



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS

**MODELAGEM DE SUBESTAÇÕES PARA ESTUDOS DE TRT**

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2013

RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS

## MODELAGEM DE SUBESTAÇÕES PARA ESTUDOS DE TRT

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Orientador:

Washington Luiz Araújo Neves, Ph. D.

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2013

RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS

## MODELAGEM DE SUBESTAÇÕES PARA ESTUDOS DE TRT

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Washington Luiz Araújo Neves, Ph. D.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha Mãe e à minha Tia Sônia, que certamente queria estar presente neste momento.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à DEUS pelas oportunidades que venho recebendo desde minha entrada no curso, além de me dar esperança suficiente para acreditar em um futuro promissor.

À minha MÃE Terezinha não tenho palavras para expressar todo apoio e amor que recebo a cada dia, além do esforço que sempre tivera para me proporcionar condições de enfrentar as dificuldades ao longo desta trajetória e me educar de maneira tal a contribuir com minha educação e formação do meu caráter.

À minha TIA SÔNIA, infelizmente, só posso agradecer em orações, mas sei que a mesma sempre estará torcendo por mim.

À minha NOIVA ÉRIKA, pelas palavras de incentivo e apoio, pela compreensão que tivera em vários fins de semana de minha ausência e pela felicidade que eu tenho de estar ao seu lado.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Washington pela paciência e compreensão sempre dedicada e pelos bons serviços prestados na minha orientação.

Ao meu amigo Euler pela sua amizade e companheirismo, que certamente me influenciou positivamente ao longo desta jornada.

Agradeço aos amigos mais próximos pelas risadas, noites mal ou não dormidas e companhia ao longo destes quase cinco anos de estudos, de aprendizado e de amadurecimento.

Enfim, agradeço a todos que passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

A forma de onda da tensão entre os terminais dos disjuntores, quando da abertura de seus contatos, é definida como tensão de restabelecimento, a qual consiste de uma componente transitória, denominada de tensão de restabelecimento transitória (TRT), e de uma componente de regime permanente. Considerando a expansão dos sistemas elétricos de potência, é possível que disjuntores localizados em algumas subestações não estejam mais adequados ao contexto atual de funcionamento, o que se faz necessário a realização de um estudo de TRT a fim de auxiliar no dimensionamento dos mesmos. Este trabalho tem por objetivo apresentar os conceitos básicos e procedimentos utilizados para a modelagem de uma subestação para o estudo de TRT. São apresentadas as formas de onda da TRT para três disjuntores da subestação Angelim, pertencente à Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF).

**Palavras-chave:** TRT, subestação, disjuntores, modelagem, transitórios eletromagnéticos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Circuito equivalente de um transformador (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006). ...	13
Figura 2. Laço de histerese do núcleo ferromagnético (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006). 14	
Figura 3. Circuito equivalente de um transformador de instrumentação (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006). .....	15
Figura 4. Corrente subsequente (GUERRA). .....	24
Figura 5. Característica da TRT exponencial (NOBRE, 1999). .....	25
Figura 6. Característica da TRT oscilatória (NOBRE, 1999). .....	26
Figura 7. Característica da TRT triangular (NOBRE, 1999). .....	26
Figura 8. TRT de frequência única (NOBRE, 1999). .....	28
Figura 9. Circuito simplificado que produz TRT de dupla frequência (NOBRE, 1999). .....	29
Figura 10. Tensões nos terminais do disjuntor no lado da fonte e da carga (NOBRE, 1999). .....	30
Figura 11. Forma de onda da TRT exponencial-cosseno (NOBRE, 1999). .....	31
Figura 12. Falta fase-terra a pequena distância dos terminais do disjuntor (NOBRE, 1999). .....	32
Figura 13. TRT para uma falta fase-terra a pequena distância dos terminais do disjuntor (NOBRE, 1999). .....	33
Figura 14. Taxa de crescimento da TRT (NOBRE, 1999). .....	36
Figura 15. Valor de pico da TRT e sua taxa de crescimento (NOBRE, 1999). .....	36
Figura 16. Subestação Angelim (NOBRE, 1999). .....	38
Figura 17. Curva de saturação (NOBRE, 1999). .....	41
Figura 18. Curva de saturação linearizada por dois segmentos (NOBRE, 1999). .....	42
Figura 19. TRT nos terminais do disjuntor 11T4, fase A, grupo 1, sem carga. ....	43
Figura 20. TRT nos terminais do disjuntor 11T4, fase A, grupo 1, plena carga. ....	44
Figura 21. TRT nos terminais do disjuntor 21Y4, fase A, grupo 1, sem carga. ....	44
Figura 22. TRT nos terminais do disjuntor 21Y4, fase A, grupo 1, plena carga. ....	45
Figura 23. TRT nos terminais do disjuntor 21Y3, fase A, grupo 1, sem carga. ....	45
Figura 24. TRT nos terminais do disjuntor 21Y3, fase A, grupo 1, plena carga. ....	46

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Suportabilidade à TRT nos disjuntores de 15 kV. ....	37
Tabela 2. Características do disjuntor 11T4. ....	39
Tabela 3. Características dos disjuntores 21Y3 e 21Y4. ....	40
Tabela 4. Dados do transformador. ....	40
Tabela 5. Dados de carga.....	40
Tabela 6. Equivalente no barramento de 230 kV.....	40
Tabela 7. Parâmetros dos cabos.....	40
Tabela 8. Comprimento dos cabos. ....	41
Tabela 9. Pontos $(i,\lambda)$ utilizados na linearização por dois segmentos para o transformador de 300 MVA. .....	42
Tabela 10. Pontos $(i,\lambda)$ utilizados na linearização por dois segmentos para o transformador de 10 MVA. .....	42

# SUMÁRIO

Sumário .....	x
1 Introdução.....	11
2 Principais Equipamentos de uma Subestação.....	12
2.1 Transformador .....	12
2.2 Transformadores para Instrumentos.....	15
2.2.1 Transformador de Corrente.....	15
2.2.2 Transformador de Potencial.....	17
2.3 Pararraios .....	18
2.4 Disjuntores .....	19
2.5 Bancos de capacitores .....	21
3 Tensão de Restabelecimento Transitória .....	23
3.1 Conceito de TRT.....	23
3.2 Formas de onda da TRT.....	25
3.2.1 TRT de frequência única .....	27
3.2.2 TRT de dupla frequência .....	28
3.2.3 TRT em faltas quilométricas .....	31
3.3 Fatores de influência na forma de onda da TRT .....	33
4 Modelagem de Subestações.....	34
4.1 Cálculo da TRT.....	35
4.2 Representação da TRT em estudo.....	35
4.3 Comparação da TRT em estudo e da TRT especificada .....	37
4.4 Simulações digitais .....	38
5 Resultados .....	43
6 Conclusão .....	47
Bibliografia.....	48
ANEXO A – Arquivo de dados do ATP®.....	49

# 1 INTRODUÇÃO

O estudo de transitórios eletromagnéticos é de fundamental importância na análise e planejamento dos sistemas elétricos de potência. Para isso, o conhecimento das formas de onda de tensão e corrente em pontos estratégicos do sistema elétrico é essencial, uma vez que permite analisar a resposta do sistema aos fenômenos transitórios, além de determinar como os sinais produzidos por estes se propagam.

Diversos exemplos podem ser citados como causa para a ocorrência de fenômenos transitórios, dentre eles, destaca-se neste trabalho a abertura de um circuito devido a uma falta no sistema. Tal fato pode implicar em sobretensões aos equipamentos da rede, sendo o disjuntor o dispositivo de proteção adequado a realizar tal operação de abertura, que, por sua vez, envolve rapidez, precisão e segurança.

A diferença de potencial entre os contatos do disjuntor, na abertura de um trecho da subestação por motivo de um curto-circuito, pode ser bastante elevada. A componente transitória desta diferença de potencial é denominada de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

A realização de um estudo de TRT em disjuntores localizados em subestações se faz necessário, levando em consideração a condição que se mostre mais severa para os mesmos a fim de auxiliar os seus dimensionamentos. Para tanto, é essencial a modelagem da subestação a qual estes dispositivos estão conectados.

Este trabalho tem por objetivo apresentar a modelagem de uma subestação para o estudo de TRT utilizando o *software* ATP<sup>®</sup> (*Alternative Transients Program*), onde os seus parâmetros serão obtidos para os casos de curto circuitos trifásico não aterrado nos terminais do disjuntor e fase-terra a pequenas distâncias de seus terminais. Além disso, os efeitos de saturação do transformador, da influência de carga e da influência da linha serão analisados com o intuito de determinar as variações impostas à TRT em tais situações.

Como estudo de caso, será realizada a modelagem da subestação Angelim.

## 2 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO

### 2.1 TRANSFORMADOR

Como um dos equipamentos mais significativos do sistema de potência, o transformador possibilita a geração de energia elétrica e sua transmissão em níveis de tensões mais econômicas, além de permitir a utilização da energia na tensão mais adequada para uma determinada instalação.

Este equipamento é constituído de dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um enlace de fluxo magnético comum, cuja amplitude depende da fonte de tensão alternada conectada a um dos enrolamentos, da frequência da mesma e do número de espiras. O enlace estabelecido pelo fluxo magnético alternado com o outro enrolamento não alimentado pela fonte de tensão induz neste uma força eletromotriz de amplitude dependente do número de espiras de tal enrolamento, do fluxo comum e da frequência, segundo a Lei de Faraday.

Com o objetivo de que o acoplamento magnético entre as bobinas seja o mais eficiente possível, os transformadores utilizam um núcleo de ferro ou de outro material ferromagnético pois estes apresentam alta permeabilidade magnética, reduzindo assim, o fluxo de dispersão, que corresponde à parcela do fluxo total que enlaça um dos enrolamentos sem enlaçar o outro, sendo fundamental na determinação do comportamento do dispositivo. Na prática, este fluxo disperso pode ser reduzido colocando as seções dos enrolamentos o mais próximo possível entre si. Além disso, o núcleo do equipamento é formado por uma pilha de chapas delgadas com o intuito de reduzir as perdas por correntes parasitas, que correspondem à presença de correntes induzidas no mesmo provenientes de variações no fluxo magnético. Outro tipo de perda que acontece nos transformadores é devido à energia dissipada na forma de calor oriunda das mudanças cíclicas da direção do fluxo no material ferromagnético, denominada perda por histerese. Uma forma de reduzi-las é feita pelo uso de ligas de aço de melhor qualidade no núcleo ferromagnético.

Quando uma tensão alternada é aplicada a um dos enrolamentos do transformador e visando sua representação em um modelo equivalente, é conveniente lidar com as forças magnetomotrizes combinadas dos enrolamentos necessárias para a

criação do fluxo mútuo resultante no núcleo do dispositivo de tal modo que a corrente do enrolamento alimentado pela fonte de tensão seja capaz de magnetizar o núcleo, como também suprir a carga conectada no outro enrolamento, ou seja, esta corrente deve produzir a força magnetomotriz requerida para produzir o fluxo magnético mútuo resultante além de contrabalançar o efeito da força magnetomotriz do enrolamento não alimentado que atua na tentativa de desmagnetizar o núcleo. Neste cenário, tal corrente é decomposta em duas componentes: uma componente de excitação,  $I_\varphi$ , e uma componente de carga,  $I_2$ . Esta corresponde à componente que contrabalança a força magnetomotriz do enrolamento não alimentado e aquela produz o fluxo mútuo resultante.

A corrente de excitação,  $I_\varphi$ , também pode ser dividida em duas componentes: corrente de magnetização, que corresponde à corrente que passa pela reatância de magnetização,  $X_m$ , e corrente de perdas no núcleo, que passa pela resistência,  $R_c$ , conforme apresentados no modelo equivalente do transformador da Figura 1 e que está adiantada de  $90^\circ$  da corrente de magnetização.

A tensão  $V_1$  do enrolamento primário representado na Figura 1 consiste na soma de três componentes: a queda de tensão na resistência  $R_1$ , que corresponde as perdas no cobre, a queda de tensão na reatância de dispersão  $X_{l1}$ , que corresponde às perdas provenientes do fluxo disperso pelo ar, e a força eletromotriz induzida  $E_1$ , gerada pelo fluxo magnético mútuo resultante. Da mesma forma, no enrolamento secundário, a tensão  $V_2$  corresponde à adição da queda de tensão na resistência  $R_2$ , caracterizando as perdas no cobre, a queda de tensão na reatância de dispersão  $X_{l2}$ , correspondente às perdas provenientes pelo fluxo de dispersão no ar, e a força eletromotriz induzida  $E_2$ , criada pelo fluxo magnético mútuo resultante.

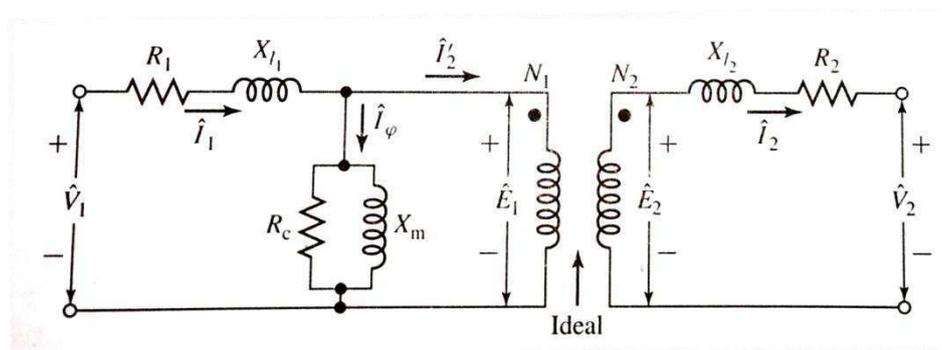


Figura 1. Circuito equivalente de um transformador (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006).

A presença de um transformador ideal no circuito equivalente do equipamento se dá pelo fato de que o fluxo mútuo resultante no núcleo induz, seguindo a Lei de Faraday, uma força eletromotriz  $E_2$  no secundário e, como este fluxo concatena ambos os enrolamentos do trafo, a razão entre as forças eletromotrizes induzidas do primário e do secundário deve ser igual à relação de espiras do dispositivo, conforme Equação 1. Além disso, pode-se citar o fato de prover isolamento elétrica entre o primário e o secundário.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1)$$

onde  $E_1$  é a força eletromotriz induzida no primário [V],  $E_2$  é a tensão induzida no secundário [V],  $N_1$  é o número de espiras do primário e  $N_2$  é o número de espiras do secundário.

Devido à característica não linear do material ferromagnético utilizado no núcleo, a densidade de fluxo magnético  $B$  em relação à intensidade de campo magnético  $H$  é não linear e seu valor máximo corresponde ao ponto de joelho da curva de saturação  $B-H$  do material, vide Figura 2, no caso de um transformador bem projetado. Desta forma, quando uma tensão senoidal é aplicada aos terminais do equipamento, a variação de fluxo senoidal necessária para induzir tensões senoidais  $E_1$  e  $E_2$  pode ser gerada por uma corrente de magnetização não senoidal. Neste caso, a corrente de excitação  $I_\varphi$  apresenta uma componente de terceira harmônica da ordem de 40% de seu valor e menores quantidades de harmônicos de ordem superior. Ademais, como a corrente de excitação  $I_\varphi$  é pequena quando comparada com a corrente nominal do enrolamento, ela pode ser considerada senoidal por conveniência.

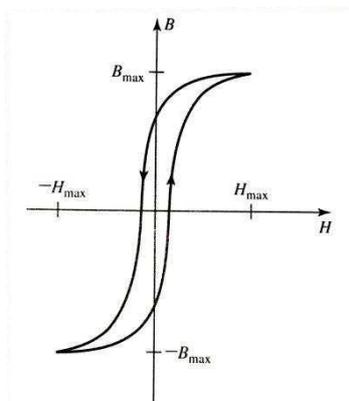


Figura 2. Laço de histerese do núcleo ferromagnético (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006).

## 2.2 TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTOS

Estes tipos de transformadores são utilizados em aplicações que possibilitam aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuírem corrente de carga da ordem de grandeza do circuito ao qual está ligado, no caso de um transformador de corrente (TC), ou tensão de isolamento de mesma ordem que a rede à qual está conectado, no caso de um transformador de potencial (TP). Assim, o uso destes dispositivos permite que os instrumentos de medição e proteção sejam dimensionados em tamanhos reduzidos, com bobinas de corrente com menor quantidade de cobre, no caso de um TC, e com bobinas e demais componentes com baixa isolação, caso de um TP.

O circuito equivalente para um transformador para instrumento é apresentado na Figura 3, onde a resistência de perdas no núcleo foi desprezada. A carga do transformador de instrumentação é caracterizada por  $Z_b$ .

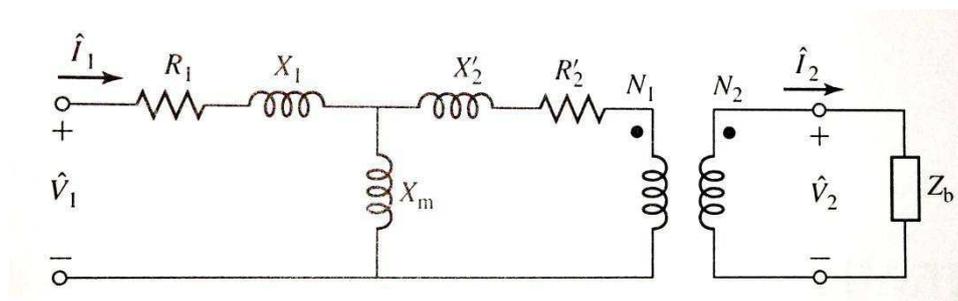


Figura 3. Circuito equivalente de um transformador para instrumentos (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006).

### 2.2.1 TRANSFORMADOR DE CORRENTE

O princípio de funcionamento de um TC segue o mesmo raciocínio utilizado pelo transformador no quesito conversão eletromagnética de energia, onde o mesmo transforma correntes elevadas que passam por seu enrolamento primário, o qual é ligado ao sistema elétrico de potência, em correntes de menor amplitude no seu enrolamento secundário, com o objetivo de reproduzir de forma exata a corrente do primário, porém, em menor escala e com diferença de fases mínimas. A norma NBR 6856 da ABNT estabelece a corrente nominal do secundário como 5 A.

Os TCs são utilizados para alimentar instrumentos com baixa resistência elétrica, tais como medidores de energia e amperímetros.

Quando uma determinada carga ligada ao sistema elétrico de potência absorve uma corrente da rede, que é igual à corrente  $I_1$  no primário do TC, a corrente  $I_2$  no seu enrolamento secundário provocará uma queda de tensão na sua impedância interna,  $Z'_2 = R'_2 + jX'_2$ , e na impedância da carga,  $Z_b$ , ou seja, a corrente no enrolamento secundário do equipamento,  $I_2$ , produzirá uma força magnetomotriz com o intuito de desmagnetizar o núcleo, desta forma, a corrente do primário,  $I_1$ , deve produzir uma força magnetomotriz suficiente para produzir um fluxo magnético mútuo resultante além de contrabalançar o efeito desmagnetizante da força magnetomotriz gerada pelo enrolamento secundário, fato este que exige uma maior compensação da corrente de excitação  $I_\phi$ ,

Para que o TC reproduzisse fielmente a corrente do primário  $I_1$ , obedecendo sua relação de transformação, seria necessário que a corrente de excitação  $I_\phi$  fosse zero, no entanto, isto é um caso ideal pois exigiria a utilização de um núcleo ferromagnético com permeabilidade infinita. Portanto, a corrente que circula pelo enrolamento secundário do dispositivo não corresponde exatamente à corrente  $I_1$ , salientando a relação de transformação, fato que ocasiona o erro do transformador de corrente.

A corrente de excitação  $I_\phi$  varia para cada transformador de corrente a depender do material utilizado no núcleo ferromagnético, que apresenta características não lineares.

Os TCs são destinados aos serviços de proteção ou medição, sendo a classe de exatidão<sup>1</sup> o fator determinante para a escolha de um transformador de corrente para realização de uma atividade específica. A norma NBR 6856 da ABNT estabelece as classes de exatidão para os TCs destinados aos serviços de medição como sendo: 0,3, 0,6, 1,2 e 3. Para os TCs destinados à proteção, as classes de exatidão estabelecidas pela mesma norma são: 2,5 e 10.

Quando o núcleo entra em saturação, a corrente de excitação  $I_\phi$  se torna muito elevada, deixando de alimentar a carga  $Z_b$ , acarretando em um erro considerável do TC. Para os transformadores de corrente destinados à proteção, o núcleo utilizado apresenta baixa permeabilidade magnética, permitindo a saturação para valores de densidade de fluxo magnético  $B$  bem elevados, onde, normalmente, a mesma se inicia para valores de corrente do primário da ordem de  $20 \times I_n$ , ou densidade de fluxo de 1,5 T. Já para o

---

<sup>1</sup> Máximo erro de relação apresentado pelo TC quando o mesmo opera com corrente primária nominal.

caso dos TCs de medição, a permeabilidade magnética do núcleo é muito elevada, de modo que o início do processo de saturação se dá a partir de 0,4 T.

Um transformador de corrente não deve operar com o secundário em aberto, estando o primário conectado à rede. O motivo para tal situação ocorre devido ao fato de que não será produzida uma força desmagnetizante secundária que se oponha à força magnetizante criada pela corrente no enrolamento primário, o que resulta em, para correntes neste enrolamento elevadas, todo o fluxo magnetizante atuará sobre o núcleo do equipamento, levando-o à saturação e provocando uma intensa variação do fluxo magnético na passagem da corrente pelo ponto zero, gerando uma elevada força eletromotriz induzida no enrolamento secundário. Logo, antes da retirada de qualquer instrumento do enrolamento secundário do TC, este deve ser curto-circuitado. Caso este procedimento não seja realizado, acontecerá perdas excessivas por efeito Joule e colocará o operador em perigo, além de alterar as características de exatidão do dispositivo.

### 2.2.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

Os transformadores de potencial são equipamentos projetados para alimentarem os instrumentos de medição e proteção, reduzindo a tensão da rede à qual estão conectados de modo a permitir o funcionamento adequado dos instrumentos ligados a eles. De maneira simplista, os TPs são projetados de tal forma a terem um enrolamento primário de muitas espiras e um enrolamento secundário através do qual se obtém a tensão secundária desejada, estabelecida na norma NBR 6855 da ABNT, de 115 V ou  $115/\sqrt{3}$  V.

Os TPs são dispositivos utilizados para alimentar instrumentos com elevada impedância, tais como bobinas de tensão de medidores de energia e voltímetros.

A diferença entre os transformadores de potência e os transformadores de potencial é que, este reduz a tensão da rede para valores adequados ao funcionamento dos instrumentos e aquele é destinado à transferência de energia de um enrolamento para o outro.

Os TPs podem ser do tipo indutivo, TPI, ou do tipo capacitivo, TPC.

Os TPIs são basicamente destinados para uso até a tensão de 138 kV, pois apresentam custo de produção inferior ao do tipo capacitivo. Além disso, são

construídos de acordo com três grupos de ligação estabelecidos pela norma NBR 6855. São eles:

- Grupo 1: TPIs projetados para ligação entre fases em sistemas de até 34,5 kV e devem suportar continuamente 10% de sobrecarga;
- Grupo 2: TPIs projetados para ligação entre fase e neutro em sistemas diretamente aterrados;
- Grupo 3: TPIs projetados para ligação entre fase e neutro em sistemas onde a eficácia do aterramento não seja garantida.

Os TPCs são destinados para uso em sistemas com tensão maiores do que 138 kV e utilizam dois conjuntos de capacitores para prover um divisor de tensão. Em adição, eles atuam como dispositivos de acoplamento para permitir a comunicação por meio do sistema *power line carrier*. Em tais sistemas, a transmissão da informação ocorre através da linha por um sinal de baixa potência e de frequência compreendida entre 30 kHz e 300 kHz, o qual se destina a teleproteção, telecontrole, transmissão de voz ou telemedição (MAMEDE, 1994).

## 2.3 PARARRAIOS

As linhas de transmissão e redes aéreas de distribuição estão constantemente vulneráveis às descargas atmosféricas, dada as suas extensões físicas e seus elevados graus de exposição, que, em determinadas condições, podem provocar sobretensões elevadas no sistema e ocasionar danos ao demais equipamentos da rede. Estas também podem ser geradas por operações de manobra de chaves seccionadoras e disjuntores.

Como mecanismo de proteção a estes surtos de tensão, são instalados pararraios no sistema com o objetivo de reduzir o nível de sobretensão a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos.

Há dois tipos de pararraios a resistor não linear: pararraios de carboneto de silício, que utiliza como material o carboneto de silício, SiC, e pararraios de óxido de zinco, que utiliza como material o óxido de zinco, ZnO.

Assim como o SiC, o ZnO apresenta uma elevada capacidade de condução de corrente de surto que resulta em baixas tensões de descarga, ao passo que oferece uma alta resistência à corrente subsequente, fornecida pelo sistema.

A tensão nominal do pararraios é definida como a máxima tensão, em valor eficaz, a qual o dispositivo pode ser submetido, permanentemente, na frequência nominal, no ensaio de ciclo de operação e para o qual foi projetado e tem condições de operar satisfatoriamente. Já a tensão residual corresponde à tensão que aparece nos terminais do equipamento, valor de crista, quando da passagem da corrente de descarga.

A tensão nominal de um pararraios deve ser definida em função das sobretensões previstas no sistema, que podem ser devido a descargas atmosféricas, operações de manobra e defeitos monopolares.

## 2.4 DISJUNTORES

Os disjuntores são equipamentos destinados a interrupção e restabelecimento de corrente elétrica em um determinado trecho do sistema elétrico. Estes devem ser instalados acompanhados da aplicação dos relés de proteção respectivos, os quais são os dispositivos responsáveis pela detecção de correntes no circuito que, após serem analisadas por sensores previamente ajustados, podem enviar ou não o comando necessário para a abertura do disjuntor.

A função principal do disjuntor é interromper as correntes de falta em um determinado ponto do circuito em uma operação que envolve rapidez, segurança e confiabilidade. Além disso, tais equipamentos são solicitados para interromper correntes de circuitos operando a vazio ou em plena carga, e a energizar os mesmos em condições de operação normal ou de defeito.

O princípio de interrupção da corrente elétrica do disjuntor é realizado por meio da separação física dos seus contatos. Durante esta separação, devido à energia armazenada no circuito, há o surgimento do arco elétrico que precisa ser prontamente extinguido, sob pena de consequências danosas aos demais equipamentos da rede.

O arco elétrico formado dessa forma torna-se, agora, o meio de continuidade de tal circuito, até que a corrente passe pelo seu zero natural, durante o ciclo senoidal, quando, neste instante, ocorre a interrupção da mesma.

Para haver extinção do arco elétrico é necessário que o mecanismo extintor do disjuntor atue no sentido de reduzir a temperatura do meio e a condutividade do meio ionizado, substituindo-a por um meio isolante eficiente, como o ar, óleo ou gás. Tal mecanismo extintor pode atuar por alongamento ou sopro de ar, por exemplo.

Em contrapartida, se durante a extinção de uma corrente elétrica ela for reduzida abruptamente a zero, sobretensões irão surgir na rede, tendo como resultado a liberação da energia armazenada no momento da interrupção, e que podem causar danos ao sistema e aos equipamentos.

O estudo dos disjuntores está, em grande parte, relacionado às condições transitórias que ocorrem nos sistemas elétricos durante a sua operação.

Os disjuntores são dimensionados para atuarem em sistemas elétricos de corrente alternada. Em casos específicos, são projetados para operação em sistemas de corrente contínua. No entanto, a extinção de corrente contínua é de maior complexidade, visto que a interrupção da corrente elétrica alternada é realizada quando a mesma passa pelo seu zero natural, fato que, evidentemente, não acontece em corrente contínua. Neste tipo de disjuntor, o tempo de arco é normalmente longo, porém o suficiente para não deteriorar os contatos de seus pólos.

Quando o sistema elétrico de potência está operando em regime permanente, a energia reativa de caráter magnético é armazenada nos elementos indutivos da rede, como transformadores, motores, reatores e indutância dos condutores, e a energia reativa de característica elétrica é armazenada nos componentes capacitivos do sistema, como os capacitores e a capacitância dos condutores entre fases e entre fases e terra. No momento em que ocorre uma variação brusca da configuração do circuito provocada por uma operação de manobra na extinção de uma falta, por exemplo, haverá transferência de energia entre os componentes do sistema, fato que acarretará em uma série de fenômenos e que levará o mesmo a operação em estado transitório. Situação esta que é explanada no tópico 3.

O estado transitório é normalmente de curta duração, muito embora apresenta uma severidade relevante face à integridade dos equipamentos do sistema.

A tensão nominal do disjuntor é o valor eficaz da tensão pela qual o mesmo é designado e corresponde à tensão máxima de operação do sistema para o qual o equipamento em questão é designado.

A corrente nominal do disjuntor é o valor eficaz da corrente de regime permanente que o dispositivo pode conduzir indefinidamente sem que a elevação de temperatura exceda os valores especificados por norma.

A corrente de interrupção corresponde à corrente em um pólo do equipamento, no início do arco, durante sua operação de abertura. Já a corrente de interrupção simétrica nominal consiste no valor eficaz da componente alternada da corrente de interrupção nominal em um curto-circuito. Este valor exprime a capacidade de ruptura do disjuntor e é um dos parâmetros básicos para o seu dimensionamento (MAMEDE, 1994).

## 2.5 BANCOS DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores são utilizados com o intuito de fornecer energia reativa em contraposição às cargas do sistemas, que são normalmente indutivas, como transformadores, motores e reatores. Deste modo, a amplitude de corrente da fonte diminui, fato que implica no aumento do fator de potência e na conseqüente redução da queda de tensão no circuito.

A capacidade de um sistema elétrico é definida em termos de potência aparente, o que significa que ao dispensá-lo do transporte de energia reativa haverá o aumento de sua capacidade de transportar energia ativa. Com isso, maiores investimentos no sentido de abastecimento da carga podem ser realizados.

Pode-se citar como benefícios da instalação de bancos de capacitores:

- Liberação da capacidade instalada;
- Redução das perdas de energia;
- Redução da queda de tensão e, conseqüentemente, melhoria da regulação de tensão;
- Aumento do faturamento.

A localização dos bancos de capacitores é influenciada por fatores como o comprimento do circuito, as variações da carga, tipos de motores e distribuição das cargas. De maneira geral, os bancos são localizados:

- Na entrada de energia;
- No secundário do transformador;
- Junto à carga.

Quando instalados junto a motores de indução, os bancos são conectados diretamente nos terminais dos mesmos. Nestes casos, a determinação da potência do banco deve ser feita de forma a evitar eventuais sobretensões após a abertura da chave. Além disso, a corrente total dos capacitores não deve exceder o valor da corrente do motor em vazio.

A instalação de capacitores junto a transformadores operando em vazio depende fundamentalmente das perdas dos transformadores, uma vez que, neste caso, os bancos estão indicados para suprir energia reativa aos trafos operando em vazio.

Para melhoria do fator de potência, a instalação dos bancos no secundário do transformador é indicada em instalações com um número elevado de cargas com potências diferentes e regimes de utilização não uniformes. Situação comum é adotar um controle automático do banco de capacitores.

Para operação automática dos bancos, utiliza-se equipamentos de manobra comandados por um controlador automático de fator de potência, CAFP. Este corresponde a um dispositivo microprocessado destinado à supervisão e controle do fator de potência, por meio da comutação automática dos bancos.

## 3 TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

### 3.1 CONCEITO DE TRT

Em caso de ocorrer um curto-circuito em um sistema elétrico de potência, a eliminação do mesmo inicia-se com a separação física dos contatos do disjuntor. No instante inicial de sua ocorrência, a tensão entre os terminais do disjuntor é praticamente nula e há redistribuição de energia reativa entre os elementos indutivos e capacitivos das redes desconectadas de modo a se adequarem ao novo estado elétrico. Durante a abertura de seus contatos, ocorre ionização do meio extintor na câmara de extinção do dispositivo, provocando a formação do arco elétrico por meio do qual a corrente de falta continuará sendo conduzida e estabelecendo-se a tensão de arco entre os contatos de amplitude reduzida comparada à tensão do sistema. Durante tal fato, ocorre o processo de resfriamento do arco elétrico pela ação do mecanismo extintor presente na câmara de extinção do equipamento. O resfriamento do arco reduz sua condutividade e temperatura acarretando na elevação da tensão do arco e a corrente de curto-circuito é extinta na sua primeira passagem pelo zero.

Quando a eficácia na interrupção da corrente de falta é atingida, surge uma tensão de restabelecimento entre os contatos do disjuntor que consiste de duas componentes: uma componente transitória, a qual ocorre imediatamente após a interrupção da corrente, e uma componente de regime permanente, a qual consiste de uma linha de referência em torno da qual a componente transitória oscila. A tensão entre os terminais do disjuntor, para a componente transitória, é chamada de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

Devido à condutância residual do meio extintor do dispositivo associada à inércia térmica e com o aparecimento da TRT, surge uma pequena corrente subsequente, conforme apresentada na Figura 4.

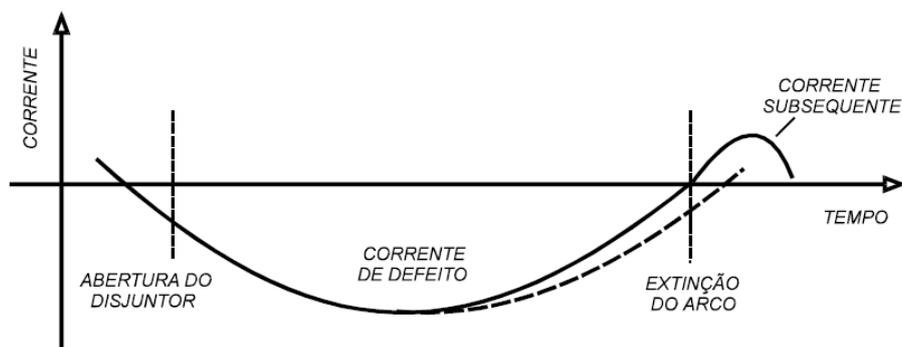


Figura 4. Corrente subsequente (GUERRA).

Para circuitos trifásicos, a TRT que aparece no primeiro pólo do disjuntor que é aberto para extinção do curto-circuito é considerada para os devidos estudos, pois esta tensão é geralmente mais elevada que a TRT entre os terminais dos outros dois pólos.

O sistema elétrico pode voltar a conduzir correntes de curto-circuito caso o arco elétrico seja reacendido, fato bastante prejudicial ao mesmo. O que ocorre é que, após a extinção da corrente de falta, o meio do arco elétrico recebe uma certa potência associada à corrente subsequente, denominada de potência recebida. A denominação potência de perdas está associada ao processo de extinção do arco e relacionada com o processo de resfriamento, com o processo de convecção, irradiação e o movimento das moléculas dissociadas durante o período de arco. O balanço entre a potência recebida e a potência de perdas determinará o comportamento da condutância do meio.

Se a potência recebida for menor que a potência de perdas, a condutância do meio diminuirá até a extinção total do arco. Em caso contrário, a potência recebida for superior à potência de perdas, a condutância do meio poderá aumentar, levando à uma reignição térmica.

Caso não ocorra o processo de reignição térmica no período da corrente subsequente, inicia-se o processo de esforço do dielétrico sobre o meio dielétrico de extinção de arco. Neste instante, a TRT aumentará no sentido de alcançar o seu maior valor de pico.

Se a tensão disruptiva do meio aumentar de tal modo que se mantenha superior à TRT, não haverá reignição do arco elétrico por ruptura dielétrica. Ademais, se no crescimento da TRT, esta ultrapassar o valor da rigidez dielétrica do meio dielétrico, poderá ocorrer a reignição do arco por ruptura dielétrica.

Por meio da manutenção da tensão de arco próxima de zero e da redução do tempo total de interrupção de arco, tem-se reduzido sensivelmente a energia dissipada

nos disjuntores durante o processo de extinção da corrente de falta, levando a uma diminuição dos esforços térmicos na câmara do disjuntor.

O tempo total de interrupção da corrente pelo disjuntor é contado a partir do instante de fechamento dos contatos do relé até o instante em que ocorre a interrupção da corrente. Em disjuntores rápidos, o tempo de interrupção varia de 2 a 4 ciclos. Em disjuntores lentos, o tempo de interrupção chega até a 8 ciclos.

### 3.2 FORMAS DE ONDA DA TRT

A TRT e a corrente de curto-circuito contribuem significativamente para o sucesso na operação de interrupção do disjuntor e são características do sistema e do tipo e localização da falta.

Na maioria dos casos, a característica predominante da TRT é uma função exponencial, oscilatória ou triangular (ANSI/IEEE, 1995).

Uma forma de onda do tipo exponencial da TRT é apresentada na Figura 5. Este tipo de TRT geralmente ocorre quando o disjuntor interrompe uma falta trifásica não aterrada em seus terminais, sendo o circuito composto de, no mínimo, um transformador e uma linha de transmissão conectada na barra da falta.

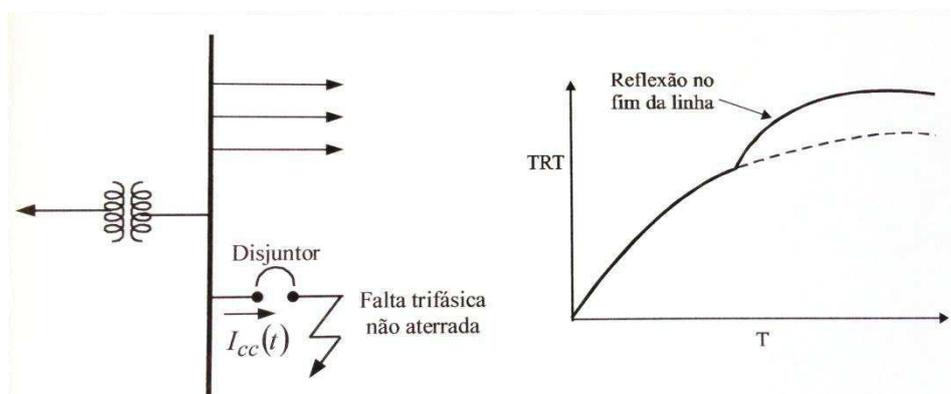


Figura 5. Característica da TRT exponencial (NOBRE, 1999).

Quando uma falta é limitada por um transformador ou por um reator em série e não há linhas de transmissão ou cabos conectados na barra de falta, a resposta da TRT será oscilatória, conforme mostrado na Figura 6.

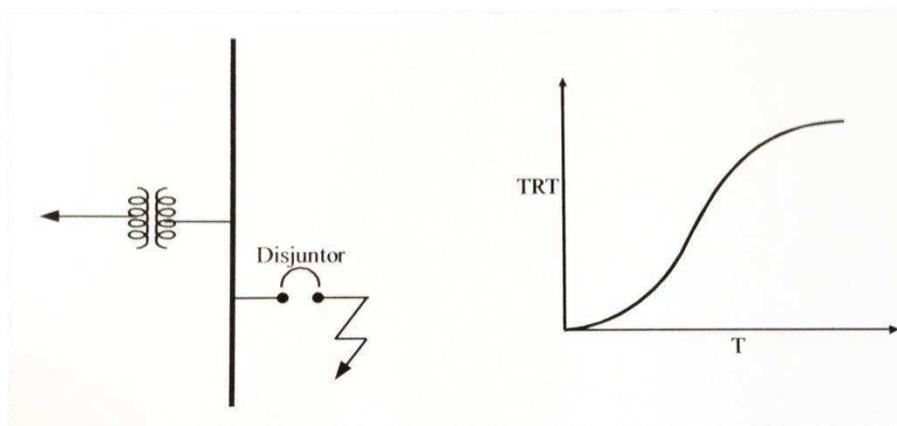


Figura 6. Característica da TRT oscilatória (NOBRE, 1999).

Para uma falta a pequena distância dos terminais do disjuntor, denominada de falta quilométrica, a característica da TRT é do tipo triangular (vide Figura 7).

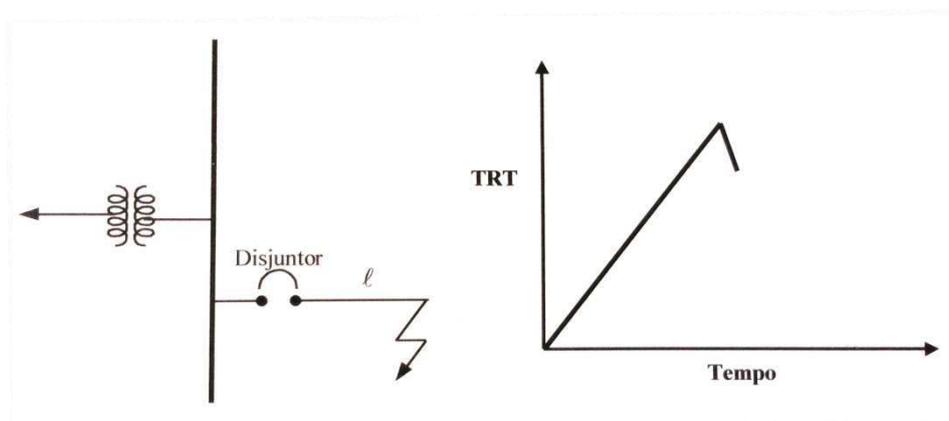


Figura 7. Característica da TRT triangular (NOBRE, 1999).

Para realização de estudos da TRT, normalmente se escolhe os casos, considerando o tipo e a localização da falta, em que a mesma se apresenta de forma mais severa.

Para faltas trifásicas, a TRT apresenta valores de pico elevados e, por isso, é utilizada pelos fabricantes nos ensaios dos disjuntores. Para faltas quilométricas, a TRT apresenta maiores taxas de crescimento em relação às faltas nos terminais do equipamento, porém com amplitude menor.

Para faltas nos terminais dos disjuntores, dá-se maior atenção durante o restabelecimento dielétrico do meio no intervalo de tempo de aproximadamente  $20 \mu\text{s}$  a  $1 \text{ ms}$  após a interrupção da corrente (GARZON, 1997).

Para faltas quilométricas, o meio dielétrico apresenta maior possibilidade de ruptura durante seu restabelecimento térmico, verificado aproximadamente nos

primeiros 10  $\mu\text{s}$  após a interrupção da corrente, período em que o equilíbrio térmico ainda não tem sido restabelecido (GARZON, 1997).

A depender das características do sistema elétrico de potência e do tipo de falta, as formas de onda típicas da TRT podem ser de:

- Frequência única, em faltas terminais;
- Frequência dupla, na abertura de uma carga indutiva e em faltas terminais;
- Frequência múltipla, para faltas quilométricas.

### 3.2.1 TRT DE FREQUÊNCIA ÚNICA

As faltas terminais são caracterizadas pela ocorrência de um curto-circuito exatamente nos terminais do disjuntor ou muito próximo dos mesmos.

A TRT de frequência única resulta, geralmente, das condições de um curto-circuito alimentado por um transformador e de não existir linhas de transmissão conectadas à barra curto circuitada.

A expressão que caracteriza uma forma de onda da TRT de frequência única do tipo um-menos-cosseno é descrita pela Equação 2, onde é desprezado o efeito de amortecimento produzido pelas perdas no circuito.

$$V_{TRT}(t) = V(1 - \cos \omega_0 t), \quad (2)$$

em que  $V_{TRT}$  corresponde à TRT [V];  $V$  é a amplitude da TRT [V] e  $\omega_0$  é a frequência natural de oscilação do sistema [rad/s].

Uma resposta mais realista da forma de onda da TRT abordada é apresentada na Figura 8.

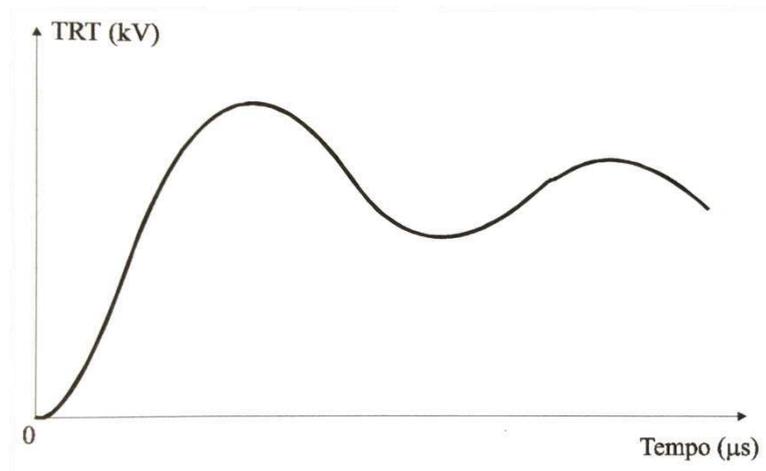


Figura 8. TRT de frequência única (NOBRE, 1999).

### 3.2.2 TRT DE DUPLA FREQUÊNCIA

A abertura de carga indutiva e a interrupção de uma falta trifásica não aterrada nos terminais do disjuntor são duas situações que serão abordadas para a TRT de dupla frequência. No primeiro caso, a TRT consiste da composição de duas formas de onda do tipo um-menos-cosseno, correspondentes às duas frequências do circuito, independentes uma da outra. No segundo, a TRT resulta de duas formas de onda distintas, uma componente inicial do tipo exponencial e outra componente do tipo um-menos-cosseno, assim, a forma de onda da TRT é do tipo exponencial-cosseno.

#### 3.2.2.1 CHAVEAMENTO DE CARGA INDUTIVA

Um circuito simplificado que produz a TRT de dupla frequência é apresentado na Figura 9, onde  $V_{fonte}(t) = V_m \cos \omega t$ ,  $L_1$  e  $C_1$  são definidos como a indutância e a capacitância no terminal do disjuntor no lado da fonte. A carga indutiva é representada por um indutor  $L_2$  e as capacitâncias parasitas próximas ao disjuntor, no lado da carga, é representada por uma capacitância equivalente  $C_2$ .

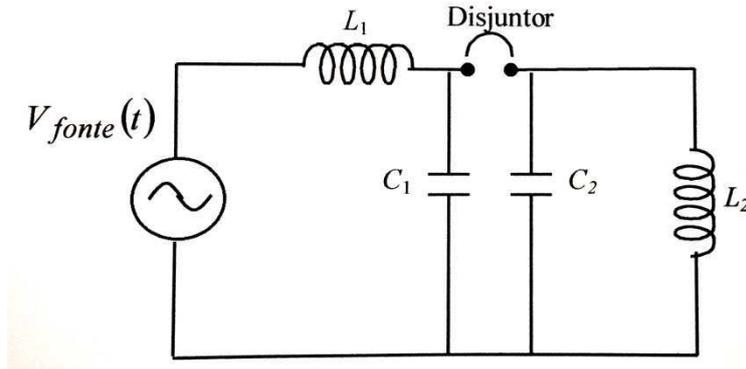


Figura 9. Circuito simplificado que produz TRT de dupla frequência (NOBRE, 1999).

Dado que a interrupção da corrente de falta é realizada no momento em que a mesma passa pelo zero, a tensão na carga  $L_2$  tem valor máximo aproximadamente igual ao referenciado pela Equação 3:

$$V_{max} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} V_m. \quad (3)$$

A tensão na carga  $L_2$  e em  $C_2$  oscila com frequência natural  $f_2$  da forma:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}. \quad (4)$$

A tensão no lado da fonte, em  $C_1$  e em  $L_1$  oscila com uma frequência natural  $f_1$  da forma:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (5)$$

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

As formas de onda da tensão no lado da carga e no lado da fonte são mostradas na Figura 10, onde  $t_0$  corresponde ao instante de interrupção da corrente.

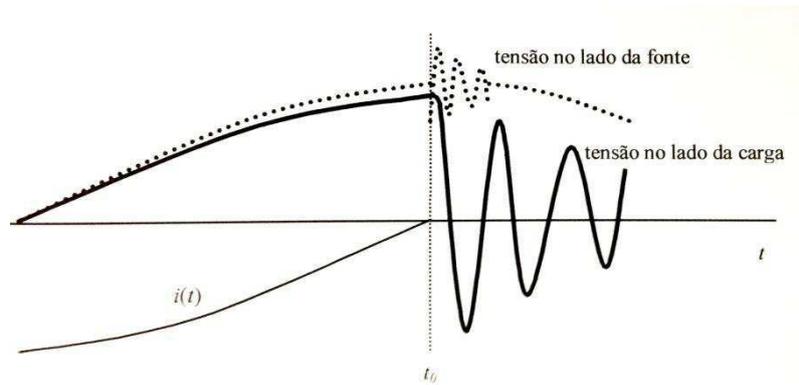


Figura 10. Tensões nos terminais do disjuntor no lado da fonte e da carga (NOBRE, 1999).

A TRT corresponde à diferença entre as tensões no lado da fonte e no lado da carga do disjuntor.

### 3.2.2.2 TRT DO TIPO EXPONENCIAL-COSSENO

Um circuito simplificado que produz uma TRT de dupla frequência do tipo exponencial-cosseno é mostrado na Figura 5 que corresponde a um curto-circuito trifásico não aterrado nos terminais do disjuntor alimentado por um transformador e por linhas de transmissão conectadas na barra de falta.  $I_{cc}(t)$  é a corrente de curto-circuito.

Calculando-se a impedância equivalente do circuito e desprezando os efeitos do transformador e da capacitância da barra no período de interesse, que corresponde a um tempo consideravelmente pequeno quando comparado com a metade do ciclo da onda de frequência industrial, 60 Hz, obtém-se a expressão da TRT descrita pela Equação 6, a qual é deduzida na norma ANSI C37.11 do ano de 1994:

$$V_{TRT}(t) = 1,5\sqrt{2}\omega I_{rms} L_f \left[ 1 - e^{\frac{-Z_{eq}t}{L_f}} \right], \quad (6)$$

em que  $Z_{eq}$  é a impedância de surto equivalente das linhas conectadas na barra de falta [ $\Omega$ ],  $I_{rms}$  é o valor eficaz da componente senoidal da corrente de curto-circuito [A],  $I_{cc}(t)$  e  $L_f$  corresponde à indutância total no terminal do disjuntor no lado da fonte [H]. O fator 1,5 presente na Equação 6 é devido à tensão nos terminais do primeiro pólo do disjuntor a abrir atingir 1,5 p.u. em regime permanente.

A forma de onda da tensão  $V_{TRT}(t)$  comporta-se como uma onda viajante de tensão, a qual se inicia no ponto de falta e viaja ao longo de cada linha de transmissão conectada na barra até encontrar um ponto de descontinuidade. Neste, uma parte da

onda é refletida e retorna em direção a barra de falta, e a outra é transmitida para os demais pontos do circuito.

Para o cálculo da tensão  $V_{TRT}(t)$  é necessário considerar apenas a onda incidente e a primeira reflexão de  $V_{TRT}(t)$ , pois as demais são bastante atenuadas em pontos de descontinuidades mais distantes. Esta situação é explicitada na Figura 11.

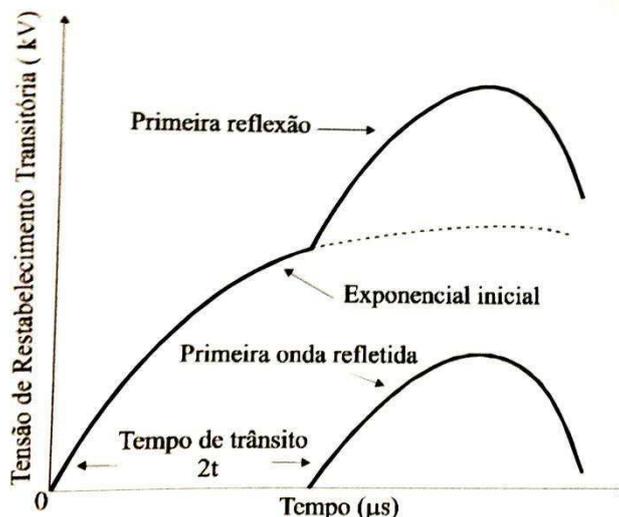


Figura 11. Forma de onda da TRT exponencial-cosseno (NOBRE, 1999).

### 3.2.3 TRT EM FALTAS QUILOMÉTRICAS

Faltas quilométricas são definidas como curto-circuitos que ocorrem em linhas de transmissão a uma pequena distância dos terminais do disjuntor, no lado da carga. Para uma falta do tipo fase-terra, a amplitude da corrente de curto circuito é menor do que a corrente de curto-circuito em faltas terminais devido ao fato do aumento da impedância do sistema à medida que se distancia dos terminais do disjuntor pela adição de impedância do trecho da linha entre o equipamento e o ponto de falta. O valor de pico da TRT é menor, em contrapartida, sua taxa de crescimento pode alcançar valores elevados.

É apresentado na Figura 12 um circuito monofásico em que há ocorrência de uma falta fase-terra a uma pequena distância dos terminais do disjuntor.

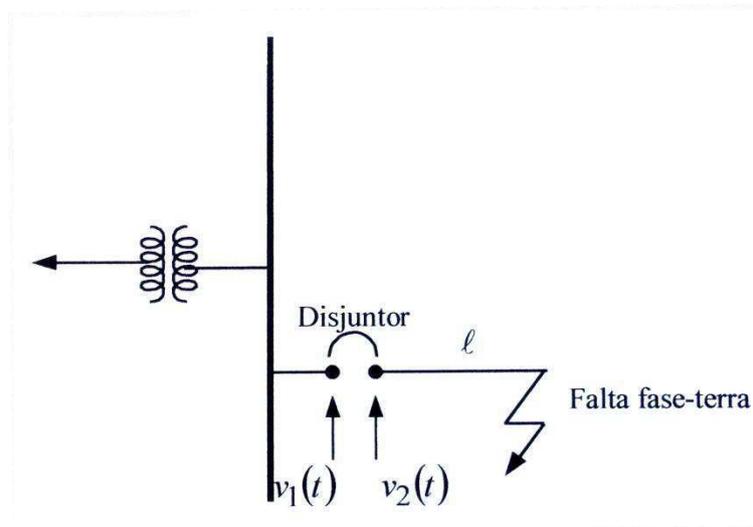


Figura 12. Falta fase-terra a pequena distância dos terminais do disjuntor (NOBRE, 1999).

No circuito da Figura 12, a falta está localizada em um ponto da linha a uma distância  $\ell$  dos terminais do disjuntor. Após a extinção da corrente, que é considerada como a interrupção da corrente no instante em que seu valor passa pelo primeiro zero após a abertura do disjuntor, a tensão no lado da linha do dispositivo de proteção,  $v_2(t)$ , é do tipo dente de serra e, no lado da fonte,  $v_1(t)$ , geralmente tem a forma de onda do tipo exponencial-cosseno. Dependendo do sistema considerado  $v_1(t)$  pode ser do tipo um-menos-cosseno.

A rampa inicial imposta pela tensão  $v_2(t)$  acarreta em condições severas submetidas ao meio dielétrico do disjuntor antes que este recupere sua rigidez dielétrica, fato que possibilita a ocorrência de uma reignição do arco elétrico.

A TRT corresponde à diferença entre  $v_1(t)$  e a onda dente de serra,  $v_2(t)$ . Desprezando as perdas no sistema, a onda do tipo dente de serra tem um ponto inicial correspondente a uma tensão  $v_{2_0}$  e alcançaria o pico mínimo no ponto  $-(v_{2_0})$ , continuando a viajar atingindo tais valores de pico. A TRT nos terminais do disjuntor é mostrada na Figura 13.

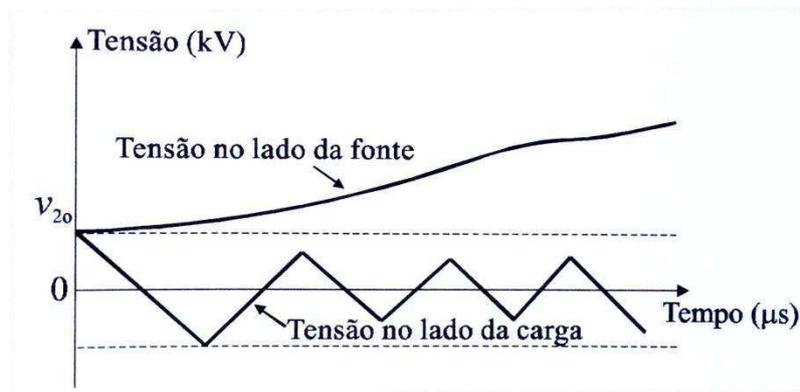


Figura 13. TRT para uma falta fase-terra a pequena distância dos terminais do disjuntor (NOBRE, 1999).

### 3.3 FATORES DE INFLUÊNCIA NA FORMA DE ONDA DA TRT

A TRT está diretamente relacionada com o tipo e localização da falta e com os parâmetros do sistema elétrico de potência.

A TRT é função da amplitude da corrente de curto-circuito e do nível de tensão do sistema, além disso, a impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor é de fundamental importância na determinação do valor de pico da TRT e na sua taxa de crescimento.

Como explicitado no item 3.2, as faltas nos terminais do disjuntor apresentam maiores amplitudes da TRT e as faltas quilométricas são responsáveis por maiores taxas de crescimento da mesma (TCTRT).

## 4 MODELAGEM DE SUBESTAÇÕES

Os parâmetros da TRT, os valores nominais de disjuntores e os parâmetros de circuitos de ensaio de curto-circuito são especificados por normas técnicas.

No Brasil, a norma NBR-7118 – Disjuntores de alta tensão da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) especifica as características dos disjuntores de corrente alternada projetados para sistemas elétricos de potência com tensões acima de 1000 V e frequências iguais ou inferiores a 60 Hz (ABNT, 1994), que por sua vez se baseia na norma IEC-56 – *High-voltage alternating current circuit breakers* do ano de 1987. Existem normas mais atuais: IEC 62271-100, 2006 e IEEE C37.011, 2005.

Para facilitar o estudo sobre TRT, considera-se apenas a TRT produzida pela configuração do sistema sem levar em conta as modificações que podem surgir pela interação do disjuntor com o sistema. Para normalização, a TRT é representada através das envoltórias de suas formas de onda.

As normas ANSI (*American National Standard Institute*) definem quatro tipos de TRT para todos os tipos de disjuntores. São eles:

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

## 4.1 CÁLCULO DA TRT

Levando em consideração as capacitâncias, indutâncias e resistências do sistema que será analisado, o cálculo da TRT torna-se bastante complexo. Neste sentido, faz-se necessário o uso de programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos para estimar a TRT em disjuntores, como programas do tipo EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*). O software ATP<sup>®</sup> (*Alternative Transient Program*) é empregado para o cálculo de transitórios eletromagnéticos. O mesmo utiliza métodos de cálculos no domínio do tempo, que consistem em calcular os valores de tensão e corrente nos componentes do sistema em função do tempo. O procedimento é realizado em intervalos de tempo constantes onde as variáveis do sistema são atualizadas. Partindo-se das condições iniciais do sistema no instante  $t = 0$ , as tensões e correntes dos componentes são calculadas para os instantes  $t = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ , até o tempo máximo de simulação,  $t_{máx}$ .

O estudo de transitórios eletromagnéticos nos disjuntores será realizado por meio de simulações digitais através da análise das formas de onda da TRT entre os terminais dos disjuntores no domínio do tempo.

No programa, os componentes do sistema como os transformadores, disjuntores, cabos, linhas, carga, pararraios e outros são representados. Na prática, estes componentes são representados a partir de um determinado ponto do sistema que, para o estudo de TRT, corresponde no mínimo à segunda barra além da qual o disjuntor em estudo está conectado. A representação do sistema elétrico de potência até esta barra é feita por meio de uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente de Thévenin. Este procedimento tem se mostrado suficiente para não afetar a resposta transitória durante o período de interesse do fenômeno (CCON, 1991).

## 4.2 REPRESENTAÇÃO DA TRT EM ESTUDO

Grande parte das formas de onda da TRT que serão apresentadas e que foram obtidas por meio de simulações digitais da subestação Angelim são do tipo exponencial-cosseno. Pela norma NBR-7118, esta forma de onda é representada por uma envoltória de quatro parâmetros. Ademais, como a tensão nominal dos disjuntores em ocasião é 15 kV, a TRT é representada por uma envoltória de dois parâmetros.

Os dois parâmetros representativos da TRT em questão consistem no valor de pico da TRT,  $U_c$ , e a taxa de crescimento da mesma, TCTRTR, que corresponde a variação de tensão de restabelecimento transitória em relação ao tempo. A TCTRTR pode ser representada de quatro maneiras diferentes, conforme mostrado na Figura 14 (CCON, 1991).

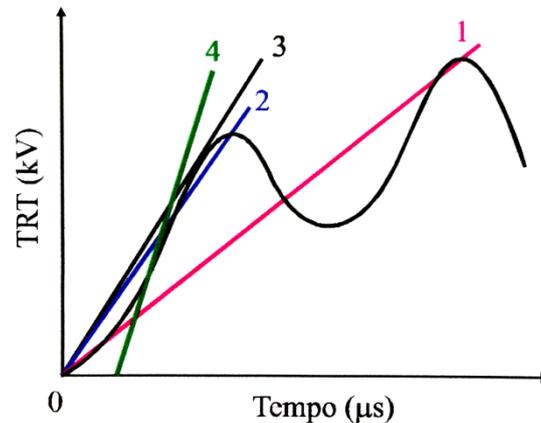


Figura 14. Taxa de crescimento da TRT (NOBRE, 1999).

Onde, na Figura 14:

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, que corresponde à tangente da TRT pela origem.

4 é o valor máximo da TCTRTR.

Os valores de  $U_c$  (kV) e TCTRTR ( $\text{kV}/\mu\text{s}$ ) são ilustrados na Figura 15.

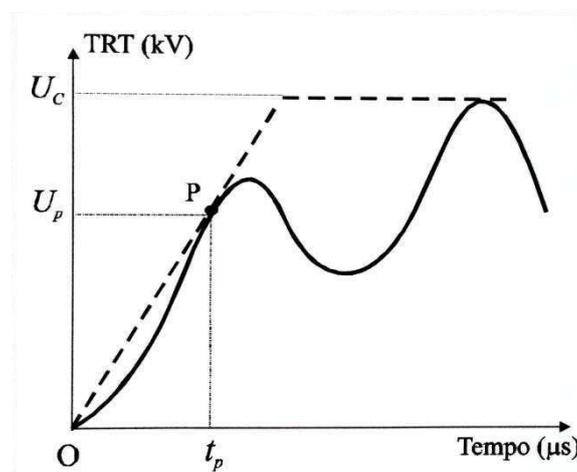


Figura 15. Valor de pico da TRT e sua taxa de crescimento (NOBRE, 1999).

Na prática, a TCTRT corresponde à máxima taxa de crescimento expressa pela inclinação da reta OP (vide Figura 15).

A TCTRT e os valores de pico da TRT especificados pela norma NBR-7118, considerando 100%, 60% e 30% da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores de classe 15 kV, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Suportabilidade à TRT nos disjuntores de 15 kV.

<b>Capacidade de interrupção simétrica</b>	<b><math>U_c</math> (kV)</b>	<b>TCTRT (kV/<math>\mu</math>s)</b>
0 – 30%	27,6	1,97
30% - 60%	27,6	0,95
60% - 100%	25,7	0,38

As normas atuais estabelecem a capacidade de interrupção simétrica de 10%, 30%, 60% e 100%.

A porcentagem da corrente de interrupção nos disjuntores é obtida fazendo uso da Equação 7 (CCON, 1991).

$$I_{cc} \% = \frac{I_{cc}}{I_{m\acute{a}x}} \cdot 100, \quad (7)$$

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.

### 4.3 COMPARAÇÃO DA TRT EM ESTUDO E DA TRT ESPECIFICADA

Para que os disjuntores instalados nas subestações estejam adequados às solicitações impostas pela TRT é necessário que a envoltória da mesma esteja abaixo da envoltória da TRT especificada, isto é, os parâmetros representativos da TRT em estudo devem estar abaixo dos parâmetros representativos estabelecidos em norma.

## 4.4 SIMULAÇÕES DIGITAIS

Como estudo de caso será apresentado simulações digitais utilizando o *software* ATP® para análise da influência da carga no barramento de 13,8 kV da subestação Angelim na TRT, além da análise de sensibilidade da TRT em relação ao efeito de saturação do transformador e do modelo da linha no mesmo setor.

A situação utilizada no estudo corresponde a eliminação de um curto-circuito trifásico não aterrado nos terminais do disjuntor quando da abertura do seu primeiro pólo para a determinação dos parâmetros da TRT ( $U_c$  e TCTRT). Será considerado, também, faltas quilométricas. As simulações são realizadas no setor de 13,8 kV da referenciada subestação, cuja configuração utilizada nas simulações é representada na Figura 16.

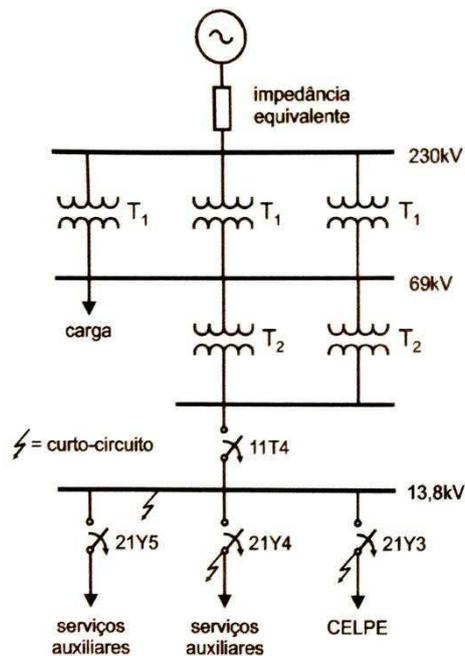


Figura 16. Subestação Angelim (NOBRE, 1999).

Na subestação apresentada na Figura 16,  $T_1 = 100$  MVA e  $T_2 = 5$  MVA.

A forma de onda da TRT é analisada para os seguintes casos:

- Análise da TRT nos terminais do disjuntor 11T4 na ocorrência de um curto-circuito trifásico não aterrado no segundo barramento de 13,8 kV;
- Análise da TRT nos terminais do disjuntor 21Y4 na ocorrência de um curto-circuito trifásico não aterrado em seus terminais;

- Análise da TRT nos terminais do disjuntor 21Y3 na ocorrência de um curto-circuito fase-terra a uma distância de 1, 3 e 5 km dos seus terminais;
- Análise da TRT nos terminais do disjuntor 21Y3 na ocorrência de um curto-circuito trifásico não aterrado em seus terminais.

Estudos realizados pela Ontario Hydro sugerem uma representação detalhada do núcleo do transformador a partir de modelos dependentes da frequência (TARASIEWICZ, MORCHED, *et al.*, 1993). Para verificar o efeito da saturação do transformador na TRT, são realizadas simulações com e sem a representação da característica de saturação do mesmo.

Para análise da influência da linha de 13,8 kV na TRT, são realizadas simulações utilizando parâmetros distribuídos. Esta linha é considerada como um alimentador trifásico de 15 km de comprimento.

Para análise da sensibilidade de carga, são realizadas simulações considerando situações de sem carga, carga de 0,5 MW e plena carga no setor de 13,8 kV da subestação em estudo.

De acordo com os dados da CHESF, os disjuntores 11T4, 21Y3 e 21Y4 de fabricação Wenco, modelo 144G1000, utilizam o óleo como meio de extinção e têm tensão máxima de operação de 15,5 kV. As características do disjuntor 11T4 são apresentadas na Tabela 2 e as características dos disjuntores 21Y3 e 21Y4, na

Tabela 3:

Tabela 2. Características do disjuntor 11T4.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Máxima corrente de interrupção simétrica	40 kA

Corrente Nominal	1200 A
Ano de fabricação	1967

Tabela 3. Características dos disjuntores 21Y3 e 21Y4.

Parâmetro	Valor
Máxima corrente de interrupção simétrica	16 kA
Corrente Nominal	560 A
Ano de fabricação	1975

Os dados representativos dos componentes da subestação a serem utilizados nas simulações no ATP são apresentados nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8 (BELLO e ALVES, 1996).

Tabela 4. Dados do transformador.

<b>Potência nominal (MVA)</b>	33,3	5	100
<b><math>X_{ab}</math> (%) sequência positiva</b>	73,15	15,52	13,20
<b><math>S_{base} = 100</math> MVA</b>			

Tabela 5. Dados de carga.

Tensão na Barra (kV)	MW	Mvar
69	123	32,3
13,8	4,2	0

Tabela 6. Equivalente no barramento de 230 kV.

Sequência	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )
Positiva	0,0023	0,0187

Zero	0,0029	0,0165
------	--------	--------

Tabela 7. Parâmetros dos cabos.

<b>R</b> (ohm/km/fase)	<b>X<sub>L</sub></b> (ohm/km/fase)	<b>C</b> (nF/km/fase)
0,147	0,349	12,35

Tabela 8. Comprimento dos cabos.

Barra 230 kV – Transformador 100 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

Para modelar uma subestação com o intuito de realizar estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória, o sistema pode ser representado por uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente de Thévenin. No caso abordado para simulação no ATP, o circuito equivalente de Thévenin é utilizado do ponto de vista do barramento de 230 kV, seguido dos demais componentes da subestação, de tal modo que a tensão no mesmo barramento é calculada admitindo-se uma tensão de 1,05 p.u. no primeiro barramento de 13,8 kV.

A curva de saturação do transformador, em simulações de transitórios eletromagnéticos, apresentada na Figura 17, é representada por meio da linearização por segmentos, a qual é mostrada na Figura 18.

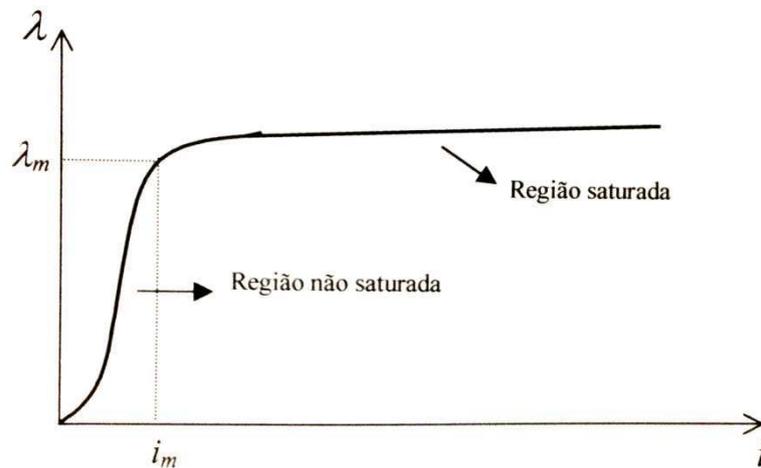


Figura 17. Curva de saturação (NOBRE, 1999).

onde  $\lambda_m$  é o fluxo magnético e  $i_m$  a corrente de magnetização.

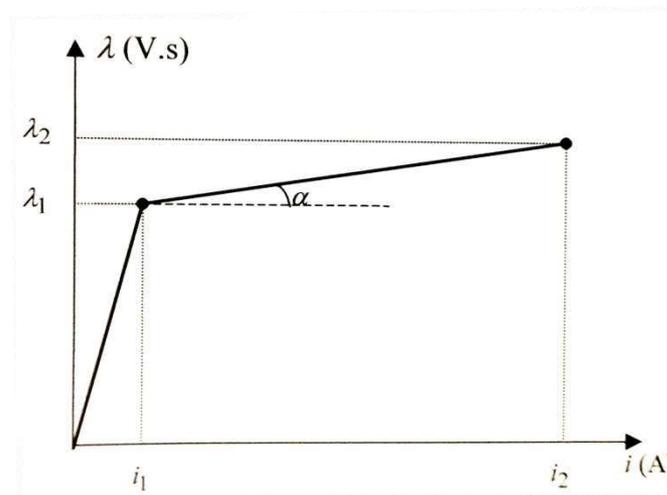


Figura 18. Curva de saturação linearizada por dois segmentos (NOBRE, 1999).

em que  $\lambda$  corresponde ao fluxo enlaçado pelo enrolamento secundário do transformador [V·s],  $i$  consiste na corrente no enrolamento secundário do equipamento [A] e  $\alpha$  é a inclinação da reta na região de saturação.

A linearização por dois segmentos é suficiente para a representação da curva de saturação (DOMMEL, 1992).

Os valores dos pontos  $(i, \lambda)$  utilizados para o transformador trifásico equivalente de potência nominal 300 MVA estão apresentados na Tabela 9:

Tabela 9. Pontos  $(i, \lambda)$  utilizados na linearização por dois segmentos para o transformador de 300 MVA.

$i$ (A)	$\lambda$ (V·s)
---------	-----------------

2,5625	323,5436
77684,0991	970,6308

Para o transformador trifásico equivalente de potência nominal 10 MVA, os dados estão apresentados na Tabela 10:

Tabela 10. Pontos  $(i, \lambda)$  utilizados na linearização por dois segmentos para o transformador de 10 MVA.

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

O arquivo de simulação utilizado neste trabalho encontra-se no anexo 1.

## 5 RESULTADOS

Os resultados obtidos nas simulações<sup>1</sup> de curto-circuito trifásico não aterrado nos terminais dos disjuntores 11T4, 21Y4 e 21Y3 podem ser divididos levando-se em consideração três grupos. São eles:

- 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.

Na Figura 19 é apresentada a TRT na fase A nos terminais do disjuntor 11T4, na configuração de sem carga no barramento de 13,8 kV e considerando o grupo 1.

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

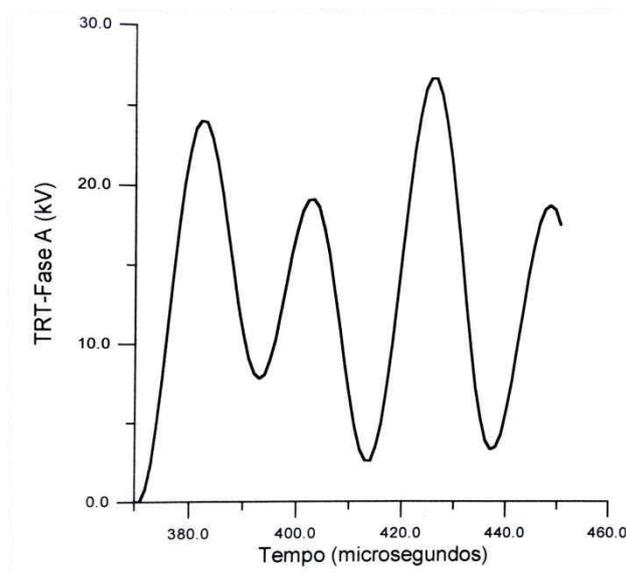


Figura 19. TRT nos terminais do disjuntor 11T4, fase A, grupo 1, sem carga.

Na Figura 20 é apresentada a TRT na fase A nos terminais do disjuntor 11T4, na configuração de plena carga no barramento de 13,8 kV e considerando o grupo 1.

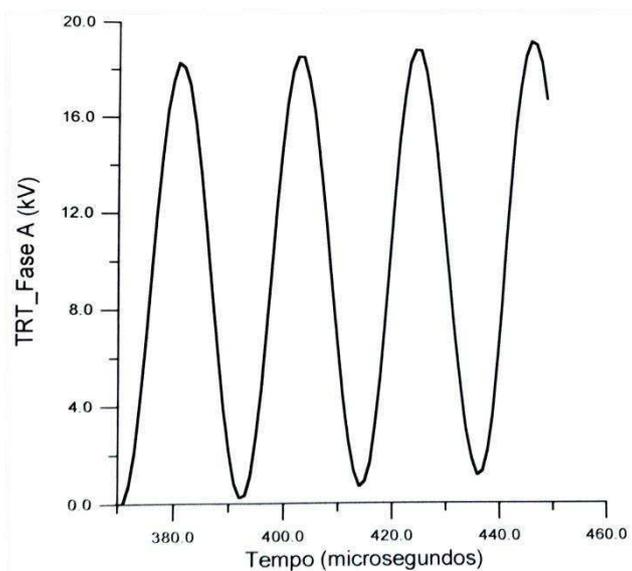


Figura 20. TRT nos terminais do disjuntor 11T4, fase A, grupo 1, plena carga.

Na Figura 21 é apresentada a forma de onda da TRT na fase A nos terminais do disjuntor 21Y4, na configuração de sem carga no barramento de 13,8 kV e considerando o grupo 1.

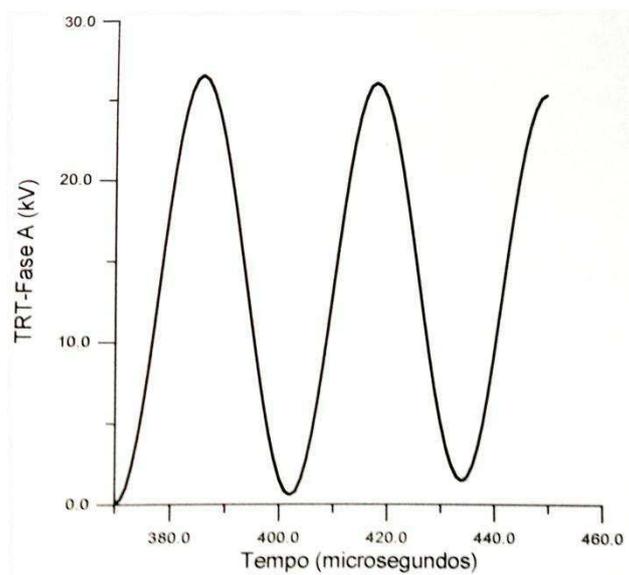


Figura 21. TRT nos terminais do disjuntor 21Y4, fase A, grupo 1, sem carga.

Na Figura 22 é apresentada a forma de onda da TRT na fase A nos terminais do disjuntor 21Y4, na configuração de plena carga no barramento de 13,8 kV e considerando o grupo 1.

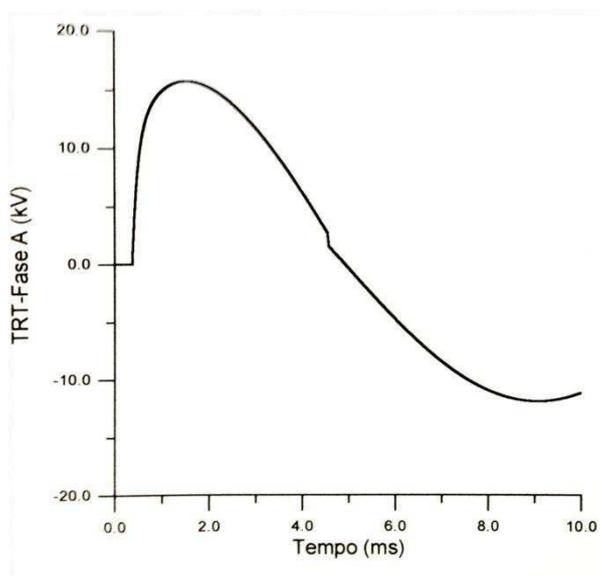


Figura 22. TRT nos terminais do disjuntor 21Y4, fase A, grupo 1, plena carga.

Na Figura 23 é apresentada a forma de onda da TRT na fase A nos terminais do disjuntor 21Y3, na configuração de sem carga no barramento de 13,8 kV e considerando o grupo 1.

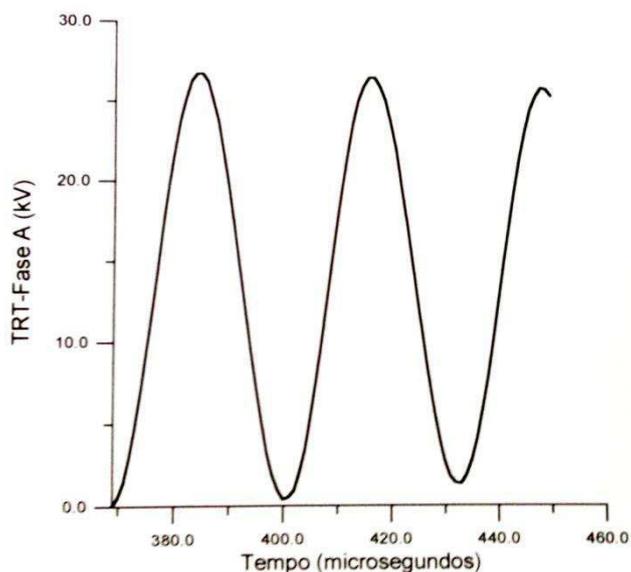


Figura 23. TRT nos terminais do disjuntor 21Y3, fase A, grupo 1, sem carga.

Na Figura 24 é apresentada a forma de onda da TRT na fase A nos terminais do disjuntor 21Y3, na configuração de plena carga no barramento de 13,8 kV e considerando o grupo 1.

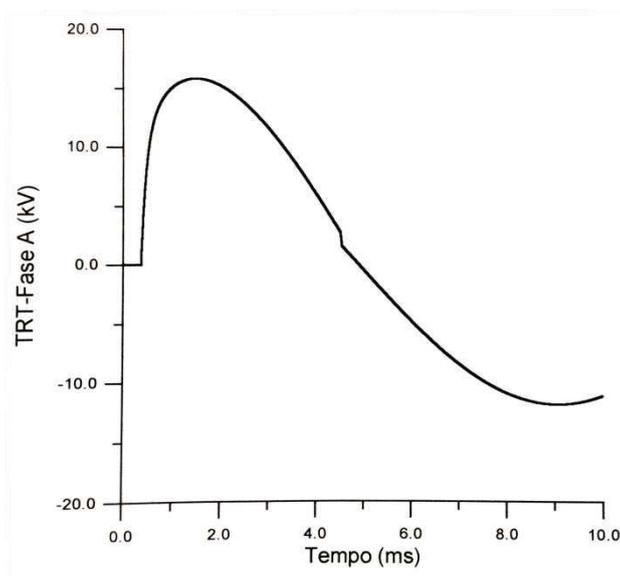


Figura 24. TRT nos terminais do disjuntor 21Y3, fase A, grupo 1, plena carga.

O efeito de saturação dos transformadores tem influência mínima nos parâmetros da TRT, valor de pico e TCTRT, dos disjuntores da subestação em estudo, apresentando valores de pico com uma variação de apenas 0,06 kV e variação máxima da TCTRT de 0,01 kV/ $\mu$ s.

Verifica-se com a representação da linha de 13,8 kV que o pico da TRT, nos terminais do disjuntor 21Y3, é amortecido de um valor máximo de 3,15 kV. Para os

disjuntores 11T4 e 21Y4, verificou-se casos em que o valor de pico da TRT apresentou um aumento de no máximo 1,2 kV. O efeito de amortecimento da TCTRT é mais significativo, principalmente para os disjuntores 21Y4 e 21Y3, alcançando valores de no máximo 1,43 kV/  $\mu$ s.

## 6 CONCLUSÃO

Em estudos de TRT, a modelagem de parte do sistema elétrico de potência e da subestação, em programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos, é realizada por meio de um circuito equivalente Thévenin, fonte de tensão em série com uma impedância, o qual representa o comportamento dos mesmos em um determinado ponto do sistema. Este corresponde, no mínimo, à segunda barra além daquela onde o disjuntor em análise está conectado. Foram apresentadas as formas de onda da TRT nos terminais dos disjuntores 11T4, 21Y3 e 21Y4 para os casos de sem carga e plena carga no barramento de 13,8 kV da subestação Angelim.

As curvas da Tensão de Restabelecimento Transitória dos disjuntores da subestação em análise obtidas a partir das simulações são, na grande maioria, do tipo exponencial-cosseno. Este tipo de curva é especificado, por norma, através de quatro parâmetros. Ademais, como a tensão nominal dos disjuntores é inferior a 72,5 kV, a TRT foi representada por apenas dois parâmetros: valor de pico e taxa de crescimento.

Para as configurações da subestação abordadas, o efeito de saturação do núcleo dos transformadores e a representação da linha de 13,8 kV tornam-se dispensáveis, visto

que a variação máxima da TRT obtida nas simulações face aos valores da mesma quando considerados tais efeitos é mínima. De modo geral, o efeito de saturação do transformador deve ser considerado quando o fluxo enlaçado por um dos enrolamentos do dispositivo estiver 30% acima de seu valor nominal.

Outros estudos referentes à TRT podem ser desenvolvidos como a realização de teste de campo no sentido de comparar as formas de onda da TRT com aquelas obtidas nas simulações, realizar projeções do efeito do aumento da carga no decorrer dos anos na TRT, além de fazer simulações com disjuntores de classe superior.

## BIBLIOGRAFIA

ABNT. **NBR-7118 Disjuntores de alta tensão**. Rio de Janeiro, p. 161. 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, 1995.

BELLO, J. C. A.; ALVES, F. R. **Estudos de tensão de restabelecimento transitória (TRT) no setor de 13,8 kV**. CHESF. Recife. 1996.

CCON. **Metodologia e critérios para a análise de adequação de disjuntores quanto à tensão de restabelecimento transitória**. Recife. 1991.

DOMMEL, H. W. **EMTP theory book**. Vancouver: [s.n.], 1992.

MAMEDE, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. I, 1994.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GARZON, R. D. **High voltage circuit breakers design and applications**. New York: Marcel Dekker, 1997. 365 p.

GUERRA, F. C. F. **Proteção de Sistemas Elétricos**. Campina Grande: [s.n.].

NOBRE, D. M. **Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT.** Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande. 1999.

SOUZA, B. A. D. **Distribuição de Energia Elétrica.** Campina Grande: [s.n.], 1997.

STEVENSON, W. D.; GRAINGER, J. J. **Power System Analysis.** International. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.

TARASIEWICZ, J. E, MORCHED, S. A., NARANG, A., DICK, P. E. **Frequency dependent eddy current models for nonlinear iron cores.** IEEE. [S.l.], p. 588-597. 1993.

## ANEXO A – ARQUIVO DE DADOS DO ATP<sup>®</sup>

### (NOBRE, 1999)

```

BEGIN NEW DATA CASE
C
C
C *****
C ESTUDO DE TRT NO DISJUNTOR 11T4 - 13.8 kV DA SE ANGELIM
C
C SEM CARGA NO BARRAMENTO DE 13.8 kV
C *****
C
C *****
C ANO - 1998
C *****
C
C CONSIDERA-SE 0 EQUIVALENTE NO BARRAMENTO DE 230 KV DE ANGELIM
C CONSIDERANDO CURTO-CIRCUITO TRIFASICO NAO ATERRADO NO PRIMEIRO

```

C BARRAMENTO DE 13.8 kV, COM CARGA DE 104 MW E 27.4 MVAR NO  
 C BARRAMENTO DE 69 kV .  
 C NUMERO DE TRANSFORMADORES - 3X230-69 kV / 2X69-13.8 kV  
 C  
 C CARTOES DE MISCELANEA  
 C  
 1.E-6 10E-3 60. 60. 1.E-20  
 1 1 1 1 1 1  
 C \*\*\*\*\*  
 C EQUIVALENTE NO BARRAMENTO DE 230 kV DE ANGELIM  
 C RAMOS R-L MUTUAMENTE ACOPLADOS  
 C \*\*\*\*\*  
 C  
 C EQUIVALENTE NO BARRAMENTO DE 230 kV - ANO 1998  
 C  
 51EQ230ABC230A 0.00490.0224  
 52EQ230BBC230B 0.00250.0205  
 53EQ230CBC230C  
 C \*\*\*\*\*  
 C TRANSFORMADORES DE 33.3 MVA BARRAMENTOS: 230-69 kV  
 C \*\*\*\*\*  
 C  
 C PARAMETROS DO TRAFOS DE 33.3 MVA 230-69 kV - ANGELIM  
 C TRAFOS - 04T1 / 04T2 / 04T3  
 C  
 C \*\*REATANCIA NA BASE DE 100 MVA  
 C  $X_{AB} = 73.15 \%$   
 C  $X_{AB} = 0.7315 \text{ PU}$   
 C \*\*PARA TRES TRAFOS EM PARALELO\*\*  
 C \*\* EQUIVALENTE \*\*  
 C  $X_{AB} = 0.7315/3 = 0.2438$   
 C \*\*DOIS ENROLAMENTOS\*\*  
 C  $X_{AB} = 0.2438/2$   
 C  $X_A = 0.1219 \text{ PU}$   
 C  $X_B = 0.1219 \text{ PU}$   
 C  
 C \*\*REATANCIA EM OHMS NO ENROLAMENTO DE ALTA\*\*  
 C IMPEDANCIA DE BASE - 230 kV , 100 MVA  
 C  $Z_{BASE} = V^2/S_{BASE}$   
 C  $Z_{BASE} = (230)^2/100$   
 C  $Z_{BASE} = 529 \text{ OHMS}$   
 C  $X_A = 0.1219 \times 529 = 64.4851 \text{ OHMS}$   
 C  
 C \*\*REATANCIA EM OHMS NO ENROLAMENTO DE BAIXA\*\*  
 C IMPEDANCIA DE BASE - 69 kV , 100 MVA  
 C  $Z_{BASE} = V^2/S_{BASE}$   
 C  $Z_{BASE} = (69)^2/100$   
 C  $Z_{BASE} = 47.61 \text{ OHMS}$   
 C  $X_B = 0.1219 \times 47.61 = 5.8036 \text{ OHMS}$   
 C  
 C LIGACAO EM DELTA - 69 kV  
 C  $X_B = 5.8036 \times 3 = 17.4109 \text{ OHMS}$   
 C  
 C FATOR X/R = 50 DE ACORDO NORMA ANSI  
 C  $R_A = 1.2897 \text{ OHMS}$ ,  $R_B = 0.3482 \text{ OHMS}$   
 C

C  
 C       TRAFO 33.3 MVA 230-69 kV  
 C       ESPECIFICACAO DE TRANSFORMADOR  
 C  
 TRANSFORMER               TC2A  
       9999  
 102B1A 02B1B       0.348 17.41 69.00  
 2TR230A            1.290 64.48 132.79  
 TRANSFORMER TC2A           TC2B  
 102B1B 02B1C  
 2TR230B  
 TRANSFORMER TC2A           TC2C  
 102B1C 02B1A  
 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       \*\*MUDANCA 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  $XA = 0.313 \times 47.61 = 14.9019 \text{ OHMS}$   
 C  
 C LIGACAO EM DELTA  
 C  $XA = 14.9019 \times 3 = 44.7057 \text{ OHMS}$   
 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  $XB = 0.313 \times 1.9044 = 0.5961 \text{ OHMS}$   
 C  
 C FATOR X/R = 30 DE ACORDO NORMA ANSI  
 C  $RA = 1.49019 \text{ OHMS}, RB = 0.01987 \text{ OHMS}$   
 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 CABO AEREO 336.3 MCM ENTRE BARRA DE 230 KV DE ANGELIM E O TRAF0 DE  
 C 33.3 MVA  
 C TRAF0 04T1  
 C SEQUENCIA POSITIVA (EM KM/FASE)  
 C  $R = 0.147 \text{ OHMS}, X = 0.349 \text{ OHMS}, C = 12.35 \text{ NF}$

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 TRAF0 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 TRAFOS

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 REPRESENTACAO DA LINHA ENTRE O TERMINAL DO DISJUNTOR 21Y3

C E O SEU TERMINO A PARAMETROS DISTRIBUIDOS

C D = 15.0 KM

C

C

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

```

C *****
C PARAMETROS DE CARGA (MW)
C *****
C
C *****
C BARRAMENTO DE 69 kV
C *****
C
C PARAMETROS DE CARGA      NO BARRAMENTO DE 69 KV
C 104 MW; 27.4 MVAR
C  $R = V2 / P$    $X = V2 / Q$ 
C  $R = 45.78$  OHMS,  $X = 173.76$  OHMS
C 02B1A 45.78
C 02B1B 45.78
C 02B1C 45.78
C 02B1A 173.76
C 02B1B 173.76
C 02B1C 173.76
C
C *****
C BARRAMENTO DE 13.8 kV
C *****
C
C PARAMETROS DE CARGA - 13.8 kV
C ALIMENTADOR CELPE E SERVIDOS AUXILIARES
C 3 MW
C  $R = V2 / P$ 
C  $R = 63.48$  OHMS
C
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 CAPACITANCIAS PARA TERRA (BUCHA + ENROLAMENTO)
C
C TR230A 1.13
C TR230B 1.13
C TR230C 1.13
C 02B1A 1.13
C 02B1B 1.13
C 02B1C 1.13
C TR69A 1.13
C TR69B 1.13
C TR69C 1.13
C T13.8A 1.13
C 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      PEQUENA RESISTENCIA PARA MEDIR CORRENTE DE CURTO
C      *****
C
B13.8ACURTO  1.0E-6
B13.8BCURTO  1.0E-6
B13.8CCURTO  1.0E-6
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
DISJ1ADISJ2A-1.  0.          3
DISJ1BDISJ2B-1.  0.          3
DISJ1CDISJ2C-1.  0.          3
C
C REPRESENTACAO DO DISJUNTOR 21Y5 - SE ANGELIM
C
DISJ3ADISJ4A-1.  1.

```

DISJ3BDISJ4B-1. 1.

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 \*\*\*\*\*

C FONTE SENOIDAL TIPO 14

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 TENSAO 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

