DISJ5B .24  
 DISJ5C .24  
 DISJ6A .24  
 DISJ6B .24  
 DISJ6C .24

C

DISJ7A .24  
 DISJ7B .24  
 DISJ7C .24  
 DISJ8A .24  
 DISJ8B .24  
 DISJ8C .24

C

C \*\*\*\*\*  
 C REPRESENTACAO DOS DISPOSITIVOS DE ZnO NO DISJUNTOR 11T4  
 C \*\*\*\*\*

C  
 C

C DISJ1ADISJ2A .2

```

C DISJ1BDISJ2B .2
C DISJ1CDISJ2C .2
C
C92RAIO1ARAIO2A 4444
C 0.01 -1
C 0.0008 6.78E+3
C 0.0030 11.95E+3
C 0.0700 14.37E+3
C 1. 15.24E+3
C 100. 16.80E+3
C 200. 17.10E+3
C 1000. 19.20E+3
C 5000. 21.00E+3
C 10000. 22.50E+3
C9999
C
C92RAIO1BRAIO2BRAIO1ARAIO2A 4444
C
C92RAIO1CRAIO2CRAIO1ARAIO2A 4444
C
C INSERÇÃO DE LINHAS
C
C-1DISJ1ARAIO1A 1.E-5 300. 3.E8 .3 1 0 1
C-1DISJ1BRAIO1B 1.E-5 300. 3.E8 .3 1 0 1
C-1DISJ1CRAIO1C 1.E-5 300. 3.E8 .3 1 0 1
C
C-1RAIO2ADISJ2A 1.E-5 300. 3.E8 .3 1 0 1
C-1RAIO2BDISJ2B 1.E-5 300. 3.E8 .3 1 0 1
C-1RAIO2CDISJ2C 1.E-5 300. 3.E8 .3 1 0 1
C
C
C *****
C PEQUENA RESISTENCIA PARA MEDIR CORRENTE DE CURTO
C *****
C
C B13.8ACURTO 1.0E-6
C B13.8BCURTO 1.0E-6
C B13.8CCURTO 1.0E-6
C CURTO 1.0E+6
BLANK
C
C
C CARTAO EM BRANCO PARA ENCERRAR CIRCUITOS R-L-C
C
C *****
C DADOS DE CHAVES
C *****
C
C REPRESENTACAO DO DISJUNTOR 11T4 - SE ANGELIM
C
C DISJ1ADISJ2A-1. 0. 3
C DISJ1BDISJ2B-1. 0. 3
C DISJ1CDISJ2C-1. 0. 3
C
C REPRESENTACAO DO DISJUNTOR 21Y5 - SE ANGELIM
C
C DISJ3ADISJ4A-1. 1.
C DISJ3BDISJ4B-1. 1.
C DISJ3CDISJ4C-1. 1.

```

C  
 C REPRESENTACAO DO DISJUNTOR 21Y4 - SE ANGELIM

C  
 DISJ5ADISJ6A-1. 1.  
 DISJ5BDISJ6B-1. 1.  
 DISJ5CDISJ6C-1. 1.

C  
 C REPRESENTACAO DO DISJUNTOR 21Y3 - SE ANGELIM

C  
 DISJ7ADISJ8A-1. 1.  
 DISJ7BDISJ8B-1. 1.  
 DISJ7CDISJ8C-1. 1.

BLANK

C  
 C CARTAO EM BRANCO TERMINANDO DADOS CHAVES

C  
 C \*\*\*\*\*  
 C FONTE SENOIDAL TIPO 14  
 C \*\*\*\*\*

C  
 C  

14EQ230A	219.E3	60.	0.	-1
14EQ230B	219.E3	60.	-120.	-1
14EQ230C	219.E3	60.	120.	-1

BLANK

C  
 C  
 C \*\*\*\*\*  
 C NOS DA TENSÃO DE SAIDA  
 C \*\*\*\*\*

C  
 C EQ230ABC230ATR230A02B1A TR69A T13.8ADISJ1ADISJ2AB13.8ADISJ3ADISJ5A

BLANK

C  
 C DOIS CARTOES EM BRANCO PARA ENCERRAR O CASO

C  
 BLANK  
 BLANK  
 BEGIN NEW DATA CASE  
 BLANK