**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

PATRICIA DE OLIVEIRA PRETO

Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória

São Paulo
2017

PATRICIA DE OLIVEIRA PRETO

Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
mestre em ciências.

Área de Concentração: Sistemas de
Potência

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cera Zanetta
Junior

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

De Oliveira Preto, Patricia

Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória
/ P. De Oliveira Preto -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
85 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. .

1.DISJUNTORES 2.TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. II.t.

Nome: De Oliveira Preto, Patricia

Título: Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de mestre em
ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedico este trabalho ao meu marido, ao meu pai e à minha mãe que me apoiaram ao longo do período de elaboração deste trabalho, nas diversas vezes em que pensei em desistir.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Cera Zanetta Junior, orientador, que muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento intelectual, sem contar todo o tempo e atenção dedicados ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Coelho Marques da Costa, pelo suporte no uso de ferramentas de simulação e ao tempo disponibilizado para a execução deste trabalho.

RESUMO

DE OLIVEIRA PRETO, PATRICIA. **Cálculo da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória**. São Paulo, 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2017.

Esta dissertação aborda o cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TCTRT), considerando o caso de falha na barra, durante a abertura do primeiro polo e o cálculo da tensão de restabelecimento transitória (TRT) nos primeiros instantes de tempo, incluindo o efeito da capacitância. Os principais casos possíveis de falha na barra foram analisados e os resultados demonstraram a precisão das expressões obtidas. Normalmente, o cálculo da TCTRT e da TRT é feito por meio de simulações em programas de transitórios eletromagnéticos em que há rotinas específicas para a extração dos valores destas, porém, em determinadas condições, podem ocorrer oscilações ou imprecisões numéricas. Por ser um assunto de grande interesse convém desenvolver expressões que possam esclarecer resultados duvidosos sem a necessidade de artifícios de redução do passo de integração a valores muitas vezes não factíveis. As expressões obtidas neste trabalho podem ser utilizadas não só para se obter de forma precisa e simplificada os valores da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória de um circuito real, assim como os valores da TRT nos primeiros instantes de tempo.

Palavras-chave: Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória, Tensão de Restabelecimento Transitória, Transitórios Eletromagnéticos, Injeção de Corrente, Sistemas de distribuição de alta tensão, Planejamento da expansão do sistema elétrico.

ABSTRACT

DE OLIVEIRA PRETO, PATRICIA. **Transient Recovery Voltage Rate Calculation**. São Paulo, 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2017.

This study is focused on the rate of rise of transient recovery voltage (RRTRV) calculation considering the case of bus fault, during the first pole to open, and also includes the transient recovery voltage (TRV) calculation, in the first instants of time, including the capacitance effect. The main cases of bus fault have been evaluated and demonstrate that the expressions developed in this study are relevant and with good precision. Usually, the RRTRV and the TRV are calculated with the use of simulation programs, using specific routines, nevertheless, in certain conditions, there might be oscillations and numeric imprecisions which requires a mathematic expression. This topic is of great interest and it is important to have mathematical expressions that could clarify doubtful results. The expressions obtained in this study can be use in a very simples and effective mode to calculate RRTRV and the TRV in the first instants of time, considering a real life circuit.

Keywords: RRTRV (Rate of Rise of Transient Recovery Voltage), TRV (Transient Recovery Voltage), Electromagnetic Transitory, Current Injection, High Voltage Transmission Systems, Electrical System Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de TRT com reignição	13
Figura 2 - Características dielétricas para diferentes tipos de disjuntores	13
Figura 3 - Fases de Interrupção de Corrente	14
Figura 4 - Exemplo de não superação TRT	15
Figura 5- Exemplo de superação TRT	15
Figura 6 - TRT Curto Trifásico Isolado	23
Figura 7 - Construção das curvas de 2-4 parâmetros	24
Figura 8 - Curto monofásico terra.....	31
Figura 9 - Curto dupla fase terra	32
Figura 10 - Curto trifásico terra.....	34
Figura 11 - Curto trifásico isolado.....	36
Figura 12 - Curto dupla fase isolado	39
Figura 13 - Circuito simplificado	47
Figura 14 - Circuito simplificado, curto monofásico	49
Figura 15 - Circuito simplificado, curto dupla fase terra	50
Figura 16 - Circuito simplificado, curto trifásico terra.....	50
Figura 17 - Circuito simplificado, curto dupla fase isolado	51
Figura 18 - Circuito simplificado, curto trifásico isolado.....	51
Figura 19 - Circuito simplificado com capacitância.....	52
Figura 20 - Gráfico ATP Monofásico TRT	52
Figura 21 - Gráfico ATP dupla fase terra TRT	53
Figura 22 - Gráfico ATP trifásico terra TRT	53
Figura 23 - Gráfico ATP dupla fase isolado TRT	54
Figura 24 - Gráfico ATP trifásico isolado TRT	54
Figura 25 - RLC Monofásico.....	55
Figura 26 - RLC Dupla fase terra	55
Figura 27 - RLC Trifásico terra	56
Figura 28 - RLC Dupla fase isolado	56
Figura 29 - RCL Trifásico isolado	57
Figura 30 - Rede de maior porte	58
Figura 31 - Rede de maior porte, curto monofásico	59
Figura 32 - Rede de maior porte, curto dupla fase terra.....	59
Figura 33 - Rede de maior porte, curto trifásico terra.....	60
Figura 34 - Rede de maior porte, curto dupla fase isolado.....	60
Figura 35 - Curto trifásico isolado.....	61
Figura 36 - Propagação de ondas	68
Figura 37 - Cancelamento de corrente.....	70
Figura 38 - Curto com gerador de corrente	70
Figura 39 - Simulação da abertura do curto	71
Figura 40 - Caso monofásico	72
Figura 41 - Equivalente caso monofásico	72
Figura 42 - Equivalente caso monofásico, transitório	72
Figura 43 - Caso trifásico	76
Figura 44 - Equivalente caso trifásico	76
Figura 45 - Rede ATP (comparação ATP/PSCAD)	83
Figura 46 - Rede PSCAD (comparação ATP/PSCAD)	84
Figura 47 - TRT (comparação ATP/PSCAD).....	84
Figura 48 - TRT ATP	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações TCTRT com transposição.....	40
Tabela 2 - Equações TCTRT sem transposição.....	41
Tabela 3 - Expressão da TRT nos primeiros instantes de tempo.....	42
Tabela 4 - Gerador 1 circuito simplificado	48
Tabela 5 - Gerador 2 circuito simplificado	48
Tabela 6 - Linha de transmissão do circuito simplificado	48
Tabela 7 - Resultados do circuito simplificado	49
Tabela 8 - Linha de transmissão circuito típico	58
Tabela 9 - Resultados circuito típico	61
Tabela 10 - Resultados RLC Monofásico	80
Tabela 11 - Resultados RLC dupla fase terra	80
Tabela 12 - Resultados RLC trifásico terra	81
Tabela 13 - Resultados RLC dupla fase isolado	81
Tabela 14 - Resultados RLC trifásico isolado.....	82

LISTA DE SIGLAS

TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
TCTRT	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
ATP	Alternative Transients Program
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EMTP	Eletromagnetic Transients Program
TRV	Transient Recovery Voltage
ITRV	Initial Transient Recovery Voltage
RRTV	Rate of Rise of Transient Recovery Voltage

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO – CÁLCULOS DA TCTRT E DA TRT NOS PRIMEIROS INSTANTES DE TEMPO	30
3.1 CÁLCULO DA TCTRT	30
3.1.1 Curto Monofásico	31
3.1.2 Curto Dupla Fase Terra	32
3.1.3 Curto Trifásico Terra	34
3.1.4 Curto Trifásico Isolado	36
3.1.5 Curto Dupla Fase Isolado	38
3.1.6 Resumo Das Equações TCTRT	40
3.2 CÁLCULO DA TRT NOS PRIMEIROS INSTANTES DE TEMPO	41
4 RESULTADOS	47
4.1 RESULTADOS EM UMA REDE SIMPLIFICADA	47
4.2 RESULTADOS EM UMA REDE DE MAIOR PORTE	57
5 CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICES	68

1 INTRODUÇÃO

Na eliminação de falhas em sistemas elétricos de potência, além de correntes de curto-circuito elevadas, os disjuntores são submetidos à tensão de restabelecimento transitória (TRT). Esta tensão é a resposta do sistema para o processo de interrupção. Durante este processo, o arco elétrico perde condutividade, conforme a corrente se aproxima de zero, aparecendo neste momento uma tensão entre os terminais dos disjuntores, a TRT. Esta possui duas características principais, sua tensão de pico e a sua taxa de crescimento (TCTRT).

O pico da TRT, é medido em kV e seu valor não pode ser superior à suportabilidade dielétrica do meio de extinção, evitando assim, a ruptura do dielétrico. O instante de maior importância desse parâmetro é, normalmente, quando os contatos do disjuntor estão mais afastados entre si e as temperaturas no interior da câmara são menores.

A figura 1 ilustra um exemplo de envelope de capacidade dielétrica do disjuntor analisada em conjunto com a TRT. Nesta figura pode-se observar o momento de interrupção da corrente, com o simultâneo aparecimento da TRT (denominada em inglês como *TRV*, *Transient Recovery Voltage*). Neste caso, há, em um primeiro momento, superação do envelope de capacidade dielétrica do disjuntor. Após este instante, o sistema volta a conduzir, até a nova passagem pelo zero. Neste exemplo, a TRT superou a capacidade dielétrica do disjuntor em um primeiro momento. Caso a TRT do sistema ultrapassasse novamente a capacidade dielétrica, uma nova reignição iria aparecer.

Figura 1 - Exemplo de TRT com reinição

Fonte: O. Naef, 1965

Se a TRT superasse a capacidade dielétrica do disjuntor em intervalos sucessivos, o disjuntor iria falhar na tarefa de interromper a corrente do circuito, mesmo que não ocorresse superação da corrente de falha especificada. A maior amplitude da TRT normalmente aparece após 1.000 – 2.000 μ s. Este exemplo ilustra a importância do pico da TRT durante a especificação de um disjuntor.

É importante mencionar que a capacidade dielétrica irá variar de acordo com o disjuntor. A figura 2 ilustra exemplos de curvas da capacidade dielétrica para diferentes tipos de disjuntores.

Figura 2 - Características dielétricas para diferentes tipos de disjuntores

Fonte: Alves, Fernando, 2006

O segundo parâmetro importante a ser considerado para superação de disjuntores por TRT, é a sua taxa de crescimento, TCTRT. Esta é medida em $\text{kV}/\mu\text{s}$ e ocorre nos primeiros instantes de tempo, logo após a separação dos contatos do disjuntor, quando os contatos ainda estão muito próximos e as temperaturas internas são muito elevadas. Neste período é necessário que o resfriamento da câmara de extinção seja mais rápido do que o crescimento da TRT, para não permitir a ionização do meio de extinção, que provocaria a reignição térmica.

A figura 3 ilustra os períodos de ocorrência da TCTRT (fase térmica) e TRT (fase dielétrica), no processo de interrupção de corrente, através de uma representação gráfica que contém a corrente do sistema e sua tensão de restabelecimento.

Figura 3 - Fases de Interrupção de Corrente

Fonte: Alves, Fernando, 2006

A natureza da TRT será dependente do tipo de circuito que está sendo interrompido. Em muitos casos, a forma de onda da TRT será representada por uma resposta exponencial, oscilatória ou triangular.

Os temas da TRT e da TCTRT foram tratados nas normas IEEE e IEC a partir dos anos 60, [4, 5].

Estas normas são amplamente utilizadas até os dias de hoje, como exemplo, cabe comentar que as especificações de disjuntores feitas no Brasil tomam como referência a norma IEC. As figuras 4 e 5 mostram exemplos de superação e não superação de disjuntores, analisadas conforme a norma IEC.

Figura 4 – Exemplo de não superação TRT

Figura 5- Exemplo de superação TRT

Fonte: Alves, Fernando, 2006

Além das normas, diversos outros trabalhos tratam do cálculo da TRT e TCTRT, como será abordado na seção revisão da literatura.

Entretanto, o cálculo da TCTRT é normalmente efetuado utilizando-se impedâncias que não são claramente definidas, como realizado em [1], [4] e [5], sendo assim, existe uma lacuna referente a interpretação dessa impedância.

As referências encontradas na literatura que desenvolveram mais sobre esse tema, referências [6] e [7], possuem uma ferramenta que torna o equacionamento muito complexo, perdendo a interpretação do fenômeno físico. Outra referência, [9], também efetua uma interpretação da impedância, mas somente para o caso trifásico isolado.

O método de cálculo mais frequentemente adotado por profissionais no dia a dia emprega simulações no tempo por meio de programas de simulação, como o programa ATP, Alternative Transient Program, [8], e outros programas derivados do EMTP. . Existe uma preocupação com a confiabilidade da simulação, por isso algumas referências exploraram mais profundamente esse tema, como também será abordado na seção revisão da literatura.

1.1 OBJETIVO

Esta dissertação tem por objetivo complementar as informações existentes sobre TCTRT, apresentando o equacionamento da TCTRT por meio de expressões relativamente simples e precisas, não só para o curto trifásico isolado, mas também para os demais casos de curto na barra, clarificando os parâmetros envolvidos para cada um dos casos.

O processo de trabalho utilizado baseia-se na abertura do primeiro polo e no método de injeção de correntes. A obtenção destas equações auxilia a interpretação do fenômeno da TCTRT e também vai ao encontro das exigências da Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, de efetuar o cálculo da TRT e da TCTRT para os variados tipos de curto.

Usualmente o cálculo exato da TRT é feito computacionalmente no domínio do tempo, para levar em conta as reflexões de terminações. Porém, as fórmulas obtidas para a TCTRT neste trabalho são fundamentais não apenas para o entendimento do fenômeno, bem como atuam como uma linha auxiliar do cálculo computacional. Em casos de redes extensas e com imprecisões numéricas nem sempre é possível uma redução do passo de integração, por limitações computacionais. A seção resultados possuirá um exemplo dessa afirmação. Nestes casos, as equações obtidas nesta dissertação podem servir como ferramenta de suporte e verificação dos resultados de softwares de simulação, como o ATP ou o PSCAD, [8, 23].

Este trabalho efetua também o cálculo da TRT nos primeiros instantes de tempo tomando como base as expressões obtidas para o cálculo da TCTRT, incluindo o efeito da capacitância. Conhecendo os comprimentos das linhas e suas impedâncias é possível também incluir as reflexões, como demonstrado no apêndice A.

O equacionamento deste trabalho não considera o efeito do arco elétrico no cálculo da TRT, essa mesma simplificação é efetuada pelas normas e pelas principais referências sobre o tema, mencionadas nesta dissertação e é válida para essa análise pois a inclusão do arco elétrico reduziria o valor da TRT.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Existem vários trabalhos sobre a TRT, o que comprova a importância e atualidade do tema. Nesta seção são abordados diversos artigos e livros que estudaram a análise, cálculo e simulação da TRT, desde o início dos anos 60, com abordagens desde as mais clássicas e genéricas, até os dias atuais, com o enfoque em novas tecnologias e no aumento da complexidade das redes de transmissão. O fenômeno físico da TRT está atrelado ao processo de abertura de disjuntores.

Este dispositivo mecânico de manobra é capaz de estabelecer, consuzir e interromper nas condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir durante um tempo especificado e interromper correntes sob condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto circuito. Um disjuntor é determinado pela maneira que estingue os arcos elétricos em seus contatos, sendo os principais meios extintores óleo, vácuo, ar comprimido e gás (SF₆).

Os disjuntores à óleo são aqueles cujos contatos operam imersos em óleo isolante. Neste caso a extinção do arco é devida à decomposição do óleo, provocada pela alta temperatura do arco que a decompõe em gases, sendo o principal o hidrogênio.

A técnica de interrupção da corrente no vácuo consiste na separação de um contato móvel de um contato fixo, dentro de um recipiente de vácuo. O processo de interrupção é o mesmo dos outros disjuntores, extinguir a corrente na passagem pelo zero. Nos disjuntores à vácuo a ionização do dielétrico é caracterizada por um vapor metálico proveniente dos contatos.

O SF₆ é um gás extremamente estável e com rigidez dielétrica de cerca de 2,5 vezes a do ar. Essa relação aumenta com o aumento da pressão. A grande capacidade de transferência de calor e a baixa temperatura de ionização dão ao SF₆ excelentes propriedades de extinção para arcos elétricos.

Enquanto os disjuntores a ar comprimido usam o ar comprimido como meio de extinção. Nos disjuntores modernos, as câmaras de interrupção estão total e permanentemente epressurizadas. O sopro de ar inicia-se pela abertura das válvulas de sopro para a atmosfera provocando o fluxo do ar comprimido no interior das câmaras. O fluxo de ar na região entre os contatos resfria e alonga o arco elétrico. Nos disjuntores de sopro uma única direção, o fluxo de ar comprimido para a atmosfera se dá através do contato móvel.

É conveniente abordar o processo de abertura de disjuntores de forma introdutória para posteriormente partir para as referências que tratam especificamente do cálculo da TRT e de sua taxa de crescimento.

Esse processo pode ser dividido em quatro fases distintas: i) Contatos elétricos fechados (instante anterior ao curto); ii) Corrente de alta intensidade (período curto); iii) Corrente zero (separação mecânica e interrupção elétrica); e iv) Tensão de restabelecimento transitória (solicitação de tensão entre os contatos), [26].

Durante o momento em que os contatos elétricos do disjuntor estão fechados os fenômenos dominantes sobre este equipamento serão o efeito Joule, provocando o aquecimento deste e os esforços eletrodinâmicos nos contatos, momento em que o disjuntor deverá ser capaz de suportar a sua corrente de carga.

No instante em que o disjuntor passar por uma solicitação de curto-circuito, existirá uma solicitação adicional de aquecimento dos contatos, devido ao efeito Joule, o centelhamento nos contatos principais, em virtude da comutação da corrente de curto-circuito para os contatos de arco e os esforços eletrodinâmicos nos contatos. Imediatamente após a separação mecânica o disjuntor será solicitado a suportar termicamente a energia dissipada. Surgindo em suas câmaras de extinção altas temperaturas. De acordo com a referência [26], esta fase caracteriza-se por um acentuado resfriamento da coluna de arco; um rápido crescimento da resistência de arco à medida que a corrente se aproxima de zero; a interrupção da corrente de curto-circuito; e início da TRT.

A interrupção de corrente neste momento será predominantemente dependente do balanço de energia no arco, ou seja, caso o meio extintor retire mais energia do arco que a energia neste dissipada pela corrente de curto-circuito, a interrupção será bem-sucedida. Este fenômeno possui alta complexidade e existem diversas propostas de modelamento para o arco elétrico. A referência [9] classifica os modelos existentes em três famílias, a saber: modelos físicos, modelos *black box* e modelos definidos através de ensaios.

Os modelos físicos detalham o comportamento do plasma segundo as leis do equilíbrio térmico local, a conservação de massa e a quantidade de movimento e de energia na troca de calor por condução, convecção e radiação. Os modelos *black box*, como o apresentado em [26], pela equação (2.1), é válido para pequenas correntes, mas expressa razoavelmente o fenômeno físico quando tem as constantes bem

ajustadas por meio de ensaios. Finalmente, os modelos definidos através de ensaios que estabelecem diagramas e fórmulas que relacionam parâmetros de testes.

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

onde:

g : condutância instantânea ou dinâmica;

Φ : constante de tempo térmica do arco;

$u \cdot i$: potência dissipada através do arco;

P_0 : potência retirada do arco pelo meio extintor.

Após o início da TRT, a capacidade dielétrica do disjuntor inicia sua recuperação e, dependendo do dimensionamento do disjuntor, pode-se estabelecer uma competição entre a capacidade dielétrica e a solicitação de TRT imposta pela rede. Esta competição será basicamente definida pelo pico da TRT. Sendo assim, os disjuntores deverão ser dimensionados para que o seu meio isolante possua características dielétricas e térmicas suficientes para impedir a reignição devido à tensão de restabelecimento transitória e sua taxa de crescimento, objeto deste trabalho.

Conforme mencionado durante a introdução deste trabalho, as normas IEEE e IEC, referências [4] e [5], são as principais guias utilizadas por engenheiros no dimensionamento de equipamentos, quanto a superação por TRT, desde a década de 60 até hoje. A referência [1] é uma das bases para o desenvolvimento de ambas as normas e efetua o cálculo da TRT, nos primeiros instantes de tempo, e da TCTRT, utilizando a transformada de Laplace, para o caso monofásico e trifásico isolado. Os cálculos dessa referência iniciam-se usando o equivalente de redes monofásicas e trifásicas isoladas, separando o circuito em dois trechos: lado da fonte e lado da carga. A seção (Apêndice C) contém os equivalentes considerados e todos os equacionamentos realizados. Essa referência aproxima a corrente de curto-circuito por uma rampa e não define claramente a impedância Z considerada nos cálculos, chegando a seguinte equação da TRT para o caso monofásico (os parâmetros envolvidos nas equações encontram-se definidos no apêndice C):

$$E_s(s) = \frac{[\sqrt{2} I w]}{s C_1} \cdot \left[\frac{1}{s^2 + s \frac{1}{Z_t C_1} + \frac{1}{L_{s1} C_{1t}}} \right] \quad (2.2)$$

Realizando a transformada inversa de Laplace dessa equação, chega-se à expressão TRT nos primeiros instantes de tempo, para o caso monofásico.

$$E_s = E_c \left\{ 1 - e^{\frac{-T}{2Z_t C_1}} \left[\left(\frac{e^{\frac{\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}} - e^{\frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}}}{2\sqrt{\delta}} + \frac{e^{\frac{\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}} - e^{\frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}}}{2} \right) \right] \right\} \quad (2.3)$$

Posteriormente, a referência obtém o equacionamento da TCTRT.

$$R_{s0} = \frac{E_c Z_t}{L_{s1}} = \frac{K_c E_0 I Z_t}{I_s L_{s1}} = \sqrt{2} \omega I Z_t 10^{-6} KV/\mu s \quad (2.4)$$

Realizando o mesmo processo, a referência [1], obtém a expressão da TRT, nos primeiros instantes de tempo, para o caso trifásico isolado:

$$E_l = -\frac{E_c}{2} \left\{ 1 - \exp \frac{-T}{2Z_t K_2 C_1} \left[\left(\frac{\exp \frac{\sqrt{\delta} I}{2Z_t K_2 C_1} - \exp \frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t K_2 C_1}}{2\sqrt{\delta}} \right) + \left(\frac{\exp \frac{\sqrt{\delta} T}{2Z_t K_2 C_1} - \exp \frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t K_2 C_1}}{2} \right) \right] \right\} \quad (2.5)$$

E, o seguinte valor para a TCTRT:

$$R_{b0} = (1,5)(\sqrt{2} w I Z_t) 10^{-6} kV/\mu s \quad (2.6)$$

O equacionamento da TCTRT para o caso trifásico isolado, equação (2.6), é idêntico ao encontrado pela norma IEEE e pelas referências [9], [6] e [7], mas na norma IEE não é definido claramente o significado da impedância envolvida.

A norma IEEE demonstra o cálculo da TRT através de um exemplo que possui

características similares à maioria das redes de transmissão, representando um importante caso de estudo, de fácil entendimento e aplicação prática.

No cálculo realizado pela norma, alguns parâmetros são negligenciados, como o efeito de resistências, visto que estas tendem a reduzir o valor da TRT de 10% a 20% a cada reflexão de onda. O valor das indutâncias das barras, das capacitâncias de linha e a influência da proximidade a terra também são negligenciados pela norma, visto que estes parâmetros também tendem a reduzir a severidade da TRT. No entanto, esta demonstra como obter alguns dos parâmetros envolvidos no cálculo, como, por exemplo, capacitância do autotransformador; capacitância do transformador, capacitância da barra, indutância da fonte, equivalente da linha, tempo de reflexão. Estes parâmetros são inclusos em um circuito equivalente para a obtenção da TRT e TCTRT, chegando a mesma expressão (2.18).

Um importante tópico da TRT, abordado pela norma e não abordado pelas referências [9], [6] e [7], é a inclusão das reflexões. Esta inclusão é calculada, pela norma, a partir do caso exemplo e, devido à sua influência no pico da TRT, este equacionamento foi inserido no apêndice A deste trabalho.

A partir desse desenvolvimento, a norma apresenta uma envoltória da TRT para o caso do curto trifásico isolado encontra-se ilustrada pela figura 6.

Figura 6 - TRT Curto Trifásico Isolado

Fonte: IEEE Std C37.01-2005

Esta figura deve ser utilizada em conjunto com a curva de superação dielétrica do disjuntor. Caso a envoltória da TRT não supere a capacidade dielétrica do disjuntor, pode-se assegurar que o disjuntor possui capacidade de operar com a TRT calculada. Enquanto a norma IEEE se preocupa em definir a curva da TRT, o mesmo não ocorre com a norma IEC. As diferenças entre as duas normas são extensamente tratadas pela literatura, como na referência [10], pode-se dizer que enquanto a norma IEEE tenta definir a forma de onda da TRT, desenvolvendo para isso algumas expressões matemáticas, a norma IEC tenta definir através de 2 a 4 parâmetros uma envoltória da TRT. Desenvolvendo uma envoltória específica para os disjuntores acima de 72,5kV e outra específica para os disjuntores abaixo de 72,5kV.

A referência [1] define envoltórias muito similares às apresentadas pela norma IEC e, provavelmente, representa uma das bases do desenvolvimento desta. A figura 7 é retirada dessa referência.

Fonte: O. Naef, 1965

Por meio da figura 7 pode ser observada uma primeira região, entre 0-X-P2. Sendo P2 o pico da TRT, após a reflexão da primeira onda e o ponto X o ponto onde a reta, definida pela taxa de crescimento, chega até o valor de pico da TRT. Esta região provavelmente é a mesma definida pela curva de 2 parâmetros da norma IEC. Entretanto, esta região, conforme mencionado pela referência [1] pode ser muito restritiva, sendo assim, uma nova região pode ser estabelecida para os casos acima de 72,5kV, definida pelos pontos (0-P1-P2), da figura 7, sendo que o ponto P2 é definido pelo ponto de intersecção entre a reta definida pela taxa de crescimento e a tangente do comportamento exponencial que aparece no início da tensão de restabelecimento transitória.

Em face da importância do tema e da contribuição das normas, as mesmas foram estudadas por várias referências e seguem em atualizações constantes até os dias de hoje, como pode ser observado pela referência [12], onde é tratado o caso da TRT até 100 kV e a referência [14] que é uma revisão da guia de aplicação da norma IEEE, incorporando as curvas de 2-4 parâmetros da norma IEC.

Embora essas normas formem uma excelente referência para o entendimento da TRT e sejam extensamente utilizadas nos períodos atuais, possuem o objetivo de servir como guias e não de explicar física e matematicamente o fenômeno da TRT.

Sendo assim, não demonstram todos os parâmetros envolvidos no cálculo da TRT nem a aplicação para outros curtos além do trifásico isolado. Para isso é necessário buscar outras referências como [6], [7] e [9].

O trabalho efetuado pelas referências [6] e [7] apresenta o cálculo da TRT e da TCTRT para os demais tipos de curto, com abertura do primeiro polo e se vale da aplicação de componentes simétricas para a análise da TRT. Vale salientar que o tratamento clássico do cálculo do curto-circuito é basicamente consolidado em componentes simétricas, muito utilizadas nos programas comerciais como o ANAFAS, referência [22], apesar de existir ferramentas mais flexíveis em componentes de fase, como o programa ATP.

Entretanto, a aplicação de componentes simétricas para a resolução de TRT não é comum, pois este caso trata de duas falhas simultâneas, o curto em si e a abertura de fase. A análise de falhas simultâneas em redes elétricas é objeto de diversos tratamentos da literatura.

Em Anderson, referência [12] encontra-se o tratamento de componentes simétricas válido para falhas simultâneas e dirigido para o cálculo em regime permanente senoidal de redes equilibradas. Esta abordagem não é muito usual por exigir uma conexão dos diagramas de sequências relativamente complexa. As referências [13] e [14] exploram o cálculo do curto-circuito, desenvolvendo os modelos de equipamentos em componentes de fase, inclusive de máquinas rotativas como os geradores.

Com base nestes modelos propostos em [13] e [14] as referências [6] e [7] apresentam a análise de redes polifásicas desbalanceadas em componentes de fase. Na referência [6] são descritas expressões com matrizes de impedâncias e admitâncias de falhas e sua inserção no cálculo de falhas simultâneas em redes polifásicas, indicando as vantagens do domínio de fases sobre o domínio de componentes simétricas. Embora as referências [6] e [7] explorem basicamente a formulação para uma rede simples, composta por uma geração com transformador e linha de transmissão, na referência [7] é apresentada uma extensão para o caso de redes genéricas de dimensão $N \times N$, com a adição das matrizes de impedâncias de falhas.

Do ponto de vista da TRT em uma rede complexa, a possibilidade de se obter a expressão da TRT em uma forma fechada, como feito pela referência [7], é praticamente inexequível, dada a grande quantidade de polos existentes em sistemas

com várias linhas de transmissão, como é o caso geral. Além disso, essa referência não demonstra claramente como é inclusa a capacitância nos cálculos efetuados.

De certa forma, os programas de transitórios eletromagnéticos contemplam componentes que são interligados pela análise nodal, com sua montagem feita de forma mais flexível do que a da referência [7]. Estas ferramentas possibilitam, além da análise no domínio do tempo, o estudo dos transitórios no domínio da frequência e posterior retorno ao domínio do tempo caso haja interesse.

Uma maneira mais simplificada de abordar a TRT, e principalmente a TCTRT, do que a demonstrada pelas referências [6] e [7], é através do método de injeção de correntes, estudado pela referência [9] e tratado no apêndice B deste trabalho. Nesta referência é obtido um equivalente do circuito trifásico e aplicada a corrente de curto-circuito neste circuito equivalente, na primeira fase a abrir. Para o caso específico da TCTRT, que possui uma faixa de tempo de interesse muito curta, esta referência considera que a corrente de curto-circuito pode ser aproximada por uma rampa, facilitando os cálculos. Esta referência também se vale das componentes simétricas, para o circuito equivalente e, assim, determina os parâmetros envolvidos no caso do curto trifásico isolado. A grande vantagem desse método, para o aplicado nas referências [6] e [7], é a simplicidade e o entendimento físico do fenômeno, que acaba sendo um pouco prejudicado quando se utiliza as equações matriciais propostas por [6] e [7]. Entretanto, essa referência efetua o cálculo apenas para o caso trifásico isolado, sem incluir as reflexões.

Outra abordagem possível mas não comumente empregada para o cálculo da TRT é no domínio da frequência, cujos passos são: calcular a impedância vista pelos terminais do disjuntor, obter a tensão no domínio da frequência pelo produto da impedância pela corrente de falha e aplicar a transformada inversa de Fourier.

Os cálculos da TRT no domínio da frequência são abordados em estudos recentes, [15, 3]. A referência [15], avalia a TRT associada com falhas terminadas em transformadores para o correto dimensionamento de disjuntores. O método desta referência aplica a resposta em frequência para medir a impedância complexa do transformador. Desta impedância, o espectro de frequência da TRT é aproximado. Comparando vários sinais de TRT de testes de campo com os calculados por este método, mostram a sua eficiência.

Enquanto a referência [3] utiliza o equivalente no domínio da frequência para um circuito similar ao da norma IEEE. Nesta referência, o equivalente dependente da

frequência é obtido através de programas de simulação e uma vez conhecida a resposta em frequência são utilizadas operações matemáticas, por meio de transformadas de Fourier, para obter a forma de onda da TRT no domínio do tempo.

Todos os equacionamento da TRT e da TCTRT mencionado nesta seção são fundamentais para o entendimento físico e verificação da TRT. Entretanto, o método usual de análise continua sendo através de programas de simulação. Diversos artigos tratam do emprego de simulações computacionais e até de novas abordagens computacionais para garantir que a TRT seja corretamente entendida.

A referência [21], aborda a TRT a partir da função de transferência no espaço de estados. A impedância, vista a partir dos terminais do disjuntor, é dada como uma razão de dois determinantes, em frequências complexas, por meio da transformada de Laplace do sistema de equações diferenciais. As equações diferenciais fundamentais são obtidas a partir das matrizes de impedância, resistência e elastância, com um tensor de transformação, gerado pelo método computacional. Os polinômios característicos do numerador e denominador são facilmente fatorados utilizando os autovalores. Respostas transitórias da TRT são obtidas através da aplicação da transformação inversa da impedância e da corrente em frequências complexas, ou usando uma convolução. A frequência e as constantes de amortecimento da TRT são obtidos através dos autovalores dos polinômios característicos da impedância. Outras características da TRT, como TCTRT, são retiradas dos oscilogramas e das formas de onda. Esse método é simples e acurado quando usado em larga escala e com o uso de ferramentas computacionais. Sua aplicação é verificada por outra referência, [27], que realiza apordagem muito similar, porém com dados de campo de um circuito de 345 kV.

Como a simulação é o principal método utilizado para definir a TRT e a TCTRT de um sistema e considerando que, normalmente, as simulações exigem a utilização de circuitos complexos, a preocupação que a modelagem esteja correta é muito grande e por isso este tema é abordado em artigos recentes, como o [16], que permitem uma representação realista dos equipamentos das estações de energia, como geradores síncronos e transformadores elevadores. Usar circuitos complexos, no entanto, requer maior esforço de modelagem, fato que, muitas vezes, vai além da capacidade dos métodos de análise e, portanto, técnicas mais sofisticadas podem ser necessárias. O artigo da referência [16] trata especificamente de uma nova

ferramenta, que utiliza um algoritmo genético, para o cálculo dos parâmetros de circuitos equivalentes complexos.

Apesar do programa ATP ser mais largamente utilizado para o cálculo da TRT, algumas referências abordam este cálculo através de *softwares* de interface mais amigável, como o PSCAD. A referência [17], apresenta a simulação em PSCAD da TRT no disjuntor com o objetivo de investigar as características da TRT antes do durante a após a interrupção e a falha.

As referências abordadas até o momento tratam do entendimento, cálculo e simulação da TRT, com o foco no dimensionamento completo da rede. Entretanto, em uma rede existente, a abordagem para o dimensionamento e substituição de equipamentos pode tornar-se muito onerosa, por isso, diversas referências abordam o uso de limitadores da corrente de pico da TRT. Sendo muitas vezes mencionado o uso de limitadores de ZnO, como é feito no artigo [18]. Este artigo realiza estudos para avaliar a performance e o projeto de sistemas que possam reduzir os picos da TRT. A célula-base e sua estrutura são apresentados e modelados por programas de simulação ATP. O dispositivo é composto de varistores de ZnO e a sua característica não linear permite reduzir a magnitude da TRT durante a interrupção de falhas trifásicas não aterradas e quilométricas. Simulação são feitas com ATP. Aspectos importantes para o planejamento são discutidos para assegurar o diagnóstico correto da TRT e podem gerar redução de investimentos.

Outra referência que também trata deste tema é a [19], que resume os principais resultados para desenhar e avaliar dispositivos que reduzam a amplitude da TRT em circuitos de média tensão. Dispositivos de ZnO são modelados em programas de simulação, EMTP e são aplicados como alternativas para reduzir o valor de pico da TRT em sistemas de classe 15 kV e 72,5 kV. A avaliação da efetividade destes dispositivos para falhas quilométricas e trifásicas não aterradas é realizada com o propósito de gerar informação para testes e desenvolvimentos futuros. As condições de laboratório são reproduzidas digitalmente. Os casos mais severos permitem o uso de varistores ZnO disponíveis comercialmente. Os resultados obtidos nos estudos provam que os custos de substituição de equipamentos poderia ser reduzido com o uso desses limitadores.

Entretanto, o uso de limitadores pode ocasionar outros impactos no dimensionamento do circuito, a referência [20] tratam das influências de limitadores

nas demais características dos circuitos. Além disso, essa solução não afeta o valor da TCTRT, foco deste trabalho, atenuando apenas a corrente de pico.

3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO – CÁLCULOS DA TCTRT E DA TRT NOS PRIMEIROS INSTANTES DE TEMPO

Esta seção descreve o método proposto para o cálculo da TCTRT e as equações encontradas para cada um dos tipos de curto-circuito na barra, com a abertura do primeiro polo. Os circuitos utilizados, para o cálculo da TCTRT, desprezam as capacitâncias, que é uma simplificação também utilizada pela norma IEEE.

A metodologia deste trabalho, para o cálculo da TCTRT, é a mais geral possível, sendo apresentada para o caso de linhas com transposição. Após a obtenção dos equacionamentos da TCTRT, os cálculos do caso monofásico são expandidos para o cálculo da TRT nos primeiros instantes de tempo, com a inclusão da capacitância.

Este trabalho também efetua o cálculo através da matriz de admitância, como efetuado pelas referências [6] e [7]. Entretanto, ao invés de dimensionar uma matriz genérica que é alterada conforme o tipo de falha e aplicá-la em paralelo à impedância do sistema, gerando equacionamentos muito complexos, este trabalho efetua o cálculo da TCTRT usando as matrizes de admitâncias equivalentes do sistema e aplicando as condições de contorno de tensões e correntes neste sistema, no domínio do tempo, facilitando assim, o entendimento físico e simplificando muito os cálculos. Além disso, esse trabalho compara os resultados obtidos com programas de simulação, verificando os resultados encontrados. A seção resultados apresenta o uso dessa metodologia para dois circuitos.

3.1 CÁLCULO DA TCTRT

Com a simplificação de considerar apenas a impedância característica das linhas de transmissão, na representação da rede elétrica, os resultados deste item são obtidos no domínio do tempo. Desse modo, $[Z]$ representa a matriz de impedâncias características equivalente das linhas conectadas à barra em falha, desprezando o efeito de indutâncias e capacitâncias.

3.1.1 Curto Monofásico

A figura 8 considera uma falha monofásica terra na barra, após a abertura do primeiro pólo, na qual $[Z]$ representa a matriz de impedâncias características equivalente das linhas conectadas à barra em falta.

Figura 8 - Curto monofásico terra

Considerando uma corrente injetada entre 1 e 1', de valor correspondente à corrente de curto, mas com sentido contrário, denominada I_a , e utilizando as condições de contorno, pode-se escrever a seguinte matriz de impedâncias:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Desta maneira, é possível concluir que para o caso do curto monofásico, a seguinte equação para o cálculo da TRT é obtida, antes das reflexões:

$$V_1(t) = Z_{11} I_a(t) \quad (3.2)$$

Desta expressão, derivando, é obtido o valor da TCTRT:

$$TCTRT = k Z_{11} \quad (3.3)$$

onde k é definido como:

$$k = I_0 \omega \quad (3.4)$$

Sendo I_0 a amplitude (valor de pico) da corrente de curto-circuito e w a frequência angular. Essa expressão é válida ao considerar que nos primeiros instantes de tempo a corrente senoidal pode ser aproximada por uma rampa.

Considerando o caso mais comum da matriz, $[Z]$, com transposição, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$TCTRT = k Z_p \quad (3.6)$$

3.1.2 Curto Dupla Fase Terra

A figura 9 considera uma falha dupla fase terra na barra, após a abertura do primeiro pólo, na qual $[Z]$ representa a matriz de impedâncias características equivalente das linhas conectadas à barra em falha, desprezando o efeito da indutância.

Figura 9 - Curto dupla fase terra

Considerando, novamente, uma corrente injetada entre 1 e 1', de valor correspondente a corrente de curto, mas com sentido contrário, denominada I_a , e utilizando as condições de contorno, pode-se escrever a seguinte matriz de impedâncias:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ 0 \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

De onde se pode obter:

$$V_1(t) = Z_{11} I_a(t) + Z_{12} I_b(t) \quad (3.8)$$

$$0 = Z_{21} I_a(t) + Z_{22} I_b(t) \quad (3.9)$$

Combinando essas duas expressões, pode-se obter a expressão da TCTRT, visto que $V_{1'}(t) = 0$

$$V_{11'}(t) = \left[Z_{11} - \frac{Z_{12} \cdot Z_{21}}{Z_{22}} \right] I_a(t) \quad (3.10)$$

Desta maneira a TCTRT, para o caso do curto dupla fase terra, derivando a equação acima, será:

$$TCTRT = k \left[Z_{11} - \frac{Z_{12} Z_{21}}{Z_{22}} \right] \quad (3.11)$$

Sabendo que $Z_{12} = Z_{21}$, pode-se escrever:

$$TCTRT = k \left[Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}} \right] \quad (3.12)$$

Onde k foi definido anteriormente em (3.4) e será utilizado nas demais formulas da TCTRT. Considerando o caso mais comum da matriz, Z, com transposição, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ 0 \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$TCTRT = k \left[Z_p - \frac{Z_m^2}{Z_p} \right] \quad (3.14)$$

3.1.3 Curto Trifásico Terra

A figura 10 considera uma falha trifásica terra na barra, após a abertura do primeiro pólo, na qual $[Z]$ representa a matriz de impedâncias características equivalente das linhas conectadas à barra em falha, desprezando o efeito da indutância.

Figura 10 - Curto trifásico terra

Como as tensões V_2 e V_3 são iguais a zero. Este circuito pode ser representado pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

denominando,

$$Z_A = [Z_{12} \quad Z_{13}] \quad (3.16)$$

$$Z_B = \begin{bmatrix} Z_{21} \\ Z_{31} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$Z_C = \begin{bmatrix} Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$I_Z(t) = \begin{bmatrix} I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Utilizando (3.15), (3.16), (3.17) e (3.18) em (3.14), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_A \\ Z_B & Z_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_Z(t) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

desta maneira,

$$V_1(t) = Z_{11}I_a(t) + Z_A I_Z(t) \quad (3.21)$$

$$0 = Z_B I_a(t) + Z_C I_Z(t) \quad (3.22)$$

ou seja,

$$I_Z(t) = Z_C^{-1} Z_B I_a(t) \quad (3.23)$$

$$Z_C^{-1} = \frac{1}{Z_{22}Z_{33} - Z_{23}Z_{32}} \begin{bmatrix} Z_{33} & -Z_{23} \\ Z_{32} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Utilizando (3.22) em (3.21):

$$I_Z(t) = \frac{1}{Z_{22}Z_{33} - Z_{23}Z_{32}} \begin{bmatrix} Z_{33}Z_{21} - Z_{23}Z_{31} \\ -Z_{32}Z_{21} + Z_{22}Z_{31} \end{bmatrix} I_a(t) \quad (3.25)$$

Substituindo em (3.23) em (3.19):

$$V_1(t) = Z_{11}I_a(t) + \frac{1}{Z_{22}Z_{33} - Z_{23}Z_{32}} (Z_{33}Z_{21}Z_{12} - Z_{23}Z_{31}Z_{12} - Z_{32}Z_{21}Z_{13} + Z_{22}Z_{31}Z_{13}) I_a(t) \quad (3.26)$$

Sendo que a TCTRT será:

$$TCTRT = k \left[Z_{11} + \frac{1}{Z_{22}Z_{33} - Z_{23}Z_{32}} (Z_{33}Z_{21}Z_{12} - Z_{23}Z_{31}Z_{12} - Z_{32}Z_{21}Z_{13} + Z_{22}Z_{31}Z_{13}) \right] \quad (3.27)$$

Considerando o caso mais comum da matriz, Z, com transposição:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$TCTRT = k \left[Z_p + 2 \left[-\frac{Z_m^2}{Z_p + Z_m} \right] \right] \quad (3.29)$$

3.1.4 Curto Trifásico Isolado

A figura 11 considera uma falha trifásica isolada na barra, , após a abertura do primeiro pólo, na qual $[Z]$ representa a matriz de impedâncias características equivalente das linhas conectadas à barra em falha, desprezando o efeito da indutância.

Figura 11 - Curto trifásico isolado

Utilizando as condições de contorno, este circuito pode ser representado pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) - I_c(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Subtraindo a equação da linha 2, do sistema (3.28), com a equação da linha 3, do mesmo sistema:

$$0 = (Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32})I_a(t) + (Z_{23} - Z_{22} - Z_{33} + Z_{32})I_c(t) \quad (3.31)$$

Aplicando na equação da primeira linha, do sistema (3.28), para substituir $I_c(t)$

$$V_1(t) = \left[(Z_{11} - Z_{12}) - (Z_{13} - Z_{12}) \frac{(Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32})}{(Z_{23} - Z_{22} - Z_{33} + Z_{32})} \right] I_a(t) \quad (3.32)$$

Fazendo o mesmo processo com $V_{1'}(t)$, que equivale a $V_2(t)$, de acordo com a figura 11.

$$V_{1'}(t) = \left[(Z_{21} - Z_{22}) - (Z_{23} - Z_{22}) \frac{(Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32})}{(Z_{23} - Z_{22} - Z_{33} + Z_{32})} \right] I_a(t) \quad (3.33)$$

De onde obtém-se a TCTRT,

$$TCTRT = k \left[(Z_{11} - Z_{12}) - (Z_{13} - Z_{12}) \frac{(Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32})}{(Z_{23} - Z_{22} - Z_{33} + Z_{32})} \right] - \left[(Z_{21} - Z_{22}) - (Z_{23} - Z_{22}) \frac{(Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32})}{(Z_{23} - Z_{22} - Z_{33} + Z_{32})} \right] \quad (3.34)$$

Considerando o caso mais comum de linhas com transposição, o sistema acima será reescrito, conforme a seguir:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) - I_c(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Utilizando a primeira linha do sistema acima, é obtida a seguinte equação:

$$V_1(t) = Z_p I_a(t) + Z_m (-I_a(t) - I_c(t)) + Z_m I_c(t) \quad (3.36)$$

Dessa forma é possível obter a expressão que correlaciona V_1 e I_a :

$$V_1(t) = (Z_p - Z_m) I_a(t) \quad (3.37)$$

Pode-se escrever (3.37) em termos de sequência positiva:

$$V_1(t) = Z_1 I_a(t) \quad (3.38)$$

Entretanto, para se obter a expressão da TCTRT é necessário obter o valor da diferença de tensão entre os pontos 1 e 1' da figura 11. De maneira a obtê-la o

sistema acima será reescrito, considerando a equivalência, facilmente observada pela figura 11, $V_{1'} = V_2 = V_3$.

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_{1'}(t) \\ V_{1'}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) - I_c(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Somando as duas últimas equações deste sistema:

$$V_{1'}(t) = -0,5 (Z_p - Z_m) I_a(t) \quad (3.40)$$

Podendo ser reescrita através da impedância de sequência positiva, como:

$$\Delta V = 1,5 Z_1 I_a(t) \quad (3.41)$$

Ou seja, derivando a equação acima, a TCTRT, é equivalente a:

$$TCTRT = 1,5 Z_1 k \quad (3.42)$$

Este equacionamento é o mesmo obtido pela norma IEEE e pela referência [9], através do uso de componentes simétricas. A vantagem, assim como na referência [9], é caracterizar a impedância de sequência positiva, Z_1 .

3.1.5 Curto Dupla Fase Isolado

A figura 12 considera uma falha dupla fase isolada, após a abertura do primeiro pólo, na qual $[Z]$ representa a matriz de impedâncias características equivalente das linhas conectadas à barra em falha, desprezando o efeito da indutância.

Figura 12 - Curto dupla fase isolado

Como neste caso $I_b = -I_a$ e $I_c = 0$, este circuito pode ser representado pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Utilizando a primeira linha do sistema acima, é obtida a equação abaixo, que correlaciona V_1 e I_a :

$$V_1(t) = (Z_{11} - Z_{12}) I_a(t) \quad (3.44)$$

Entretanto, para a expressão da TCTRT é necessário obter o valor da diferença de tensão entre 1 e 1'.

De maneira a encontrar o valor de $V_{1'}$, o sistema acima será reescrito, considerando a equivalência entre V_2 e $V_{1'}$, ilustrada pela figura 12, onde $V_2 = V_{1'}$,

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_{1'}(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$V_{1'}(t) = (Z_{21} - Z_{22}) I_a(t) \quad (3.46)$$

De onde é obtida a equação:

$$\Delta V(t) = (Z_{11} - Z_{12} - Z_{21} + Z_{22}) I_a(t) \quad (3.47)$$

$$TCTRT = k(Z_{11} - Z_{12} - Z_{21} + Z_{22}) \quad (3.48)$$

Considerando a matriz com transposição, é possível escrever a equação que correlaciona V_a e I_a , como:

$$\Delta V(t) = 2 (Z_p - Z_m) I_a(t) \quad (3.49)$$

Podendo ser reescrita em função da impedância de sequência positiva, como:

$$\Delta V(t) = 2 Z_1 I_a(t) \quad (3.50)$$

Desta maneira, pode-se obter a equação da TCTRT para o caso do curto dupla fase isolado, derivando a equação acima:

$$TCTRT = 2 Z_1 k \quad (3.51)$$

3.1.6 Resumo Das Equações TCTRT

As equações encontradas para a TCTRT são ilustradas nas tabelas 1 e 2, abaixo. Nestas tabelas é possível observar que todos os casos poderiam ser representados por um circuito com uma impedância equivalente, multiplicado por k , sendo k descrito pela equação (3.4) considerando as matrizes com e sem transposição.

Tabela 1 - Equações TCTRT com transposição

Tipo de Falha	Expressão da TCTRT
Monofásica	$TCTRT = k Z_p$
Dupla fase terra	$TCTRT = k \left[Z_p - \frac{Z_m^2}{Z_p} \right]$
Trifásica Terra	$TCTRT = k \left[Z_p + 2 \cdot \left[-\frac{Z_m^2}{Z_p + Z_m} \right] \right]$
Trifásica Isolada	$TCTRT = 1,5 Z_1 k$
Dupla fase Isolada	$TCTRT = 2 Z_1 k$

Tabela 2 - Equações TCTRT sem transposição

Tipo de Falha	Expressão da TCTRT
Monofásica	$TCTRT = k Z_{11}$
Dupla fase terra	$TCTRT = k \left[Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}} \right]$
Trifásica Terra	$TCTRT = k \left[Z_{11} \right.$ $+ \frac{1}{Z_{22}Z_{33} - Z_{23}Z_{32}} (Z_{33}Z_{21}Z_{12}$ $- Z_{23}Z_{31}Z_{12} - Z_{32}Z_{21}Z_{13}$ $+ Z_{22}Z_{31}Z_{13}) \left. \right]$
Trifásica Isolada	$TCTRT = k \left[(Z_{11} - Z_{12}) - (Z_{13} \right.$ $- Z_{12}) \frac{(Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32})}{(Z_{23} - Z_{22} - Z_{33} + Z_{32})} \left. \right]$ $- \left[(Z_{21} - Z_{22}) - (Z_{23} \right.$ $- Z_{22}) \frac{(Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32})}{(Z_{23} - Z_{22} - Z_{33} + Z_{32})} \left. \right]$
Dupla fase Isolada	$TCTRT = k (Z_{11} - Z_{12} - Z_{21} + Z_{22})$

3.2 CÁLCULO DA TRT NOS PRIMEIROS INSTANTES DE TEMPO

Considerando as equações expostas na seção 3.1.6, antes de efetuar a derivada para obter a TCTRT, e aplicando a corrente de curto-circuito, como uma rampa, visto que de acordo com a referência [9], a corrente de curto-circuito poderia ser aproximada por uma rampa nos primeiros instantes de tempo. Pode-se obter a TRT, nos primeiros instantes de tempo, antes das reflexões, com a anti-transformada de Laplace das expressões da tabela 3.

Essas expressões consideram a inclusão das indutâncias e capacitâncias na matriz de impedâncias equivalente da barra, obtida agora no campo complexo e denominada por $[Z(s)]$.

Tabela 3 - Expressão da TRT nos primeiros instantes de tempo

Tipo de Falha	Expressão TRT
Monofásica	$TRT = V(s) = \frac{k}{s^2} Z_p(s)$
Dupla fase terra	$TRT = V(s) = \frac{k}{s^2} \left[Z_p(s) - \frac{Z_m(s)^2}{Z_p(s)} \right]$
Trifásica Terra	$TRT = V(s) = \frac{k}{s^2} \left[Z_p(s) + 2 \left[-\frac{Z_m(s)^2}{Z_p(s) + Z_m(s)} \right] \right]$
Trifásica Isolada	$TRT = V(s) = \frac{k}{s^2} 1,5 Z_1$
Dupla fase Isolada	$TRT = V(s) = \frac{2 k Z_1}{s^2}$

Combinando o uso das expressões da tabela 3 com o equivalente para obtenção da TRT da referência [3] e da referência [9] onde o circuito típico é aproximado por um circuito RLC paralelo. Ou seja, considerando as capacitâncias parasitas dos equipamentos, a indutância equivalente do transformador e da rede e a impedância característica das linhas de transmissão conectadas à barra em falha. Entretanto, desprezando o efeito das reflexões, pode-se obter a TRT para os primeiros instantes de tempo e, conseqüentemente, a TCTRT. De maneira a exemplificar essa aplicação, será efetuado o cálculo para todos os tipos de curto, utilizando a metodologia exposta acima e efetuando os mesmos cálculos utilizando o ATP, referência [8]. Esta comparação será apresentada na seção resultados.

O valor da impedância operacional (função de rede) do circuito RLC, a ser utilizado nessa seção será desenvolvido abaixo.

Para a sequência zero, sendo R_0 , L_0 e C parâmetros de sequência zero:

$$Z_0(s) = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{sL_0} + sC} \quad (3.52)$$

ou seja,

$$Z_0(s) = \frac{1}{C} \frac{s}{s^2 + \frac{1}{R_0 C_0} s + \frac{1}{L_0 C}} \quad (3.53)$$

e, analogamente, para a sequência positiva,

$$Z_1(s) = \frac{1}{C} \frac{s}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{1}{L_1 C_1}} \quad (3.54)$$

e,

$$R_0 = Z_{eq}(0) \quad (3.55)$$

$$R_1 = Z_{eq}(1) \quad (3.56)$$

sendo R_0 e R_1 os equivalentes das impedâncias características de todas as linhas de transmissão conectadas à barra em falha.

Além disso, serão consideradas as expressões de Z_p e Z_m , abaixo, de maneira a utilizar as equações da tabela 3.

$$Z_p(s) = \frac{Z_0(s) + 2 Z_1(s)}{3} \quad (3.57)$$

$$Z_m(s) = \frac{Z_0(s) - Z_1(s)}{3} \quad (3.58)$$

utilizando-se as expressões de Z_0 , Z_1 , Z_m e Z_p do circuito RLC desenvolvidas acima, valem todas as expressões da tabela 3 para o cálculo da TRT nos primeiros instantes de tempo.

Sendo assim, para o caso monofásico, tem-se a seguinte expressão, nos primeiros instantes de tempo:

$$V(s) = \frac{k}{s^2} Z_p(s) \quad (3.59)$$

$$V(s) = \frac{k}{s^2} \left(\frac{Z_0(s) + 2 Z_1(s)}{3} \right) \quad (3.60)$$

$$V(s) = \frac{k}{3 s^2 C} \left[\frac{s}{s^2 + \frac{1}{R_0 C} s + \frac{1}{L_0 C}} \right] + 2 \left[\frac{s}{s^2 + \frac{1}{R_1 C} s + \frac{1}{L_1 C}} \right] \quad (11)$$

sabendo que,

$$L\{f_1(t) + f_2(t)\} = L\{f_1(t)\} + L\{f_2(t)\} \quad (3.62)$$

$$V(s) = A(s) + B(s) \quad (3.63)$$

sendo,

$$A(s) = \frac{k}{3 s C} \left[\frac{1}{s^2 + \frac{1}{R_0 C} s + \frac{1}{L_0 C}} \right] \quad (3.64)$$

$$B(s) = \frac{2 k}{3 s C} \left[\frac{s}{s^2 + \frac{1}{R_1 C} s + \frac{1}{L_1 C}} \right] \quad (3.65)$$

Para antitransformar, obtém-se os polos da função racional de A(s), $s_{1,2,3}$, e B(s),

$s_{4,5,6}$.

$$s_{1,4} = 0 \quad (3.66)$$

$$s_{2,3} = -\frac{1}{2 R_0 C} \mp \sqrt{\left(\frac{1}{2 R_0 C}\right)^2 - \frac{1}{L_0 C}} \quad (3.67)$$

$$s_{4,5} = -\frac{1}{2 R_1 C} \mp \sqrt{\left(\frac{1}{2 R_1 C}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C}} \quad (3.68)$$

Para o caso da resposta oscilatória (subamortecida):

$$\left(\frac{1}{2R_{0,1}C}\right)^2 < \frac{1}{L_{0,1}C} \quad (3.69)$$

chamando:

$$a_{0,1} = -\frac{1}{2R_{0,1}C} \quad (3.70)$$

$$w_{0,1} = \sqrt{-\left(\frac{1}{2R_{0,1}C}\right)^2 + \frac{1}{L_{0,1}C}} \quad (3.71)$$

obtem-se:

$$v(t) = \frac{kL}{3} \left[\left[1 - e^{a_0 t} \left(\cos(\omega_0 t) - \frac{a_0}{w_0} \sin(\omega_0 t) \right) \right] + 2 \left[1 - e^{a_1 t} \left(\cos(\omega_1 t) - \frac{a_1}{w_1} \sin(\omega_1 t) \right) \right] \right] \quad (3.72)$$

Analisando também o caso amortecido, caso mais comum:

$$\left(\frac{1}{2R_{0,1}C}\right)^2 > \frac{1}{L_{0,1}C} \quad (3.73)$$

chamando:

$$a_{0,1} = -\frac{1}{2R_{0,1}C} \quad (3.74)$$

$$b_{0,1} = \sqrt{\left(\frac{1}{2R_{0,1}C}\right)^2 - \frac{1}{L_{0,1}C}} \quad (3.75)$$

$$v(t) = \frac{k.L}{3} \left[\left[1 - e^{a_0 t} \left(\cosh(b_0 t) - \frac{a_0}{b} \sinh(b_0 t) \right) \right] \right. \\ \left. + 2 \left[1 - e^{a_1 t} \left(\cosh(b_1 t) - \frac{a_1}{b_1} \sinh(b_1 t) \right) \right] \right] \quad (3.76)$$

Sendo que idêntico cálculo pode ser realizado para os demais tipos de curto, obtendo-se, assim, uma expressão literal da TRT para os primeiros instantes de tempo, com menção clara de todos os parâmetros envolvidos.

Na seção resultados serão demonstrados os casos que exemplificam esse desenvolvimento e comparam os resultados obtidos com o modelo do ATP para um circuito simplificado, [10].

4 RESULTADOS

Os resultados apresentados foram obtidos utilizando duas redes para o cálculo da TCTRT. Uma delas, bem simples, permite uma redução sensível do passo de integração e, desse modo, tem a finalidade de comprovar a exatidão das expressões obtidas. Esta rede também foi utilizada para o cálculo da TRT, nos primeiros instantes de tempo, incluindo a capacitância, conforme o desenvolvimento da seção 3.

A outra rede representa um caso de maior porte, em uma situação típica, na qual não é possível uma redução acentuada do passo de integração. Os resultados obtidos através da aplicação das equações foram comparados com os resultados obtidos no ATP, referência [8], para o caso da TCTRT.

4.1 RESULTADOS EM UMA REDE SIMPLIFICADA

A rede simplificada utilizada possui apenas duas barras e cinco linhas conectadas entre as barras, a figura 13 representa o circuito utilizado no ATP.

Figura 13 - Circuito simplificado

Para este caso será demonstrado que o maior desvio encontrado para o cálculo da TCTRT, no caso da rede simplificada, foi aproximadamente 0,3%, utilizando-se um passo de integração de 10^{-8} s no ATP. Este mesmo caso foi estudado com um passo de integração de 10^{-6} s, onde o desvio encontrado foi de 4.78%, indicando que para alguns circuitos é necessário reduzir sensivelmente o passo de integração para se

obter uma boa precisão no cálculo da TCRT. Apesar de não ser o objetivo dessa dissertação, esse mesmo caso foi estudado utilizando um outro programa de simulação, PSCAD, que apresentou menor desvio do que o ATP, conforme apresentado no apêndice E.

Neste circuito os geradores são representados por equivalentes, cujos parâmetros são apresentados pelas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Gerador 1 circuito simplificado

Dado	Unidade	Valor
Amplitude	Volts	497000
R_0	Ω/m	8,67
L_0	Ω/m	47,24
R_1	Ω/m	1,63
L_1	Ω/m	19,05
f	Hz	60

Tabela 5 - Gerador 2 circuito simplificado

Dado	Unidade	Valor
Amplitude	Volts	497000
R_0	Ω/m	0
L_0	Ω/m	3,957
R_1	Ω/m	0
L_1	Ω/m	8,6934
F	Hz	60

Existem cinco linhas de transmissão, com os mesmos parâmetros, ligadas em paralelo. A tabela 7 representa os parâmetros dessas linhas de transmissão.

Tabela 6 - Linha de transmissão do circuito simplificado

Dado	Unidade	Valor
R_1	Ω/m	0,0176
R_0	Ω/m	0,225
L_1	Ω/m	0,308
L_0	Ω/m	0,891
C_1	S/m	5,297
C_0	S/m	2,996

A partir destes dados, a matriz $[Z]$, impedância característica, de cada uma das linhas de transmissão, será:

$$[Z] = \begin{bmatrix} 342,5 & 101,4 & 101,4 \\ 101,4 & 342,5 & 101,4 \\ 101,4 & 101,4 & 342,5 \end{bmatrix} \Omega$$

Entretanto, existem cinco linhas em paralelo, com os mesmos parâmetros, sendo assim, o equivalente, $Z' = \frac{Z}{5}$ deverá ser utilizado nos cálculos simplificados. Realizando os cálculos com as equações obtidas no capítulo 3 e os valores do circuito simplificado descrito acima, obtêm-se os valores de TCTRT listados na tabela 7:

Tabela 7 - Resultados do circuito simplificado

Tipo de Falha	Equações	ATP	Desvio
Monofásica	2,439kV/μs	2,4365 kV/μs	0,137%
Dupla fase terra	2,11989kV/μs	2,11581kV/μs	0,193%
Trifásico Terra	1,83248kV/μs	1,83032KV/μs	0,118%
Trifásica Isolada	2,2375kV/μs	2,2338kV/μs	0,169%
Dupla fase Isolada	2,5837kV/μs	2,5745kV/μs	0,357%

Os gráficos abaixo ilustram os resultados encontrados no ATP, para o circuito simplificado, sem a capacitância, considerando cada um dos tipos de falha.

Figura 14 - Circuito simplificado, curto monofásico

Figura 15 - Circuito simplificado, curto dupla fase terra

Figura 16 - Circuito simplificado, curto trifásico terra

Figura 17 - Circuito simplificado, curto dupla fase isolado

Figura 18 - Circuito simplificado, curto trifásico isolado

Este mesmo circuito simplificado, da figura 13, foi utilizado para o cálculo da TRT nos primeiros instantes de tempo, incluindo uma capacitância de 120 nF, conforme ilustrado pela figura 19.

Figura 19 - Circuito simplificado com capacitância

Considerando este caso, os valores de R_0 , R_1 , C , L_0 e L_1 a serem utilizados serão respectivamente: $109,6 \Omega$ (equivalente de 5 linhas), $48,22\Omega$ (equivalente de 5 linhas), 100nF , $0,12\text{H}$ e $0,05\text{H}$. Além das equações da seção 3 para cada um dos diferentes tipos de curto.

A verificação dos resultados obtidos com os cálculos (equações) foi efetuada comparando os valores com os resultados extraídos do ATP através do arquivo lis. Os resultados encontrados no ATP, com a inclusão da capacitância, são ilustrados pelas figuras e pelas tabelas a seguir. As figuras 20, 21, 22, 23 e 24 mostram a taxa de crescimento da TRT, sendo possível observar o comportamento similar ao de uma reta mencionado pelas referências e encontrado como resultado das equações desenvolvidas.

Figura 20 - Gráfico ATP Monofásico TRT

Figura 21 - Gráfico ATP dupla fase terra TRT

Figura 22 - Gráfico ATP trifásico terra TRT

Figura 23 - Gráfico ATP dupla fase isolado TRT

Figura 24 - Gráfico ATP trifásico isolado TRT

Deve ser levado em consideração, ao comparar os resultados do arquivo .lis, ATP, a precisão e qual o instante inicial real de abertura da chave do ATP, pois o cálculo realizado a partir das expressões obtidas na tabela 3, considera o instante inicial o instante de abertura da chave.

Os gráficos a seguir ilustram os valores encontrados no ATP simultaneamente com os valores encontrados com as equações, o maior desvio encontrado esteve na faixa de 3%-5%, no primeiro instante de tempo e, posteriormente, na faixa de 0.5%. As tabelas do apêndice D contêm o desvio encontrado para cada um dos valores de tempo calculados. O desvio é maior no primeiro instante de tempo, pois no ATP existe

um desvio numérico de abertura devido ao fato de os cálculos do ATP serem realizados discretamente e, depois, interpolados. As figuras 25, 26, 27, 28 e 29 ilustram os resultados do ATP e calculados, sendo possível observar que os resultados encontrados possuem valores com um desvio muito baixo e seguem o mesmo perfil de curva.

Figura 25 - RLC Monofásico

Figura 26 - RLC Dupla fase terra

Figura 27 - RLC Trifásico terra

Figura 28 - RLC Dupla fase isolado

Figura 29 - RCL Trifásico isolado

4.2 RESULTADOS EM UMA REDE DE MAIOR PORTE

Para o caso da rede de maior porte, obteve-se um desvio na TCTRT de 1%, utilizando o menor passo de integração permitido pelo ATP para este circuito, 10^{-6} s. Este menor passo permitido ocorre por limitações na representação de redes com linhas de transmissão longas. Neste caso, as falhas foram analisadas na barra C, do circuito da figura 30.

Figura 30 – Rede de maior porte

Neste circuito, as linhas de transmissão da barra em falha possuem os parâmetros identificados a seguir.

Tabela 8 - Linha de transmissão circuito típico

Dado	Unidade	Valor
R ₁	Ω/m	0,0325
R ₀	Ω/m	0,5057
L ₁	Ω/m	0,3991
L ₀	Ω/m	1,6328
C ₁	S/m	6,8822
C ₀	S/m	3,6335

A partir destes dados, a matriz [Z], impedâncias características, de cada uma das linhas de transmissão, será:

$$[Z] = \begin{bmatrix} 384 & 143,2 & 143,2 \\ 143,2 & 384 & 143,2 \\ 143,2 & 143,2 & 384 \end{bmatrix} \Omega$$

Entretanto, existem duas linhas em paralelo no ponto C, em falha, com os mesmos parâmetros, sendo assim, o equivalente, $Z' = \frac{Z}{2}$ deverá ser utilizado nos cálculos simplificados. Os gráficos a seguir demonstram os resultados encontrados no ATP para cada um dos tipos de falha.

Figura 31 – Rede de maior porte, curto monofásico

Figura 32 – Rede de maior porte, curto dupla fase terra

Figura 33 – Rede de maior porte, curto trifásico terra

Figura 34 - Rede de maior porte, curto dupla fase isolado

A tabela 9 ilustra os valores encontrados da TCTRT para os diferentes tipos de curto, considerando o software de simulação, ATP, e o uso das equações para o caso da figura 30.

Tabela 9 - Resultados circuito típico

Tipo de Falha	Equações	ATP	Desvio
Monofásica	1,142kV/μs	1,155 kV/μs	1,071%
Dupla fase terra	1,205kV/μs	1,214 kV/μs	0,694%
Trifásico terra	1,176kV/μs	1,1834 KV/μs	0,614%
Trifásica isolada	1,387kV/μs	1,3929kV/μs	0,3977%
Dupla fase isolada	1,602kV/μs	1,608 kV/μs	0,3957%

É interessante observar que nos processamentos efetuados com o passo de integração reduzido ao valor mínimo possível para a rede da figura 30 existe uma boa aderência entre os resultados obtidos tanto com o programa ATP quanto com as fórmulas apresentadas, com desvio em cerca de 1%. No entanto, podem ocorrer situações em que haja necessidade de se reduzir ainda mais o valor do passo para melhorar a precisão do cálculo da TCTRT, nas quais seria conveniente um recurso adicional para uma análise mais detalhada da rede, principalmente nos casos em limites permissíveis de norma.

Conforme mencionado nesta seção, apesar de não ser o escopo deste trabalho, o apêndice E faz a comparação da precisão obtida com outro software de

simulação, o PSCAD, para o exemplo do circuito simplificado e o curto monofásico.

Outro fato a destacar, possível de ser observado neste exemplo, é que a falha trifásica isolada na barra pode não ser o pior caso, reforçando a necessidade, solicitada pela ANEEL, de efetuar o cálculo para os diferentes tipos de falha.

5 CONCLUSÕES

Foi abordado neste trabalho o cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TCTRT) e o cálculo da tensão de restabelecimento transitória (TRT) nos primeiros instantes após a extinção da corrente no disjuntor.

O cálculo da TCTRT e da TRT em estudos para o sistema elétrico, é usualmente feito por meio de simulações em programas de transitórios eletromagnéticos, que contêm rotinas específicas para a extração dos valores destas variáveis, porém, em determinadas condições, podem ocorrer oscilações ou imprecisões numéricas.

Como os disjuntores não são dimensionados apenas para a corrente de curto circuito, mas também para a TRT, considerando a sua tensão de pico e a sua taxa de crescimento, e por se tratar de um assunto de grande interesse, foram desenvolvidas expressões com o objetivo de se obterem resultados precisos, sem a necessidade de artifícios de redução do passo de integração das simulações a valores muitas vezes não factíveis. Como parte desse estudo é possível concluir que as expressões desenvolvidas neste trabalho levam a resultados relativamente mais precisos do que aqueles obtidos em simulações, principalmente considerando os casos onde o programa utilizado não permite uma redução significativa do passo de integração para um sistema mais complexo.

Desse modo, este trabalho contribui com expressões que abordam não somente a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória de um circuito real, mas também a própria TRT, nos primeiros instantes de tempo. Esses cálculos são fundamentais para avaliar a superação por capacidade dielétrica e térmica do disjuntor.

Uma outra contribuição desse trabalho é esclarecer os parâmetros envolvidos no cálculo da TCTRT, para os diferentes tipos de curto, visto que as principais referências que tratam o assunto não definem claramente as impedâncias envolvidas nos circuitos equivalentes.

Este equacionamento, com algumas modificações, possibilita o cálculo preciso da TRT, incluindo as reflexões, bastando para isso que as operações sejam feitas com as impedâncias das linhas e demais componentes da subestação tratados como funções de rede. Outra continuação possível deste trabalho é o estudo da abertura

dos demais pólos.

Sendo assim, o equacionamento apresentado neste trabalho é de grande valia para o cálculo da TCTRT e da TRT, contribuindo para o arsenal de ferramentas utilizadas no estudo transitório de sistemas elétricos de potência.

REFERÊNCIAS

NAEF, O.; ZIMMERMAN, C. P.; BEEHLER, J. E. **Proposed Transient Recovery Voltages**, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 94, n. 7, p. 580-608, 1965. [1]

ALVES, F. R. **Características do disjuntor para abertura de linha em vazio: metodologia de estudo**. 2006. 159 fs. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2006. [2]

SINDER, D. **Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão**. 2007. 123 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. [3]

IEEE Std C37.011-2005 [1], **IEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on Symmetrical Current Basis**. PROCEEDINGS OF THE IEEE, IEEE, 2005. [4]

IEC 56-1987. **High Voltage Alternating Current Circuit Breakers**. Geneve: IEC, 1987. [5]

DASH, P. K. **Analysis of Power System Faults By Phase Impedance Matrix Method I: General Fault Analysis**, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 592-600, 1972 [6]

DASH, P. K. **Analysis of Power System Faults By Phase Impedance Matrix Method II: Simultaneous Unbalances and Transient Analysis**, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 601-610, 1972 [7]

ATP: Alternative Transients Program. **Rule Book**. Leuven, Belgium: Leuven EMTP Center, 1987. [8]

ZANETTA JUNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: Edusp, 2003. [9]

WAGNER, C. L.; SMITH, H. M. **Power Cuircuit Breaker Transient Recovery Voltages**. **IEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 103, n.11, p. 3.354-3.364, 1984. [10]

DUFOURNET, D.; MONTILLET, G. F. **Harmonization of TRVs in ANSI/ IEEE and IEC Standards for High-voltage Circuit Breakers Rated Less than 100 kV**. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. [11].

ANDERSON, P. M. **Analysis of Faulted Power Systems**. IEEE Press Power Systems Engineering Series, 1995. [12]

LAUGHTON, M. A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase-coordinates, part I - system representation in phase frame of reference. **Proc. IEE**, v. 115, n. 8, p. 1163-1172, 1968. [13]

LAUGHTON, M. A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase-coordinates, part II – Fault Analysis. **Proc. IEE**, v. 115, n. 8, p.857-865, 1968, [14]

STEURER, M.; HRIBERNIK, W.; BRUNKE, J. H. Calculating the Transient Recovery Voltage Associated with Clearing Transformer Determined Faults by Means of Frequency Response analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v 19, n.1, pp 168-173, 2004. [15]

MARMOLEJO, A.; FRAIOLI, P.; PALAZZO, M. **Calculation of Complex Models for Accurate Representation of Power Station Equipment: Novel Tool for TRV Application.** EUROCON, IEEE, 2015. [16]

HALIM, H. A.; NOORPI, N. S.; MUKHTAR, N. M.; AMIRRUDDIN, M. **Simulation Study of the Transient Recovery Voltage (TRV) on Circuit Breaker.** IEEE Conference Publications, pp 300-305, 2013. [17]

AZEVEDO, W. V. S.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES JR, D.; SOARES, R. M. **Design and Performance of a ZnO Device to Reduce Transient Recovery Voltage Peaks.** The 8th International Symposium and Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest Romania, IEEE, 2013. [18]

AZEVEDO, W. V. S.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES JR, D.; SOARES, R. M. **Device to Limit Transient Recovery Voltage** IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2010. [19]

DESROSIERS, P. A.; CALIXTE, E.; PIERRE, L. M. **Expression of Rate of Rise of Recovery Voltage across a Circuit Breaker with Fault Current Limiter in Bus-Tie Location.** Power Symposion, NAPS'07 39th Noth American, IEEE, 2007. [20]

SATO, H. **A Digital Method for Determining Inherent Transient Recovery Voltages in Power Systems** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-87(8), 1968. [21]

CEPEL. Anafas - Análise de Faltas Simultâneas. Cepel, 2008. [22]

PSCAD, Manitoba, HVDC Research Center, 1981 [23]

BARROS, H.M.; SOARES C.F.T., DOMINGUES DE JESUS, F. **Integração entre os programas ATP e MATLAB/SIMULINK em tempo de execução aplicável a**

estudos de transitórios eletromagnéticos devido à manobra de equipamentos.
SNPTEE – Seminário Nacional de Transmissão de energia elétrica, 2007. [24]

AISSA, S.; ABDELHAFID, H.; SLAMI S. **Programming EMTP-ATP-PSCAD Softwares Functions using MATLAB for Poer System Transient Analysis,** Nuclear Research Center Birne-Algeria, 2010. [25]

CARVALHO, A.C.; PUENTE, A.P.; FUCHS, A., **Disjuntores e Chaves: Aplicações em Sistemas de Potência,** Comitê de Estudos 13 da CIGRE Brasil, ISBN 85-228-0165-7, EDUFF Publisher, Niterói, Brasil, 1995. [26]

COLCLASER Jr, R.G.; BEEHLER, J.E.; GARRITY, T.F.; **A Field Study of Bus-Fault Transient Recovery Voltage,** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-95, 1976 [27]

APÊNDICE A – CÁLCULO DAS REFLEXÕES NORMA IEEE

Apresentando posteriormente a envoltória da curva da TRT. Os próximos parágrafos irão explorar a inclusão da reflexão para a linha de 10 milhas.

O tempo de reflexão da onda pode ser calculado pela seguinte equação:

$$T_s = 10,7M\sqrt{uk} \text{ (}\mu\text{s)} \quad (\text{A.1})$$

Onde,

M = milhas;

u = permeabilidade

k = constante dielétrica

Sendo assim, para linhas aéreas $\sqrt{uk} = 1,0$

As reflexões das terminações de linha, presentes na subestação, após o tempo de trânsito correspondente irão retornar aos terminais do disjuntor, alterando a TRT.

Figura 36 - Propagação de ondas

Fonte: IEC 56-1987.

A figura 36 representa a propagação de ondas em uma descontinuidade, onde o coeficiente de transmissão será:

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} e \quad (\text{A.2})$$

e, o coeficiente de reflexão:

$$e_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} e \quad (\text{A.3})$$

Utilizando a formulação 12, a primeira reflexão deste caso irá ocorrer em 107

μs . Ao se observar que linha de 10 milhas termina em um transformador, este pode ser considerado como um circuito aberto nos primeiros instantes de tempo e como um curto para um longo instante de tempo. Desta maneira, a primeira onda refletida será idêntica a onda inicial e irá se somar a onda inicialmente transmitida.

A porção da onda refletida que será transmitida pelo barramento e dividida entre as duas linhas restantes (negligenciando o efeito da capacitância e da indutância) será:

$$e_t = \frac{Z}{Z + Z/2} e_i \quad (\text{A.4})$$

ou seja,

$$e_t = \frac{2}{3} e_i \quad (\text{A.5})$$

E, a segunda reflexão, retornando na linha em 214 μs , será:

$$e_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} e_i \quad (\text{A.6})$$

ou seja,

$$e_r = -\frac{1}{3} e_i \quad (\text{A.7})$$

Sendo assim, a segunda reflexão irá reduzir o valor da TRT.

APÊNDICE B – MÉTODO DE INJEÇÃO DE CORRENTES E PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

O método de injeção de correntes considera dois principais períodos:

- i) Período da falha, onde existe uma corrente senoidal, resultado da tensão senoidal aplicada no sistema.
- ii) Instante de abertura do disjuntor, que ocorre quando a corrente passa pelo zero, interrompendo a corrente entre os terminais do disjuntor.

Este método estabelece que o mesmo efeito da abertura da chave, corrente anulada, ocorreria se no instante zero fosse aplicada uma corrente $-i(t)$ no sistema mantendo a magnitude e invertendo o sinal. Conforme ilustrado pela figura 37.

Figura 37 - Cancelamento de corrente

Fonte: Zanetta Junior, L. C , 2003.

A figura 38 mostra a corrente de curto que circula pelos polos do disjuntor no momento do curto-circuito, entre os pontos 1 e 2, antes da abertura do disjuntor.

Figura 38 - Curto com gerador de corrente

Fonte: Zanetta Junior, L. C , 2003.

Enquanto a figura 39 demonstra o instante quando ocorre a abertura do

disjuntor, isto corresponderia à injeção de uma corrente de sinal contrário, anulando a corrente de curto-circuito no momento da figura 38.

Figura 39 - Simulação da abertura do curto

Fonte: Zanetta Junior, L. C , 2003.

Assim, pode-se concluir que o instante de abertura da chave corresponde à introdução de um gerador - $i(t)$, cancelando a corrente anterior, do período do curto.

A fim de facilitar os cálculos, o método de injeção de correntes efetua o cálculo considerando a soma de dois circuitos, em duas etapas (método da superposição):

1. Circuito anterior ao curto, com as fontes de tensão de alimentação e a corrente de curto entre os terminais do disjuntor;
2. Circuito posterior ao curto, no momento de abertura do disjuntor, com as fontes de tensão, alimentação, curto-circuitadas e a injeção de uma fonte de corrente entre os polos do disjuntor, com mesma amplitude e sinal contrário à corrente de curto.

APÊNDICE C - CÁLCULO DA TRT NOS PRIMEIROS INSTANTES DE TEMPO INCLUINDO A CAPACITÂNCIA

A referência [1] efetua o cálculo da TRT nos primeiros instantes de tempo, utilizando transformada de Laplace, para os casos monofásico e trifásico isolado, através de equivalentes. Esta referência é utilizada como base da norma ANSI. As figuras 40, 41 e 42 representam o caso monofásico, tema do cálculo da TRT nos primeiros instantes de tempo, na referência [1].

Figura 40 - Caso monofásico

Fonte: O. Naef, 1965

Figura 41 - Equivalente caso monofásico

Fonte: O. Naef, 1965

Figura 42 - Equivalente caso monofásico, transitório

Fonte: O. Naef, 1965

Estas figuras são os circuitos utilizados pela referência [1] para calcular a ITRT e a TCTRT, uma mesma abordagem foi desenvolvida por este trabalho, entretanto,

utilizando como base os parâmetros encontrados para a TCTRT. A tensão instantânea de restabelecimento (E_b) é o valor da tensão, entre os terminais do disjuntor, quando a corrente de igual valor à corrente de curto, porém, um sinal invertido, é imposta a rede. Todas as fontes de correntes e tensões são indicadas pelas suas impedâncias internas.

Assim como nas sessões anteriores, neste desenvolvimento será considerado que como a TRT ocorre em um período muito pequeno de tempo, a corrente de curto-circuito é praticamente uma reta e, por isso, a seguinte simplificação pode ser utilizada:

$$i = \sqrt{2} I \omega T \quad (C.1)$$

ao invés de,

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega T) \quad (C.2)$$

usando Laplace,

$$L\{E_s\} = L\{I\} L\{Z\} \quad (C.3)$$

$$E_s(S) = I(S) Z(s) \quad (C.4)$$

No instante $T = 0$, não existe energia armazenada nas indutâncias, o arco através das capacitâncias é negligenciado:

$$E_s(s) = \frac{[\sqrt{2} I \omega]}{s^2} \left[\frac{1}{sC_1 + \frac{1}{sL_{s1}} + \frac{1}{Z_t}} \right] \quad (C.5)$$

$$E_s(s) = \frac{[\sqrt{2} I \omega]}{sC_1} \left[\frac{1}{s^2 + s \frac{1}{Z_t C_1} + \frac{1}{L_{s1} C_{1t}}} \right] \quad (C.6)$$

Ou, considerando no domínio do tempo:

$$E_s = E_c \cdot \left\{ 1 - e^{\frac{-T}{2Z_t C_1}} \cdot \left[\left(\frac{e^{\frac{\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}} - e^{\frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}}}{2\sqrt{\delta}} + \frac{e^{\frac{\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}} - e^{\frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t C_1}}}{2} \right) \right] \right\} \quad (C.7)$$

onde:

$$\sqrt{\delta} = \sqrt{1 - 4Z_t^2 C_1 / L_{s1}} \quad (C.8)$$

T, tempo antes das reflexões

$$E_c = \sqrt{2} I \omega L_{s1} \quad (C.9)$$

Da figura 41, pode-se observar que:

$$L_{s1} = k_v E_0 / \sqrt{2} I_s \omega \quad (C.10)$$

e,

$$\sqrt{2} I \omega L_s = \frac{(K_v E_0 I)}{I_s} = E_c \quad (C.11)$$

se,

$$B = I_s / I \quad (C.12)$$

então,

$$E_c = K_v E_0 / B \quad (C.13)$$

Se, $Z_t = 0.5\sqrt{L_{s1}/C_1}$, $\sqrt{\delta} = 0$, E_s será criticamente amortecido.

Se, $Z_t < 0.5\sqrt{L_{s1}/C_1}$, $\sqrt{\delta}$ é positivo, então E_s será exponencial.

Se, $Z_t > 0.5\sqrt{L_{s1}/C_1}$, $\sqrt{\delta}$ for imaginário, então E_s será oscilatório.

A TRT do lado da fonte para o caso criticamente amortecido é encontrada resolvendo o valor de C_1 para $Z_t = 0.5\sqrt{L_{s1}/C_1}$, e substituindo em (C.7).

Antitransformando para o domínio do tempo:

$$E_s = E_c \left[1 - \left(\frac{2 Z_t T}{L_{s1}} \right) \exp \frac{-2 Z_t T}{L_{s1}} \right] \quad (\text{c.14})$$

E, a TCTRT para este caso será:

$$\frac{dE_s}{dT} = E_c \left(\frac{2 Z_t}{L_{s1}} \right)^2 \exp \frac{-2 Z_t T}{L_{s1}} (T) \quad (\text{C.15})$$

Caso Z_t aproxima-se do infinito, $Z_t > 0.5\sqrt{L_{s1}/C_1}$, B será próximo a 1 e $E_c = K_v E_c$.

Desta maneira,

$$E_c = K_v [I - \cos(T/\sqrt{L_{s1}C_1})] \quad (\text{c.16})$$

e, a TCTRT:

$$\frac{dE}{dT} = (E_0 K_v / \sqrt{L_{s1}C_1}) \sin(T/\sqrt{L_{s1}C_1}) \quad (\text{C.17})$$

Caso C_1 se aproxime de zero, $Z_t < 0.5\sqrt{L_{s1}/C_1}$,

$$E_s = E_c (I - e^{-TZ_1/L_{s1}}) \quad (\text{C.18})$$

e, a TCTRT:

$$\frac{dE}{dT} = \frac{E_c Z_t}{L_{s1}} e^{\frac{-TZ}{L_{s1}}} \quad (\text{C.19})$$

Combinando as expressões (C.19) e (C.11), para $T = 0$

$$R_{s0} = \frac{E_c Z_t}{L_{s1}} = \frac{K_c E_0 I Z_t}{I_s L_{s1}} = \sqrt{2} \omega I Z_t 10^{-6} kV/\mu s \quad (\text{C.20})$$

Onde R_{s0} é a TCTRT no lado da fonte.

As figuras 43 e 44 ilustram o caso trifásico e serão usadas como base para o cálculo desta mesma referência, [1]:

Figura 43 - Caso trifásico

Fonte: O. Naef, 1965

Figura 44 - Equivalente caso trifásico

Fonte: O. Naef, 1965

Destas figuras, pode-se observar que a TRT do lado da fonte, onde se tem a tensão E_s , é a mesma do caso monofásico, sendo incluso o termo do lado da linha, onde se tem a tensão E_L , para que a TRT nos terminais do disjuntor seja:

$$E_b = E_s - E_l \quad (C.21)$$

A combinação das impedâncias de surto do lado da falha resulta em:

$$Z_t = \frac{1}{2} \left[\frac{Z_t Z}{1.5Z_t + Z} \right] = \frac{Z_t}{2} \left[\frac{Z}{1.5Z_t + Z} \right] = \frac{Z_t K_2}{2} \quad (\text{C.22})$$

Substituindo, $E_c/2$, $L_{s1}/2$, $2C_1$, $Z_t K_2$ e δ por E_c , L_{s1} , C_1 , Z_t e δ em (C.7) e (C.8),

$$E_l = -\frac{E_c}{2} \left\{ 1 - \exp \frac{-T}{2Z_t K_2 C_1} \left[\left(\frac{\exp \frac{\sqrt{\delta} I}{2Z_t K_2 C_1} - \exp \frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t K_2 C_1}}{2\sqrt{\delta}} \right) + \left(\frac{\exp \frac{\sqrt{\delta} T}{2Z_t K_2 C_1} - \exp \frac{-\sqrt{\delta} T}{2Z_t K_2 C_1}}{2} \right) \right] \right\} \quad (\text{C.23})$$

onde,

$$\sqrt{\delta} = \sqrt{1 - 4(Z_1 K_2)^2 C_1 L_{s1}} \quad (\text{C.24})$$

e,

$$K_2 = \left(\frac{Z}{1.5Z_t + Z} \right) \quad (\text{C.25})$$

Se, $Z_t = 0.5/K_2 \sqrt{L_{s1}/C_1}$, $\sqrt{\delta} = 0$, E_l será criticamente amortecido.

Se, $Z_t < 0.5/K_2 \sqrt{L_{s1}/C_1}$, $\sqrt{\delta}$ é positivo, então E_l será exponencial.

Se, $Z_t > 0.5/K_2 \sqrt{L_{s1}/C_1}$, $\sqrt{\delta}$ for imaginário, então E_l será oscilatório.

Sabendo que $Z_t \leq 1$, pode-se confirmar que se E_s é exponencial, E_l também será exponencial. E, se E_l é oscilatório, E_s também será oscilatório. Quando, $0.5\sqrt{L_{s1}/C_1} \leq Z_t \leq (0.5/K_2) \sqrt{L_{s1}/C_1}$, E_s será oscilatório e E_l exponencial.

Caso Z_t seja muito grande, $Z_t > (0.5/K_2) \sqrt{L_{s1}/C_1}$ e Z seja infinito por não ter nenhuma linha conectada, B será aproximadamente zero e $E_c = E_0 K_v$.

$$E_l = -\frac{E_0}{2} K_z [1 - \cos(T/\sqrt{L_{s1} C_1})] \quad (\text{C.26})$$

Caso C_1 se aproxime de zero ($Z_t < (0,5/K_z)\sqrt{L_{s1}C_t}$),

$$E_l = \frac{E_0}{2} \left(1 - \exp \frac{-TZ_t K_2}{L_{s1}} \right) \quad (C.27)$$

Combinando (C.16), (C.26) e (C.21), para o caso onde Z_t é infinito, nenhuma linha conectada aos terminais,

$$E_b = 1.5E_0K_v[1 - \cos(T/\sqrt{L_{s1}C_1})] \quad (C.28)$$

Combinando (C.18), (C.27) e (C.21), para o caso onde $C_1=0$,

$$E_b = E_c \left[\left(1 - \exp \frac{-TZ_t}{L_{s1}} \right) + 0.5 \left(1 - \exp \frac{-TK_2Z_t}{L_{s1}} \right) \right] \quad (C.29)$$

e,

$$\frac{dE_b}{dT} = E_c \left[\frac{Z_t}{L_{s1}} \exp \frac{-TZ_t}{L_{s1}} + \frac{Z_t K_2}{2L_{s1}} \exp \frac{-TK_2Z_t}{L_{s1}} \right] \quad (C.30)$$

quando $T=0$,

$$\frac{dE_b}{dT} = R_{b0} = \frac{E_c Z_t}{L_{s1}} \left[1 + \frac{K_2}{2} \right] = \frac{1.5E_c Z_t}{L_{s1}} \left[\frac{Z_t + Z}{1.5Z_t + Z} \right] \quad (C.31)$$

e,

$$R_{b0} = (1.5)(\sqrt{2} \omega I Z_t) \left[\frac{Z_t + Z}{1.5Z_t + Z} \right] 10 \text{ kV}/\mu s \quad (C.32)$$

Caso nenhuma linha esteja conectada aos terminais, Z infinito, então:

$$R_{b0} = (1.5)(\sqrt{2} \omega I Z_t) 10 \text{ kV}/\mu s \quad (C.33)$$

Caso os terminais em falha estejam aterrados, $Z=0$,

$$R_{b0} = (\sqrt{2} \omega I Z_t) 10 \text{ kV}/\mu s \quad (C.34)$$

Isto demonstra que o caso monofásico pode ser considerado um caso especial do caso trifásico apresentado. A equação C.32 é a TCTRT inicial de um sistema trifásico isolado. A equação C.33 refere-se à TCTRT. Estes mesmos valores serão obtidos neste trabalho para o caso monofásico, entretanto, utilizando uma diferente abordagem.

APÊNDICE D - RESULTADOS DA TRT NOS PRIMEIROS INSTANTES DE TEMPO INCLUINDO A CAPACITÂNCIA

Tabela 10 – Resultados RLC Monofásico

Tempo (s)	ATP (V)	Calculado(V)	Desvio
1,00E-06	126,58	122,53	-3,20%
2,00E-06	482,39	468,66	-2,85%
3,00E-06	1030,38	1009,6	-2,02%
4,00E-06	1746,14	1720,6	-1,46%
5,00E-06	2608,66	2580,4	-1,08%
6,00E-06	3599,83	3570,7	-0,81%
7,00E-06	4704,01	4675,5	-0,61%
8,00E-06	5907,67	5881,2	-0,45%
9,00E-06	7199,10	7175,9	-0,32%
1,00E-05	8568,09	8549,3	-0,22%
1,10E-05	10005,80	9992,4	-0,13%
1,20E-05	11504,48	11497	-0,07%
1,30E-05	13057,38	13057	0,00%
1,40E-05	14658,57	14666	0,05%
1,50E-05	16302,87	16318	0,09%
1,60E-05	17985,68	18010	0,14%
1,70E-05	19702,98	19736	0,17%
1,80E-05	21451,20	21494	0,20%
1,90E-05	23227,16	23280	0,23%

Tabela 11 - Resultados RLC dupla fase terra

Tempo (s)	ATP (V)	Calculado(V)	Desvio
1,00E-06	123,88	122,61	-1,03%
2,00E-06	469,58	468,81	-0,16%
3,00E-06	1008,16	1009,5	0,13%
4,00E-06	1714,67	1719,6	0,29%
5,00E-06	2567,54	2577,2	0,38%
6,00E-06	3548,04	3563,6	0,44%
7,00E-06	4639,95	4662,2	0,48%
8,00E-06	5829,17	5858,9	0,51%
9,00E-06	7103,44	7141,4	0,53%
1,00E-05	8452,08	8498,8	0,55%
1,10E-05	9865,82	9921,8	0,57%
1,20E-05	11336,54	11402	0,58%
1,30E-05	12857,16	12933	0,59%
1,40E-05	14421,51	14508	0,60%
1,50E-05	16024,18	16121	0,60%
1,60E-05	17660,42	17768	0,61%
1,70E-05	19326,1	19445	0,62%

1,80E-05	21017,57	21148	0,62%
1,90E-05	22731,62	22873	0,62%

Tabela 12 - Resultados RLC trifásico terra

Tempo (s)	ATP (V)	Calculado(V)	Desvio
1,00E-06	123,56	116,56	6,01%
2,00E-06	459,03	445,58	3,02%
3,00E-06	978,23	959,15	1,99%
4,00E-06	1656,98	1633	1,47%
5,00E-06	2474,29	2445,9	1,16%
6,00E-06	3411,88	3379,7	0,95%
7,00E-06	4453,85	4418,3	0,80%
8,00E-06	5586,38	5547,8	0,70%
9,00E-06	6796,46	6756,2	0,60%
1,00E-05	8076,63	8032,9	0,54%
1,10E-05	9414,81	9368,9	0,49%
1,20E-05	10804,09	10756	0,45%
1,30E-05	12383,14	12188	1,60%
1,40E-05	13709,34	13658	0,38%
1,50E-05	15214,14	15161	0,35%
1,60E-05	16747,47	16693	0,33%
1,70E-05	18305,4	18249	0,31%
1,80E-05	19884,51	19827	0,29%
1,90E-05	21481,82	21423	0,27%

Tabela 13 - Resultados RLC dupla fase isolado

Tempo (s)	ATP (V)	Calculado(V)	Desvio
1,00E-06	-212,9	-201,2	5,82%
2,00E-06	-783,7	-761,57	2,91%
3,00E-06	-1654,97	-1624	1,91%
4,00E-06	-2778,91	-2740,5	1,40%
5,00E-06	-4115,25	-4070,5	1,10%
6,00E-06	-5630,1	-5579,9	0,90%
7,00E-06	-7294,9	-7240,1	0,76%
8,00E-06	-9085,61	-9026,8	0,65%
9,00E-06	-10981,98	-10920	0,57%
1,00E-05	-12966,97	-12902	0,50%
1,10E-05	-15026,21	-14958	0,46%
1,20E-05	-17147,61	-17077	0,41%
1,30E-05	-19320,98	-19249	0,37%
1,40E-05	-21537,75	-21463	0,35%
1,50E-05	-23790,7	-23715	0,32%
1,60E-05	-26073,75	-25996	0,30%

1,70E-05	-28381,77	-28303	0,28%
1,80E-05	-30710,45	-30630	0,26%
1,90E-05	-33056,17	-32975	0,25%

Tabela 14 - Resultados RLC trifásico isolado

Tempo (s)	ATP (V)	Calculado(V)	Desvio
1,00E-06	172,94	162,49	6,43%
2,00E-06	634,84	615,07	3,21%
3,00E-06	1339,26	1311,6	2,11%
4,00E-06	2247,63	2213,3	1,55%
5,00E-06	3327,44	3287,5	1,21%
6,00E-06	4551,34	4506,5	1,00%
7,00E-06	5896,28	5847,3	0,84%
8,00E-06	7342,85	7290,3	0,72%
9,00E-06	8874,71	8819,1	0,63%
1,00E-05	10478,09	10420	0,56%
1,10E-05	12141,41	12081	0,50%
1,20E-05	13854,9	13792	0,46%
1,30E-05	15610,34	15546	0,41%
1,40E-05	17400,81	17335	0,38%
1,50E-05	19220,48	19153	0,35%
1,60E-05	21064,44	20995	0,33%
1,70E-05	22928,56	22858	0,31%
1,80E-05	24809,36	24738	0,29%
1,90E-05	26703,9	26631	0,27%

APÊNDICE E – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ATP COM O PSCAD

Durante a seção 4, resultados, o programa utilizado para as simulações foi o ATP. Este é um software livre e universal, dedicado para estudos eletromagnéticos, que possibilita a modelagem de sistemas elétricos utilizando um ambiente unifilar gráfico. A formulação matemática que constitui o programa é baseada, para elementos com parâmetros distribuídos, no método das características (método de Bergeron) e para parâmetros concentrados na regra de integração trapezoidal, conforme abordado pelas referências [24] e [25].

Ao utilizar esse programa para o cálculo da TCTRT, na seção 4, foi possível observar que para alguns tipos de rede o passo de integração devia ser muito reduzido para se alcançar a precisão desejada, entretanto, o próprio programa não permite essa redução para redes mais complexas, o que pode ser um problema para o cálculo da TCTRT. Neste caso, o usuário pode valer-se das equações apresentadas neste trabalho ou de outros softwares de simulação como o PSCAD.

O PSCAD é um programa de simulação que originou-se através de um simulador de transitórios eletromagnéticos, EMTDC, desenvolvido nos anos 70. Esse software foi inspirado em um artigo publicado no IEEE do Dr. Hermann Dommel, 1969. O software PSCAD realiza os cálculos no domínio do tempo e é de domínio de Manitoba HVDC Research Center.

A título ilustrativo, o programa PSCAD foi utilizado em um caso comparativo como o ATP, com o passo de integração de $1\mu\text{s}$. As figuras 45 e 46 ilustram o mesmo sistema no, ATP e no PSCAD.

Figura 45 - Rede ATP (comparação ATP/PSCAD)

Figura 46- Rede PSCAD (comparação ATP/PSCAD)

O valor obtido para a TRT nos primeiros instantes de tempo nos dois programas pode ser observado através do gráfico abaixo, onde se observa o desvio do ATP.

Figura 47 - TRT (comparação ATP/PSCAD)

O valor da TCTRT utilizando o ATP possui um desvio maior, de 4,78%, do que o apresentado pelo PSCAD, de 1,66%, em relação ao valor calculado por meio da formulação apresentada neste trabalho.

Apenas como referência, a figura 47 apresenta o gráfico da tensão nas 3 fases, após a abertura do primeiro polo do disjuntor no caso do curto monofásico, utilizado

como base desse estudo.

Figura 48 - TRT ATP