

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FERNANDO PADILHA DOS SANTOS

**MÉTODO DE CÁLCULO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA
EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO A IMPEDÂNCIA
EQUIVALENTE DO SISTEMA.**

**Alegrete - RS
2020**

FERNANDO PADILHA DOS SANTOS

**MÉTODO DE CÁLCULO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA
EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO A IMPEDÂNCIA
EQUIVALENTE DO SISTEMA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Chrystian Dalla Lana da Silva

**Alegrete - RS
2020**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

Padilha dos Santos, Fernando.

Método de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores de Alta Tensão Utilizando a Impedância Equivalente do Sistema.
/ Fernando Padilha dos Santos, 2020.
48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2020.
"Orientação: Chrystian Dalla Lana da Silva".

1. Disjuntor de alta tensão, 2. Impedância Equivalente, 3. Tensão de restabelecimento transitória (TRT), 4. Transitório eletromagnético.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

FERNANDO PADILHA DOS SANTOS

MÉTODO DE CÁLCULO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO A IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO SISTEMA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 10 de Dezembro de 2020.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

UNIPAMPA

Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHRYSIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2020, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2020, às 15:36, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE WAGNER MACIEL KAEHLER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2020, às 06:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0420249** e o código CRC **F7D418F4**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550
Telefone: (55) 3422-8400

DEDICATÓRIA

Este trabalho é todo dedicado aos meus pais e irmãos, pois é graças ao esforço e apoio deles que hoje posso concluir mais esta etapa.

AGRADECIMENTO

Agradeço principalmente aos meus pais, Eliani Mariza e Odacir, por todo apoio durante todo este caminho, com certeza as pessoas mais importantes na minha vida e não conseguiria concluir este trabalho sem a ajuda deles.

Aos meus irmãos, Odacir Júnior, Gustavo e Anthony, também pelo laço de apoio nesta jornada.

Ao meu orientador, Chrystian, que teve suma importância na elaboração deste trabalho, com certeza não conseguiria êxito sem a ajuda deste grande mestre.

Aos meus amigos e colegas, pela parceria tanto emocional, quanto de estudos durante este ciclo acadêmico.

Também a UNIPAMPA e professores, pela estrutura de ensino e aprendizagem com níveis de excelência.

“Livre pra poder sorrir sim, livre pra poder
buscar o meu lugar ao sol”.

Alexandre Magno Abrão (Chorão).

RESUMO

Este trabalho irá apresentar um método de cálculo da tensão de restabelecimento transitória em disjuntores de alta tensão, para dois tipos de sistemas: sistemas radiais e sistemas malhados. Para um melhor entendimento, a tensão de restabelecimento transitória (TRT) é um transitório eletromagnético que ocorre entre os terminais do disjuntor quando ele é acionado, ou seja, quando seus terminais são abertos. Neste momento se estabelece o surgimento de um arco elétrico entre os terminais do dispositivo, que só desaparecerá quando o valor instantâneo da corrente passar por zero. É nesse momento que surge o fenômeno da (TRT), um transitório que pode ser bastante destrutivo em disjuntores. Com isso, neste trabalho, será abordado o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo desta TRT, baseado na utilização da impedância equivalente do sistema, associado a uma fonte de corrente, cujo valor vai variar de acordo com a posição do curto-circuito no sistema. Também, serão mostrados alguns casos de validação do método, através de simulações e comparações utilizando o software ATP.

Palavras-Chave: Disjuntor de alta tensão, impedância Equivalente, tensão de restabelecimento transitória (TRT), transitório eletromagnético.

ABSTRACT

This work will present a method of calculating the transient reset voltage in high voltage circuit breakers, for two types of systems: radial systems and spotted systems. For a better understanding, the transient reset voltage (TRT) is an electromagnetic transient that occurs between the circuit breaker terminals when it is tripped, that is, when its terminals are opened. At this moment, an electrical arc is established between the terminals of the device, which will only disappear when the instantaneous current value passes through zero. It is at this moment that the phenomenon of (TRT) appears a transient that can be quite destructive in circuit breakers. Thus, in this work, the development of a methodology for calculating this TRT will be approached, based on the use of the equivalent impedance of the system, associated with a current source, the value of which will vary according to the position of the short circuit in the system. Also, some cases of validation of the method will be shown, through simulations and comparisons using the ATP software.

Keywords: High voltage circuit breaker, Equivalent impedance, transient recovery voltage (TRT), electromagnetic transient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – TRT em disjuntor de alta tensão	21
Figura 2 – TRT Exponencial.....	22
Figura 3 – TRT Oscilatória	22
Figura 4 – TRT Triangular.....	23
Figura 5 – Curva envoltória a dois parâmetros, classe de tensão $\leq 100\text{kV}$	25
Figura 6 – Curva envoltória a quatro parâmetros, classe de tensão $> 100\text{kV}$	25
Figura 7 – Disjuntor não superado - TRT x Envoltória.	26
Figura 8 – Disjuntor superado - TRT x Envoltória	26
Figura 9 – Circuitos equivalentes de um Transformador de potência.	29
Figura 10 – Exemplo de Equivalente Thévenin.....	30
Figura 11 – Sistema radial de cinco barras.....	31
Figura 12 – Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 4	31
Figura 13 – Sistema para o método da Impedância Equivalente	32
Figura 14 – Comparação de TRTs do sistema radial com curto na barra 4.....	33
Figura 15 – Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 4	33
Figura 16 – Sistema malhado de nove barras.....	34
Figura 17 – Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 6	35
Figura 18 – Comparação de TRTs do sistema malhado com curto na barra 6	36
Figura 19 – Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 6.....	36
Figura 20 – Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 7	37
Figura 21 – Comparação de TRTs do sistema malhado com curto na barra 7	38
Figura 22 – Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 7	39
Figura 23 – Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 9	40
Figura 24 – Comparação de TRTs do sistema malhado com curto na barra 9	41
Figura 25 – Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 9.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Impedância equivalente nos terminais da barra 4 do sistema radial 5 barras	32
Tabela 2 – Parâmetros de impedância equivalente nos terminais da barra 6 do sistema malhado 9 barras	35
Tabela 3 – Parâmetros de impedância equivalente nos terminais da barra 7 do sistema malhado 9 barras	38
Tabela 4 – Parâmetros de impedância equivalente nos terminais da barra 9 do sistema malhado 9 barras	40
Tabela A.1 – Dados de linha em pu sistema 5 barras	47
Tabela A.2 – Dados de transformador em pu sistema 5 barras	47
Tabela A.3 – Dado do gerador sistema 5 barras	47
Tabela A.4 – Dados de carga sistema 5 barras	48
Tabela B.1 – Dados de linha em pu sistema 9 barras	49
Tabela B.2 – Dados de transformador em pu sistema 9 barras	49
Tabela B.3 – Dados de gerador sistema 9 barras	49
Tabela B.4 – Dados de carga sistema 9 barras	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TRT - Tensão de Restabelecimento Transitória

ATP - Alternative Transient Program

TRV - Transient Recovery Voltage

TCTRT - Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória

SUMÁRIO

1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	16
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	19
2.2	TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA	19
2.2.1	Definição e Origem	19
2.2.2	Tipos de TRT	21
2.3	SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES	23
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
3	METODOLOGIA, SIMULAÇÕES E RESULTADOS	28
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	28
3.2	MÉTODO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE	28
3.3	CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE	30
3.4	CASO 1 – SISTEMA RADIAL CINCO BARRAS	31
3.5	CASO 2 – SISTEMA MALHADO NOVE BARRAS	34
3.5.1	Curto-circuito na barra 6	35
3.5.2	Curto-circuito na barra 7	37
3.5.3	Curto-circuito na barra 9	39
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
4	CONCLUSÃO	43
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
	REFERÊNCIAS	45
	ANEXOS	47
	ANEXO A	47
	ANEXO B	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Disjuntores de proteção são dispositivos eletromecânicos que possuem a funcionalidade de resguardar as instalações elétricas do sistema. Quando a corrente elétrica que percorre o circuito ultrapassa o valor nominal deste componente, as relés de proteção atuam interrompendo o funcionamento do circuito naquele ponto em que se encontra a falta, trancando o fornecimento de energia para o restante do sistema, protegendo e evitando que as cargas do circuito se danifiquem.

Em sistemas elétricos de potência, neste caso um sistema de alta tensão, quando o disjuntor é acionado por questão de recebimento de alguma corrente de sobrecarga ou de curto-circuito, entre os terminais do dispositivo ocorre um fenômeno chamado de “Tensão de Restabelecimento Transitória”, ou TRT's, que é um transitório na diferença de potencial que aparece entre os terminais do disjuntor, no momento em que a corrente fica nula.

A fim de analisar essa TRT em disjuntores de alta tensão, foi desenvolvida uma técnica de simulação desta, utilizando um método da impedância equivalente, somado a uma fonte de corrente, que será mostrado usando o software ATP.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um método de simulação da TRT em disjuntores de alta tensão, utilizando a impedância equivalente do sistema, aliado a uma fonte de corrente com o valor da corrente de curto-circuito.

Como objetivos específicos, citam-se:

- Análise e simulação do método da impedância equivalente.
- Aplicação da técnica de simulação em sistemas radiais e malhados.
- Validação do método através de simulação e comparação no ATP.

- Cálculo do erro do método.

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA 2017, a capacidade de geração de energia no Brasil cresce exponencialmente a cada ano, conseqüentemente, a expansão do sistema elétrico com a elevação do percentual de malhagem, saindo da condição de sistemas radiais para malhados. Isto implicará na elevação da potência de curto-circuito nas subestações, afetando fortemente as condições operacionais dos disjuntores. Sobrepondo a isto ainda deve-se considerar o envelhecimento das redes elétricas como um fator importante.

Tendo em vista que a superação por TRT de um disjuntor pode causar danos muitas vezes irreversíveis, e que a simulação da TRT é uma tarefa demorada devido ao tamanho do sistema, já que há a necessidade de usar um intervalo de simulação muito pequeno por causa das altas frequências envolvidas, a necessidade da busca de métodos alternativos é bastante importante.

O software ATP, já é uma ferramenta bastante utilizada há décadas na área de simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos, porém a busca de métodos de cálculos da tensão de restabelecimento transitória, que melhorem o funcionamento da solução dos problemas de superação de disjuntores, em termos de agilidade e funcionalidade da obtenção de reparos, é de suma importância para a aceleração na busca de resolução de possíveis problemas de proteção no sistema elétrico de potência.

1.4 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

Neste tópico pode-se conferir um apanhado de alguns artigos, teses e normas sobre o tema proposto, ou que foi de suma importância para a concretização deste trabalho, mostrados a seguir.

A norma ABNT NBR IEC 62271-200 (2007) estabelece os parâmetros de análise das tensões de restabelecimento transitória.

A norma IEEE C37.011 (2019) constitui a base para a aplicação de tensão de restabelecimento transitória para disjuntores de alta tensão CA.

Sinder (2007) mostrou métodos de cálculo da TRT de disjuntores de alta tensão em sistemas rigorosamente malhados nos domínios do tempo e da frequência, com o intuito de analisar a superação destes dispositivos. Desenvolveu o método através das transformadas de Fourier. Também falou sobre as TRT's e sobre os tipos de superação de disjuntores.

Steurer, Hribernik e Brunke (2004) propuseram um método em seu artigo que aplica a análise da resposta em frequência para medir a parte imaginária da impedância do transformador, que serviu como base para o desenvolvimento do método proposto no presente trabalho.

Azevêdo (2010) apresentou uma metodologia para que a aquisição do espectro da impedância harmônica e com a estimação paramétrica de equivalentes dependentes da frequência, pudesse fornecer subsídios para a criação de um dispositivo limitador de pico da TRT.

Alves (2012) mostra um trabalho sobre as TRT's, falando sobre as sobretensões dos sistemas elétricos, superação de disjuntores e sobre impacto nos equipamentos elétricos.

Cavalcanti (2010) fez uma metodologia para cálculo da TRT em disjuntores de acordo com o arco elétrico que aparece no dispositivo. Utilizando o ATP e através dos valores de pico e da taxa de crescimento da TRT, analisa a adequação dos disjuntores.

Azzi (2013) analisou diferentes modelagens de transformador em regime transitório, analisando o comportamento da TRT no disjuntor da subestação.

Oliveira Preto e Zanetta Junior (2017) abordaram o cálculo da taxa de crescimento da TRT considerando o caso de falta na barra. Optaram pelo cálculo em expressões obtidas com cálculo, invés de simulações devido aos possíveis erros de oscilações ou imprecisões numéricas.

Rabito, Paloma, Silvestri (2011) desenvolveram sobre a superação de disjuntores de alta tensão, com os tipos de superação de corrente de curto-circuito assimétrica e simétrica, corrente de crista de curto-circuito, através da análise da TRT.

Nobre (1999) trabalhou no desempenho de disjuntores da classe 15kV, através da análise da TRT e de sua suportabilidade, também com auxílio do software ATP.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso será dividido em quatro capítulos, com seus respectivos subtítulos, conforme abaixo.

- O Capítulo 1 mostra a introdução, com uma consideração geral do tema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa para o tema e uma revisão bibliográfica sobre o assunto.
- No Capítulo 2, é abordado a fundamentação teórica sobre o assunto, com uma consideração geral sobre as TRT's, descrevendo o que é, como surge e os tipos.
- No Capítulo 3, são abordadas as simulações e resultados, explicando o método da impedância equivalente, mostrando os casos em sistemas radiais e sistemas malhados, bem como seus respectivos resultados e conclusões.
- No Capítulo 4, apresentam-se as considerações finais e conclusões, assim como sugestões para trabalhos futuros.
- Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas e os anexos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para saber se um disjuntor estará adequado para suportar a corrente elétrica daquele sistema, a análise da tensão de restabelecimento transitória é de suma importância. Junto a esta análise, soma-se a superação do disjuntor por TRT, que é feita através de curvas envoltórias pré-estabelecidas por normas técnicas.

Neste Capítulo serão mostrados fundamentos técnicos sobre o que é uma TRT, como ela surge entre os terminais de um disjuntor, como surge o arco elétrico logo depois que os terminais do dispositivo iniciam sua desconexão, e outros aspectos teóricos. Por fim, serão abordados os tipos de superação de disjuntores, principalmente sobre o tipo de superação por TRT, que é o principal foco.

2.2 TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

2.2.1 Definição e Origem

Sempre que o disjuntor interrompe uma corrente elétrica com a sua abertura, surge entre os terminais dos polos deste dispositivo uma diferença de potencial. Essa diferença de potencial é chamada de tensão de restabelecimento transitória (TRT), um fenômeno caracterizado por ser oscilatório e com alta frequência, o qual pode atingir uma magnitude bastante elevada, sendo possíveis efeitos indesejados como a ruptura do dielétrico do disjuntor, ocasionando a falha da interrupção de corrente elétrica (Azevêdo, 2010).

Para melhor explicação do processo de interrupção de corrente elétrica pelo disjuntor, abaixo estão listadas algumas etapas deste processo.

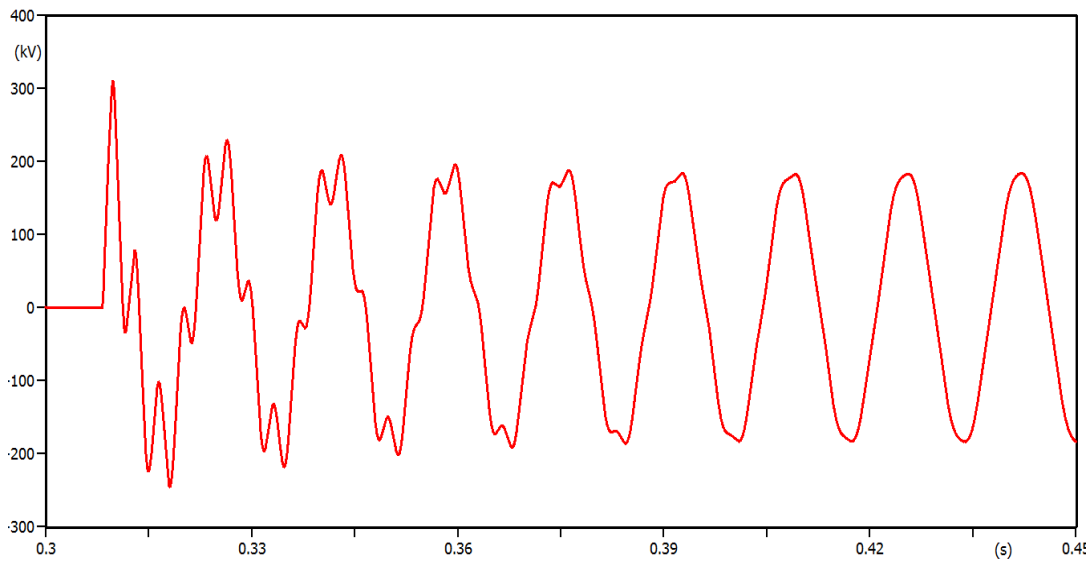
- Disjuntor fechado e o sistema em operação normal. Quando ocorre uma falta no sistema, e o sistema de proteção detecta a falta, automaticamente o disjuntor é acionado e inicia-se a abertura dos contatos deste dispositivo.

- Assim que há a primeira separação mecânica destes contatos, a corrente não cessa instantaneamente, devido às características indutivas do circuito. Então esta corrente continua fluindo, só que não mais pelos contatos do disjuntor, e sim pelo ar ou outro meio formando o chamado de arco elétrico.
- Arco elétrico é um feixe de descargas elétricas que acontece entre os terminais de um dispositivo de proteção, que é ocasionado pela soma de gases que formam um meio condutor (Modenesi, 2012). Este arco elétrico é interrompido quando a corrente elétrica passa por zero.
- Após a extinção do arco elétrico, as propriedades térmicas e dielétricas do disjuntor começam a se recompor para voltar ao normal. Junto com este processo de recomposição destas propriedades, ocorre o surgimento da tensão de restabelecimento transitória, que é a sobretensão transitória gerada pelos elementos indutivos e capacitivos do sistema (Cavalcanti, 2010).

Para analisar se a interrupção de corrente é bem-sucedida, o disjuntor tem que ser capaz de interromper a corrente de falta e seu dielétrico deve suportar a sobretensão que a TRT impõe. Por isso, a análise da TRT é importante para determinar se haverá superação daquele disjuntor, averiguando se o mesmo está adequado para aquela corrente elétrica (Cavalcanti, 2010).

Figura 1 mostra a tensão entre os terminais de um disjuntor de alta tensão no momento da abertura dos contatos, onde se pode notar a sobretensão gerada pela TRT.

Figura 1 - TRT em disjuntor de alta tensão.



Fonte - Autor.

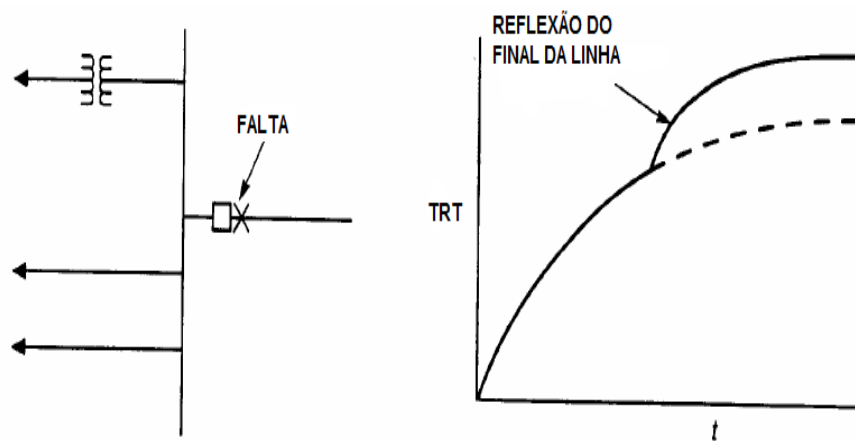
2.2.2 Tipos de TRT

A Tensão de Restabelecimento Transitória pode ser do tipo oscilatório, triangular, ou exponencial, também podendo ocorrer uma combinação entre elas.

As TRT's oscilatórias e exponenciais tendem a ocorrer através do primeiro terminal do disjuntor, interrompendo uma falha simétrica trifásica em seu terminal, quando a tensão é máxima. Já as TRT's triangulares estão associadas às faltas de linha, geralmente quando há um curto na linha de transmissão, onde as tensões ficam maiores, à medida que a falta se aproxima do disjuntor (Norma IEEE C37.011 – 2019).

Um TRT Exponencial típico ocorre quando há um transformador e uma linha de transmissão no lado oposto do disjuntor de onde está localizada a falta. Na figura 2 tem-se uma ilustração da TRT exponencial, (Norma IEEE C37.011 – 2019).

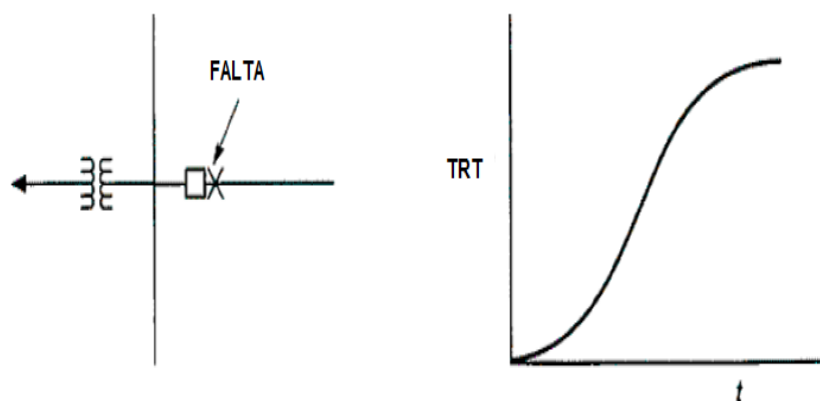
Figura 2 - TRT Exponencial



Fonte - Norma IEEE std. C37.011 – 2019.

Já uma TRT Oscilatória ocorre quando há apenas um transformador ou reator no lado oposto do disjuntor de onde está localizada a falta. Na figura 3, é mostrada a TRT Oscilatória (Norma IEEE std. C37.011 – 2019). Estas são as mais comuns de ocorrer por causa das características indutivas e capacitivas do sistema, que contribuem na geração do aspecto oscilatório.

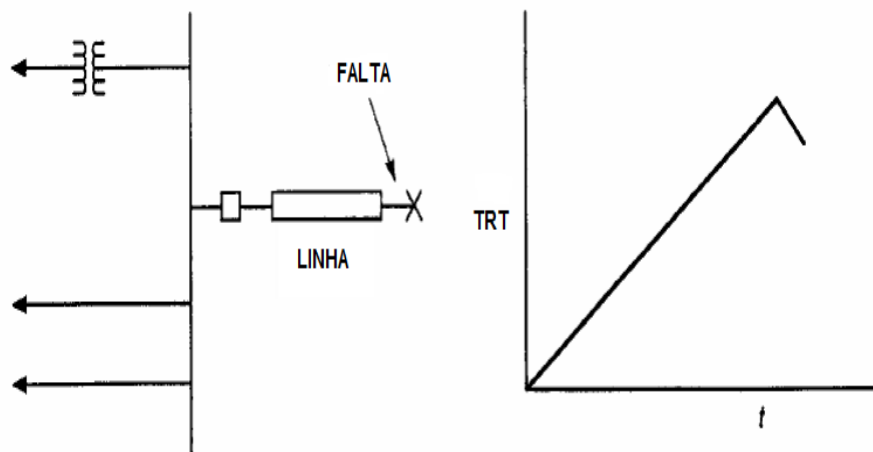
Figura 3 - TRT Oscilatória



Fonte - Norma IEEE std. C37.011 – 2019.

Por fim, a TRT Triangular ocorre quando a falta está na linha de transmissão. A impedância de surto da linha determina a natureza do TRT, e a taxa de aumento da curva geralmente é maior que as taxas das curvas Exponenciais e Oscilatórias. Na Figura 4 é mostrada a TRT Triangular (Norma IEEE std. C37.011 – 2019).

Figura 4 - TRT Triangular



Fonte - Norma IEEE std. C37.011 – 2019.

2.3 SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES POR TRT

Segundo Sinder (2007), a superação de disjuntores é feita através de duas etapas. Na primeira, é feita uma pesquisa sobre os estudos de curto-circuito, onde são escolhidos os disjuntores. A segunda, através de uma análise mais aprofundada dos disjuntores indicados na primeira etapa, observa-se qual o tipo de superação será utilizado.

Os tipos de superação de disjuntores são: por corrente de carga, corrente de curto-circuito simétrica, corrente de curto-circuito assimétrica, crista da corrente de curto-circuito e, por fim, a superação por tensão de restabelecimento transitória (Sinder, 2007). Na sequência aborda-se sobre a superação de disjuntores por TRT, pois é o foco deste trabalho.

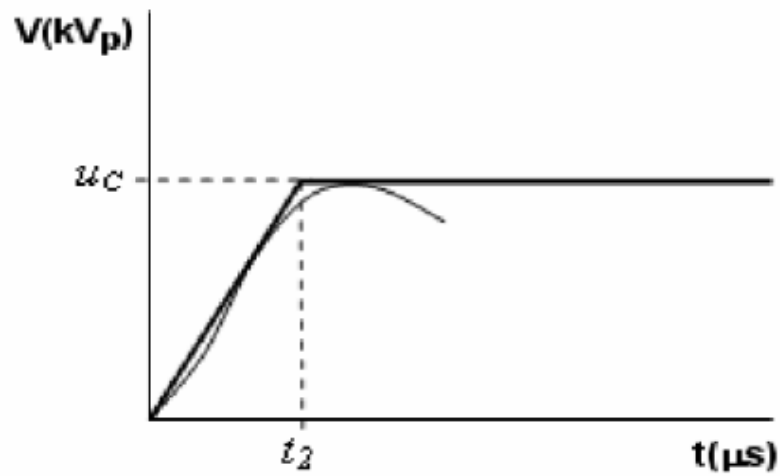
A superação por TRT é definida pela extrapolação dos valores que as componentes dielétricas e térmicas do disjuntor suportam. O disjuntor pode ser superado de duas formas: pela amplitude das curvas e pela taxa de crescimento da TRT (TCTRT). Basicamente, o disjuntor é superado quando a curva de sua TRT ultrapassa a curva da envoltória em qualquer ponto (Sinder, 2007).

Para verificar se o disjuntor está adequado, são utilizadas as envoltórias definidas por normas como, por exemplo, a **C37.011-2019**. Estas envoltórias são baseadas em três principais grandezas, as quais são citadas abaixo.

- **Corrente a ser interrompida pelo disjuntor:** é o percentual da corrente de curto-circuito em relação à capacidade de interrupção do disjuntor que está em análise, em quiloampère (kA).
- **Taxa de crescimento da TRT (TCTRT):** geralmente é dada por Quilovolt por microssegundo (kV/ μ s) e, como o nome já diz, é a taxa de acordo com o crescimento da TRT.
- **Valor de pico da TRT:** valor de maior amplitude da TRT, geralmente em kV.

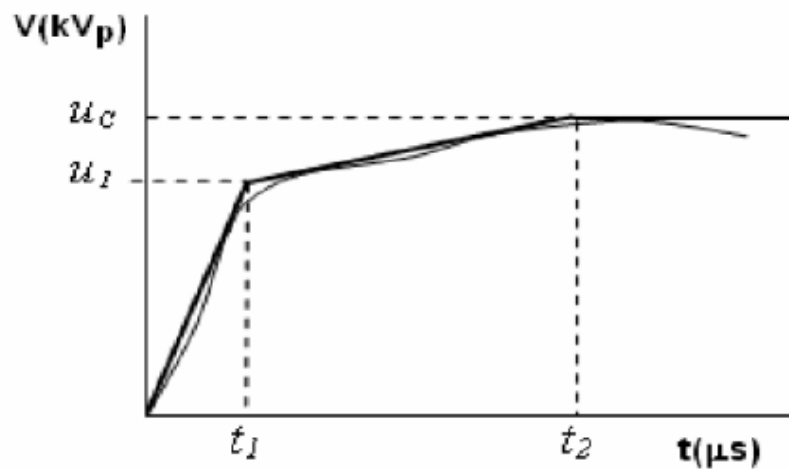
Seguindo sobre as envoltórias geralmente, as curvas são divididas em dois tipos: Curvas envoltórias a dois parâmetros e curvas envoltórias a quatro parâmetros. As curvas a dois parâmetros são usadas para disjuntores com classe de tensão menor ou igual a 100kV e as curvas a 4 parâmetros são utilizadas para classe de tensão maior que 100kV, mostradas nas Figuras 5 e 6, respectivamente (Alves, 2012).

Figura 5 - Curva envoltória a dois parâmetros, classe de tensão $\leq 100\text{kV}$.



Fonte - Alves, 2012.

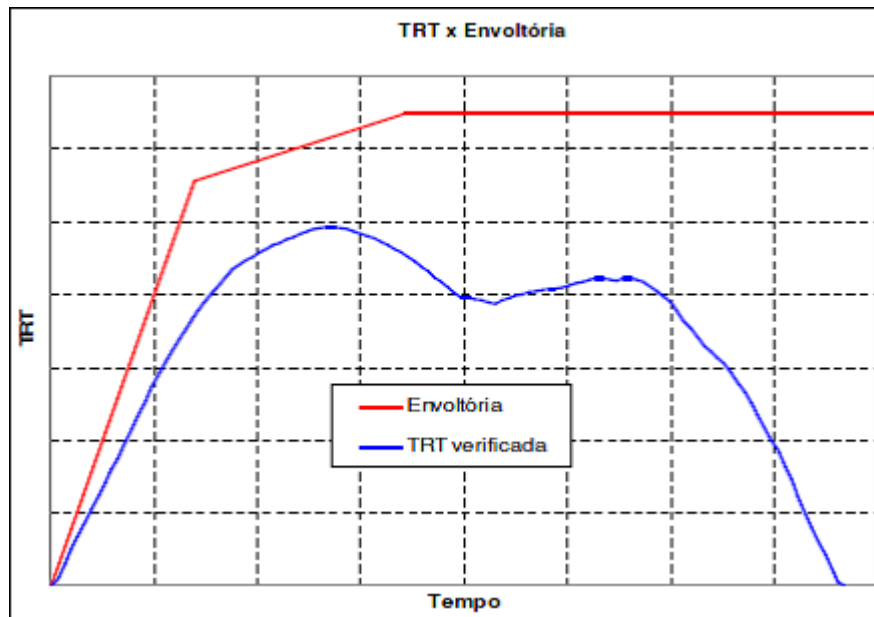
Figura 6 - Curva envoltória a quatro parâmetros, classe de tensão $> 100\text{kV}$.



Fonte - Alves, 2012.

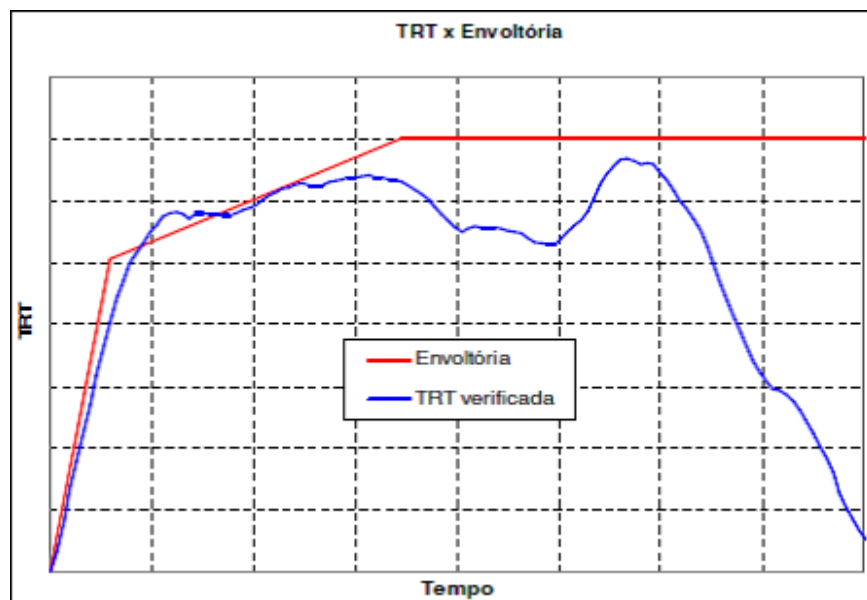
Para melhor entendimento de como é a análise de uma superação ou não de disjuntores, nas Figuras 7 e 8, estão exemplificados cenários de TRT's comparadas com suas envoltórias, mostrando uma de um disjuntor não superado e outra de um disjuntor superado, respectivamente.

Figura 7 - Disjuntor não superado - TRT x Envoltória.



Fonte - Sinder, 2007.

Figura 8 - Disjuntor superado - TRT x Envoltória.



Fonte - Sinder, 2007.

Nota-se que a envoltória é do tipo a quatro parâmetros, como foi explicado anteriormente e mostrado na Figura 6 portanto se trata de um disjuntor com classe acima dos 100kV.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para entender os processos do método de simulação da TRT por impedância equivalente do sistema, foi apresentado, neste Capítulo, um pouco da teoria sobre tensão de restabelecimento transitória e superação de disjuntores.

Sobre as TRT's pode-se verificar o que são e como se dá o surgimento das mesmas, bem como quais são os tipos deste transitório eletromagnético de modo a facilitar o entendimento quando se aborda o método trabalhado.

Quanto à superação de disjuntores, foi visto o tipo de superação pela TRT, no qual se verificam a violação ou não da curva envoltória pela curva da TRT. Os disjuntores podem ser superados tanto pela taxa de crescimento, quanto pelo pico de amplitude.

3 METODOLOGIA, SIMULAÇÕES E RESULTADOS

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste Capítulo, será abordada a metodologia da técnica de simulação com a impedância equivalente, descrevendo-se o processo e o trabalho que serviu como base para a elaboração deste método.

Também, serão mostrados os resultados para simulações de um sistema radial de 5 barras, mostrando sua curva de corrente e comparação de TRTs do sistema completo com o sistema da impedância equivalente, focando no meio ciclo inicial que é o ponto crítico para a análise da superação por TRT. Estes mesmos itens mostrados para o sistema radial, serão mostrados para um sistema malhado de 9 barras, com 3 curtos-circuitos em diferentes barramentos do sistema.

Por não haver 100% de equivalência entre as curvas de TRTs, por fim será calculado o erro de pico de amplitude das TRTs do sistema completo com o sistema da impedância equivalente, com intuito de mostrar qual o nível de eficiência do método.

3.2 MÉTODO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE

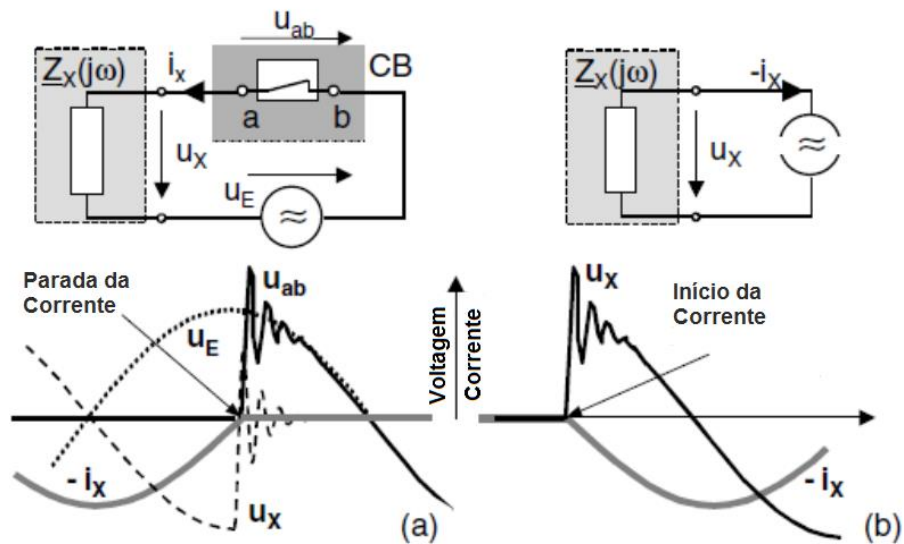
Steurer, Hribernik e Brunke (2004) mostram dois circuitos equivalentes para descrever o comportamento de um transformador de potência com um curto-circuito no disjuntor CB, com uma corrente de curto (i_x) e um transformador representado pela impedância do circuito (Z_x).

Dentro da Figura 9, em a, tem-se a fonte geradora equivalente representada pela fonte (UE). E quando a corrente (i_x) vai para zero, ou seja, os terminais do disjuntor (CB) são abertos, surge entre estes terminais à tensão de restabelecimento transitória (U_{ab}).

Steurer, Hribernik e Brunke (2004) mostram que Slamecka (1966), já afirmava que estas mesmas TRTs poderiam ser geradas em (Z_x), se simuladas com uma corrente de curto-circuito com a polaridade invertida, acionadas por uma fonte de corrente ideal de mesmo valor da corrente de curto-circuito (i_x) conforme mostra a

Figura 9. Portanto pode-se gerar uma TRT muito próxima utilizando outra forma de equivalente do sistema.

Figura 9 – Circuitos equivalentes de um Transformador de potência.



Fonte - Steurer, Hribernik e Brunke (2004).

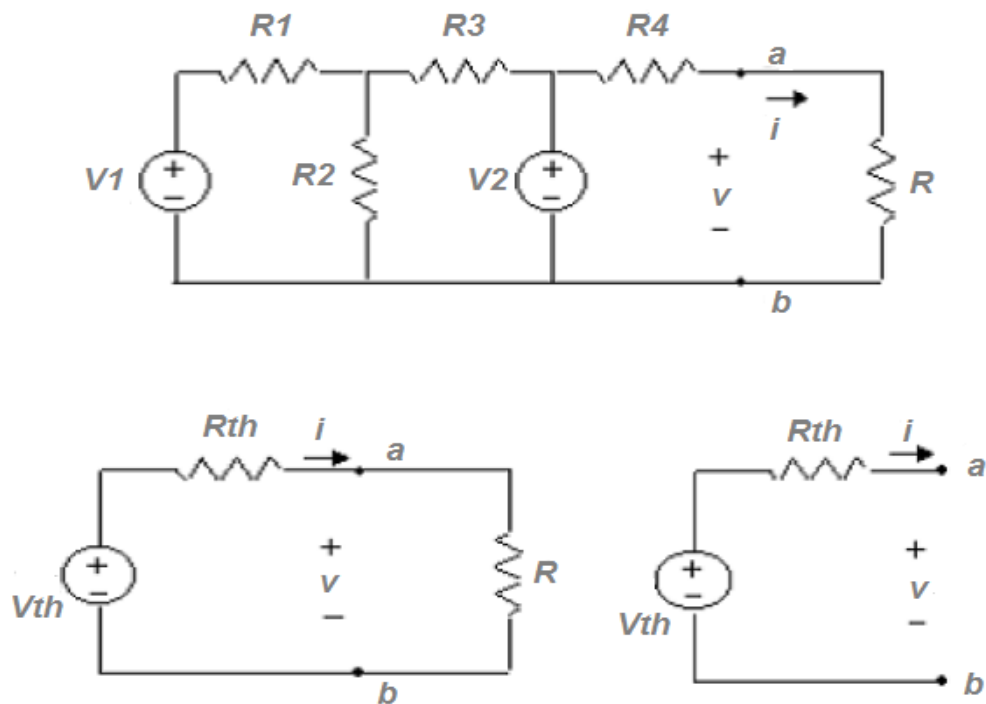
Com base na teoria exposta por Steurer, Hribernik e Brunke (2004), o método proposto neste trabalho segue uma proposta muito parecida, porém simulando e analisando sistemas completos compostos por gerador, transformador, linha de transmissão e carga ativa e reativa. Essa técnica de simulação será usada para a determinação da TRT através da impedância equivalente do sistema. Basicamente, será simulada a TRT dos sistemas completos para alguns casos de curto-circuito e calculada a impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor que vai ser analisado. A essa impedância equivalente será aplicada uma fonte de corrente de mesmo valor da corrente de curto-circuito medida, de onde será obtido o sinal de TRT. Com isso, analisar-se e comparar-se os resultados destas TRTs para comprovar a eficiência do método.

3.3 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE

Para o cálculo da impedância equivalente foi utilizado o equivalente Thévenin visto dos terminais do disjuntor que está sendo analisado. Com o disjuntor definido para a simulação da TRT, a impedância é calculada a partir de reduções do circuito como transformações Δ -Y, associações em paralelo e série, até chegar à impedância equivalente vista nos terminais do disjuntor onde está sendo analisada a TRT.

Na Figura 10, é mostrado um exemplo de equivalente Thévenin visto de dois terminais a e b.

Figura 10 - Exemplo de Equivalente Thévenin.



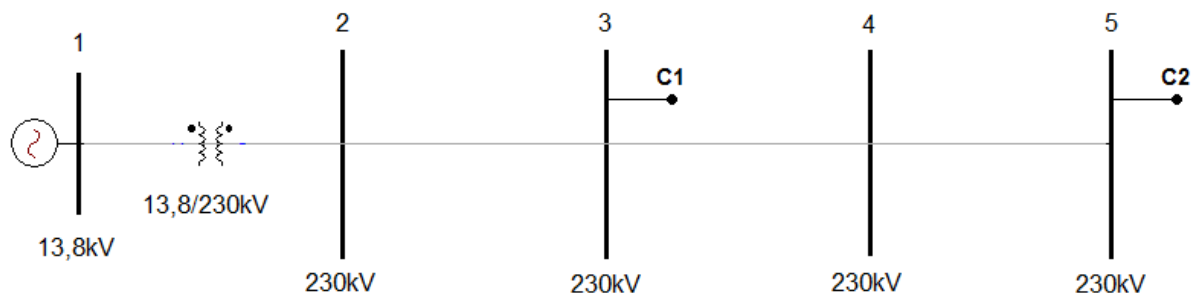
Fonte - John Wisbeck (2001).

Para o método a impedância equivalente vai ser vista entre os terminais a e b do disjuntor que será analisado no caso.

3.4 CASO 1 – SISTEMA RADIAL CINCO BARRAS

No primeiro caso para o sistema radial com cinco barras mostrado na Figura 11, e com os dados do sistema tabelados no anexo A, foi simulado, através do software ATP, um curto-circuito trifásico (3 ϕ) na barra 4 do sistema. A TRT foi medida nos terminais do disjuntor situado no barramento 3.

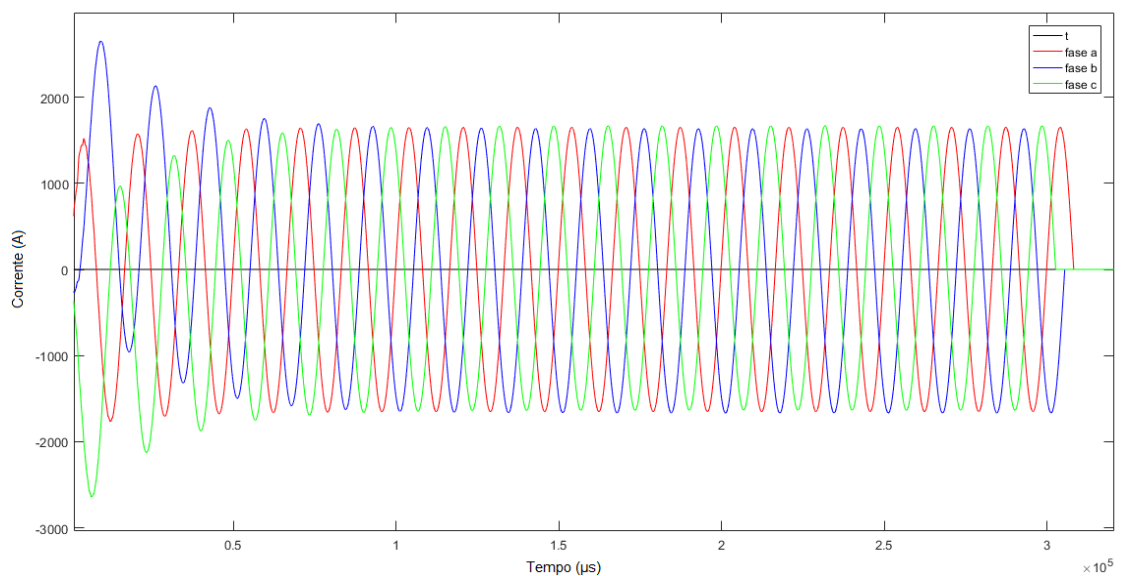
Figura 11 - Sistema radial de cinco barras.



Fonte - Autor.

Para a simulação do método foi utilizado o valor simétrico da corrente de curto-circuito simulada para a barra 4, mostrada na curva de corrente da Figura 12. O seu valor é de aproximadamente 1600 A.

Figura 12 – Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 4.



Fonte - Autor.

Para a aplicação do método, foi calculada a impedância equivalente com resistor de sequência positiva ($R+(\Omega)$), reatância de sequência positiva ($L+(\Omega)$), e a capacitância ($C+(\mu f)$), vista dos terminais do disjuntor do barramento 4, mostrados na Tabela 1, e montado o circuito equivalente do método, mostrado na Figura 13.

É importante notar que, no ATP, é possível escolher o momento em que a fonte começa a operar, sendo o padrão o instante -1, ou seja, no instante inicial zero ela já está em regime permanente. Para que o método funcione é necessário que a fonte comece a operar em algum momento após o instante inicial para gerar o transitório esperado da TRT.

Tabela 1 - Parâmetros de impedância equivalente nos terminais da barra 4 do sistema radial 5 barras.

Parâmetros	
$R+(\Omega)$	12,67
$XL+(\Omega)$	111,48
$C+(\mu f)$	4,06

Fonte - Autor.

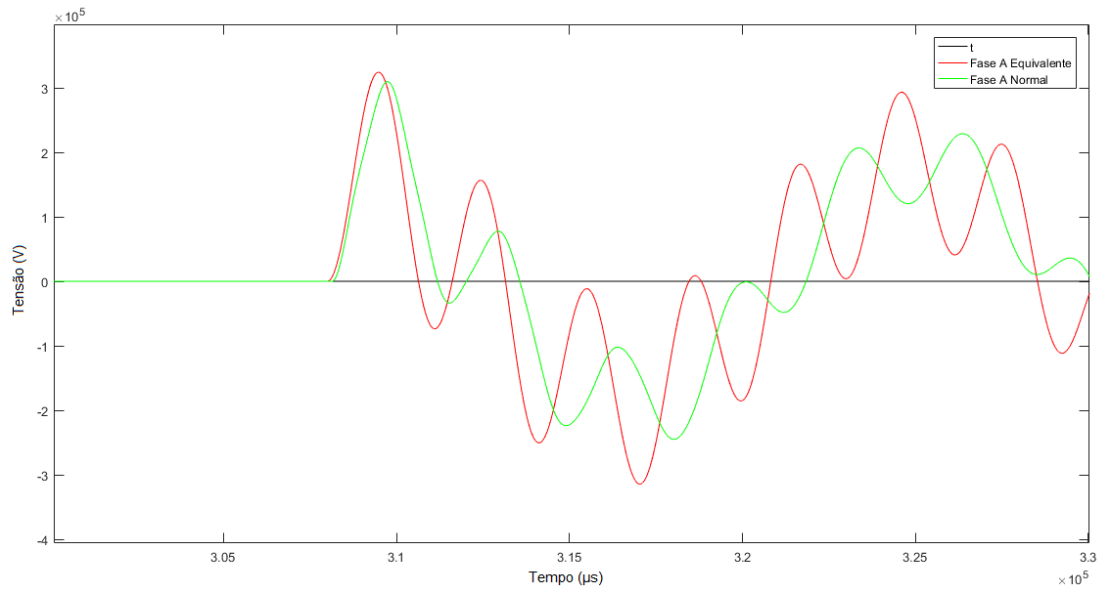
Figura 13 - Sistema para o método da Impedância Equivalente.



Fonte - Autor.

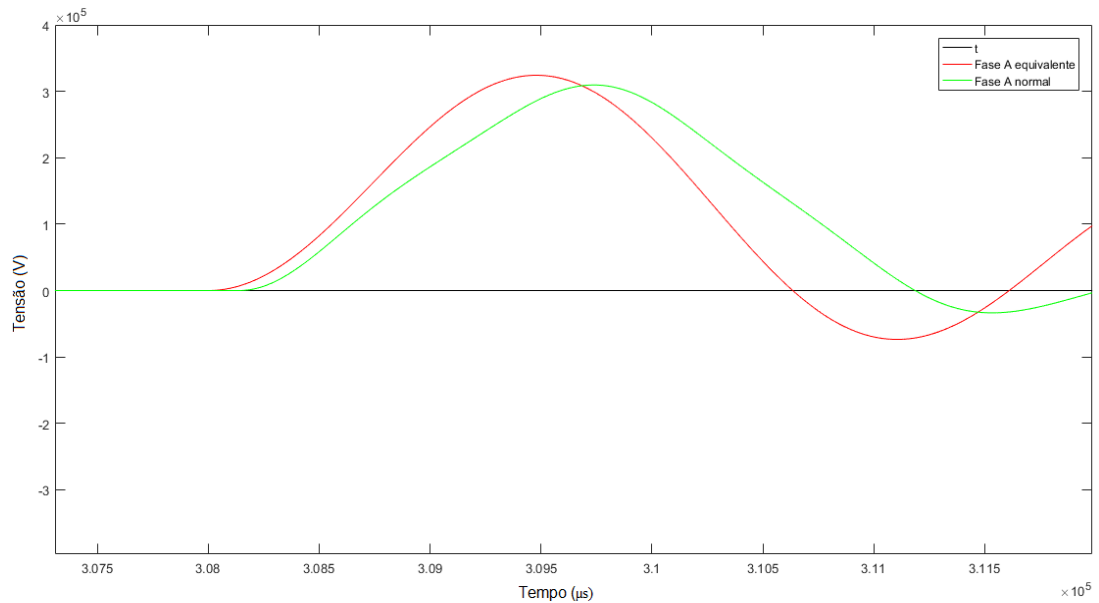
Concluindo a simulação e a comparação, nas Figuras 14 e 15, mostra-se o comparativo entre o sistema normal e o sistema do equivalente. Segundo a norma IEEE std. C37.011 – 2019 o meio ciclo inicial é o ponto mais importante para a análise de superação de disjuntores, pois esse é o momento mais crítico onde haverá ou não a violação da envoltória. A forma de onda após o meio ciclo inicial não tem tanto impacto na análise da superação.

Figura 14 - Comparação de TRTs do sistema radial com curto-circuito na barra 4.



Fonte - Autor.

Figura 15 - Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 4.



Fonte - Autor.

Como o método possui erros pelo fato de não ter 100% de igualdade entre a simulação do sistema completo e do sistema da impedância equivalente, foi calculado o erro de pico da amplitude no meio ciclo inicial, que é o ponto crítico para a análise das TRTs.

O cálculo do erro é dado pela equação 1.

$$\text{Erro (\%)} = 100 * \frac{\text{Valor equivalente} - \text{Valor simulado}}{\text{Valor simulado}} \quad (1)$$

Valor equivalente – pico de tensão do primeiro meio ciclo da TRT do sistema completo.

Valor simulado – pico de tensão do primeiro meio ciclo da TRT do sistema do equivalente.

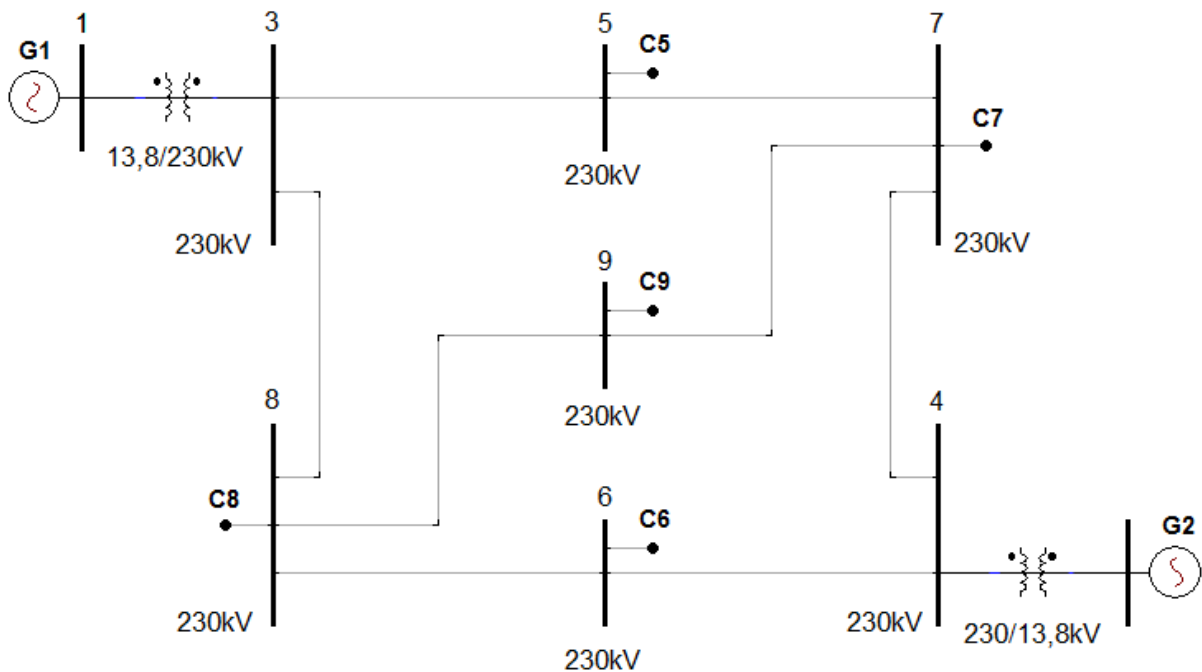
Para este caso do sistema radial de 5 barras o erro foi:

$$\text{Erro (\%)} = 100 * \frac{324\text{kV} - 310\text{kV}}{310\text{kV}} \quad \text{Erro} = 4,51\%$$

3.5 CASO 2 – SISTEMA MALHADO NOVE BARRAS

No segundo caso para o sistema malhado com nove barras mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Sistema malhado de nove barras.

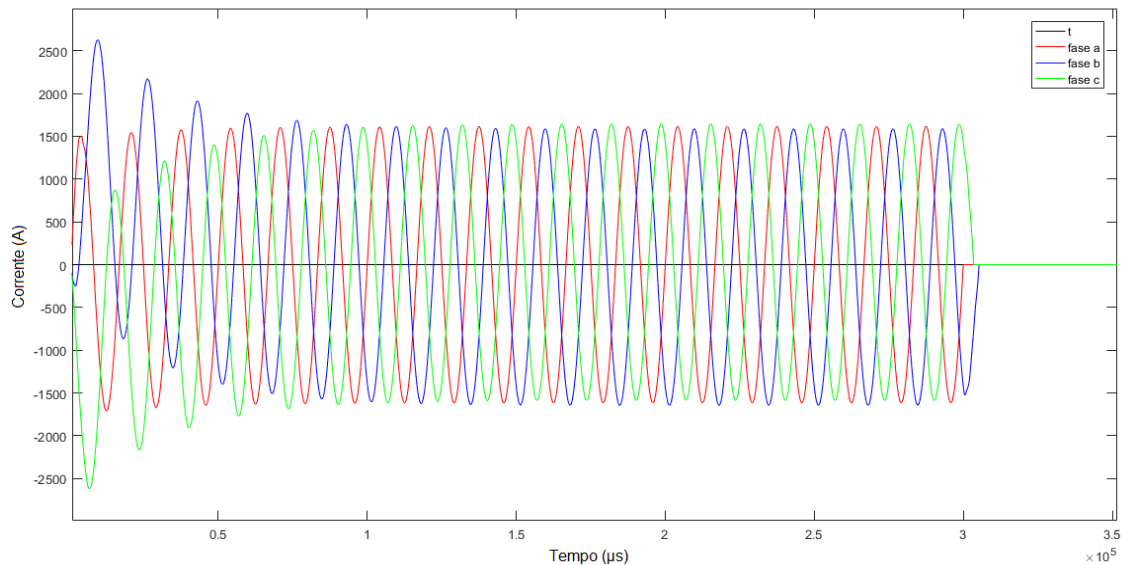


Fonte – (Alves, 2007).

3.5.1 Curto-circuito na barra 6

Simulando um curto-circuito trifásico (3ϕ) na barra 6, o valor simétrico da corrente curto-circuito simulada tem um valor aproximadamente de 1550 A, mostrada na Figura 17.

Figura 17 - Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 6.



Fonte - Autor.

Para o curto-circuito trifásico (3ϕ) na barra 6, foi feita uma transformação Δ -Y entre os barramentos 3, 7 e 8, depois feita uma associação em série com as indutâncias dos transformadores, posteriormente associação em paralelo e outra em série para chegar na impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor da barra 6. Na Tabela 2 de parâmetros os valores da impedância equivalente calculada.

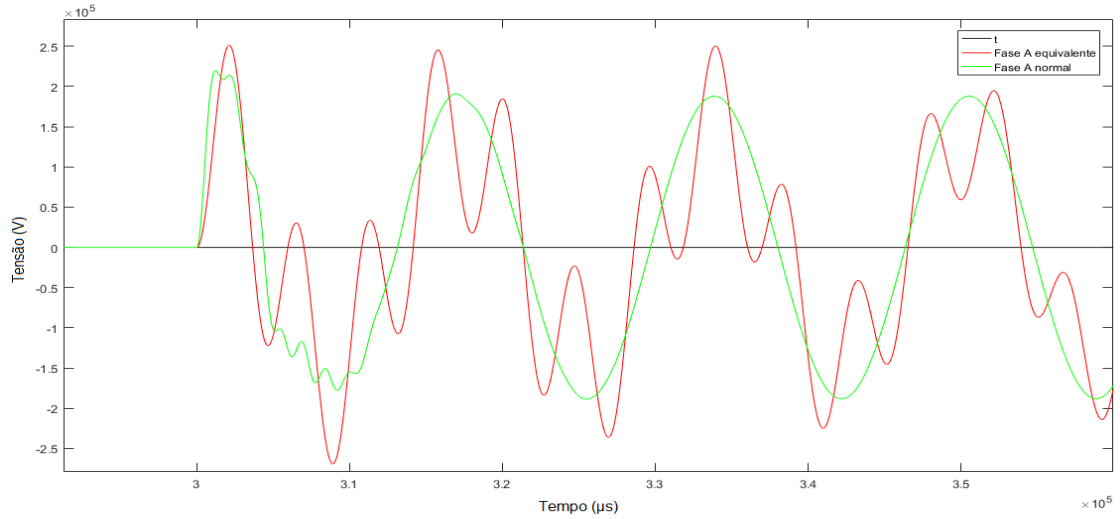
Tabela 2 - Parâmetros de impedância equivalente nos terminais da barra 6 do sistema malhado 9 barras.

Parâmetros	
R+ (Ω)	17,09
XL+ (Ω)	149,52
C+ (μf)	2,74

Fonte - Autor.

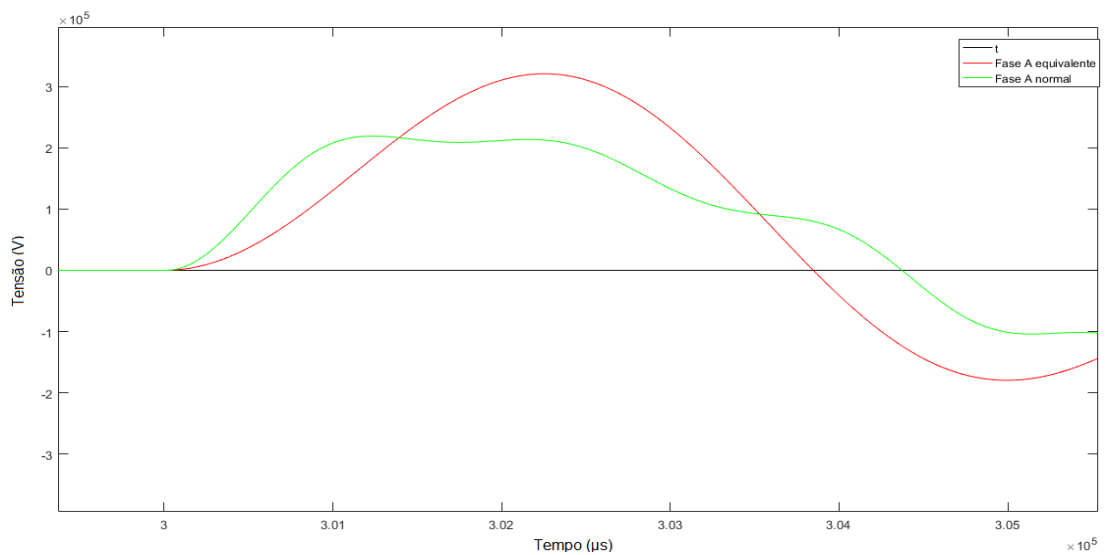
Foi feito o comparativo entre o sistema normal e o sistema do equivalente como mostram as Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Comparação de TRTs do sistema malhado com curto-circuito na barra 6.



Fonte - Autor.

Figura 19 - Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 6.



Fonte - Autor.

No meio ciclo inicial, pelo fato de o método não haver 100% de equivalência entre a simulação do sistema completo e da impedância equivalente, é esperado que tivessem alguns erros, e estes mesmo serão calculados no item 3.5.

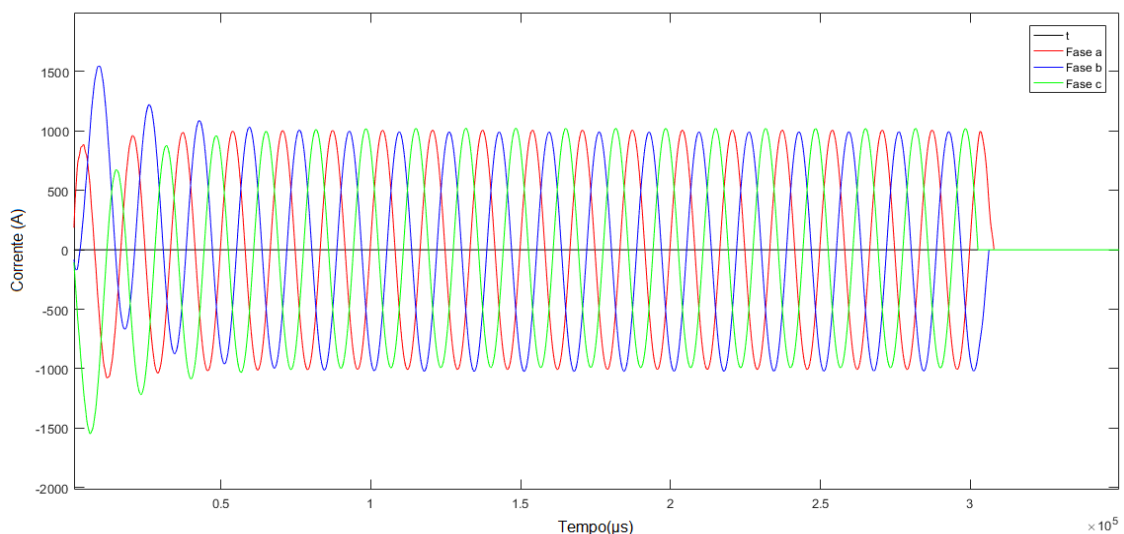
Para este caso do sistema malhado de 9 barras, com curto-circuito trifásico (3ϕ) na barra 6 o erro foi,

$$\text{Erro (\%)} = 100 * \frac{252kV - 220kV}{220kV} \quad \text{Erro} = 14,54\%$$

3.4.2 Curto-circuito na barra 7

O valor simétrico da corrente de curto-circuito simulada na barra 7 tem um valor de aproximadamente 1000 A, mostrada na Figura 20. Para esse curto-circuito primeiro foi feita uma transformação Δ -Y entre os barramentos 7, 8, e 4, depois feita uma associação em série com as indutâncias dos transformadores, posteriormente associação em paralelo e outra em série para chegar na impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor da barra 7. Seguindo o mesmo passo a passo do tópico 3.4.1 com valores referentes ao equivalente visto nos terminais do disjuntor 7-5, localizado entre as barras 5 e 7 do sistema, na Tabela 3 estão os valores deste equivalente.

Figura 20 - Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 7.



Fonte - Autor.

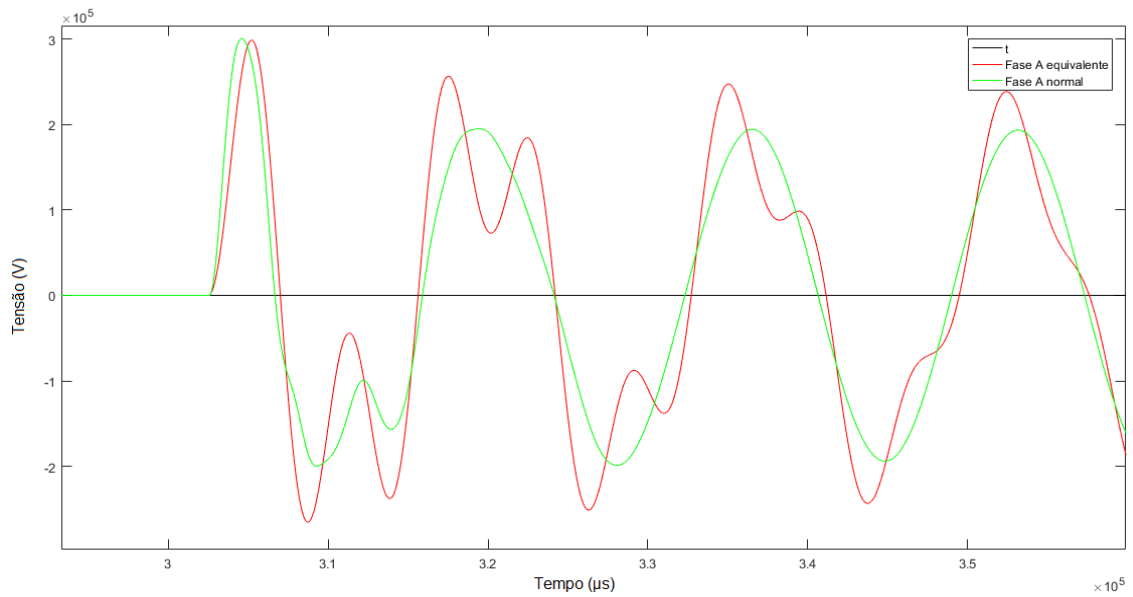
Tabela 3 - Parâmetros de impedância equivalente nos terminais da barra 7 do sistema malhado 9 barras.

Parâmetros	
R+ (Ω)	32,19
XL+ (Ω)	218,43
C+ (μf)	2,98

Fonte – Autor.

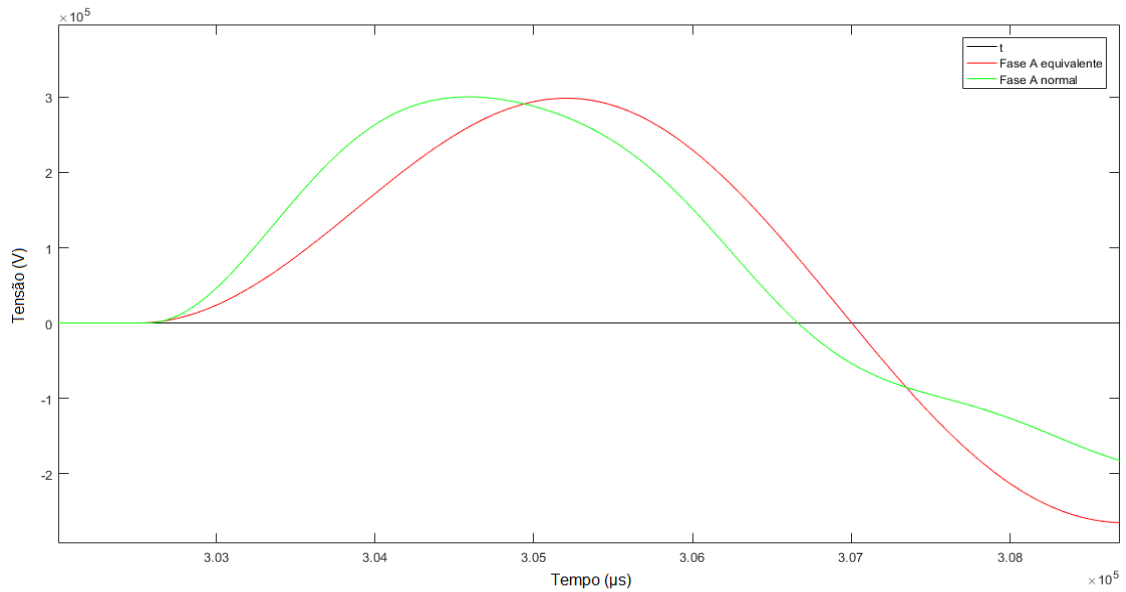
Fazendo o comparativo entre o sistema normal e o sistema do equivalente, chega-se às Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Comparação de TRTs do sistema malhado com curto-circuito na barra 7.



Fonte - Autor.

Figura 22 - Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 7.



Fonte – Autor.

Podemos verificar neste caso que o valor de tensão de pico é muito próxima no meio ciclo inicial, o que indica uma boa análise nesse curto-circuito.

Para este caso do sistema malhado de 9 barras, com curto-circuito trifásico (3ϕ) na barra 7 o erro foi,

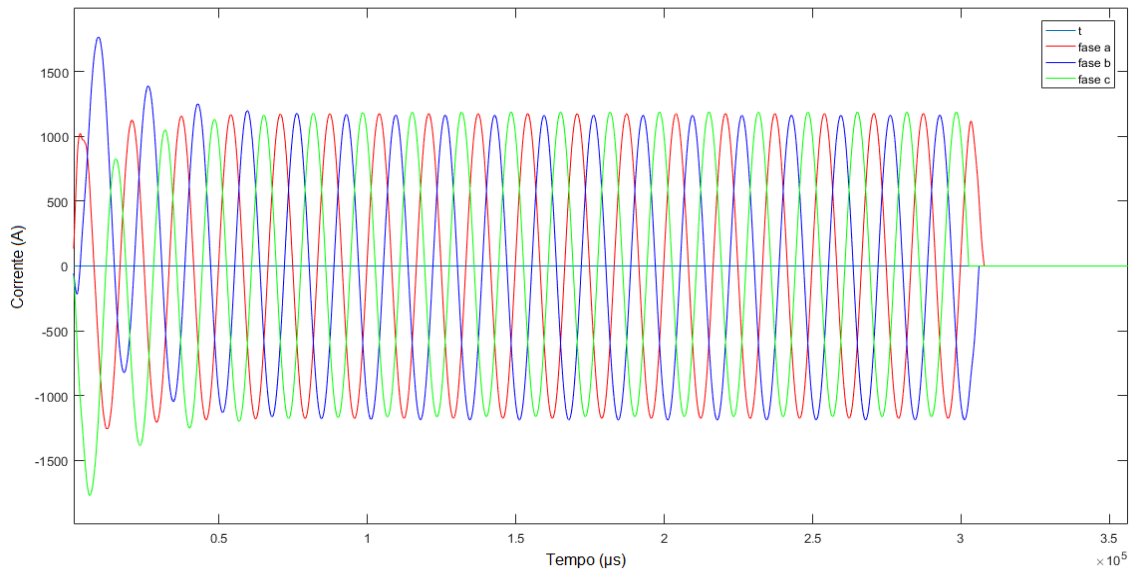
$$\text{Erro (\%)} = 100 * \frac{299kV - 301kV}{301kV} \quad \text{Erro} = -0,66\%$$

3.4.3 Curto-circuito na barra 9

O valor simétrico da corrente de curto-circuito simulada na barra 9 tem um valor de aproximadamente 1200 A, mostrada na Figura 23. Para esse curto-circuito primeiro foi feita uma transformação Δ -Y entre os barramentos 3, 4, e 8, depois feita uma associação em série com as indutâncias dos transformadores, posteriormente associação em paralelo para chegar na impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor da barra 9.

Seguindo o mesmo passo a passo do t3pico 3.4.1 com valores referentes ao equivalente visto nos terminais do disjuntor 9-8, localizado entre as barras 9 e 8 do sistema, na Tabela 4 est3o os valores deste equivalente.

Figura 23 - Corrente no disjuntor com curto-circuito no barramento 9.



Fonte - Autor.

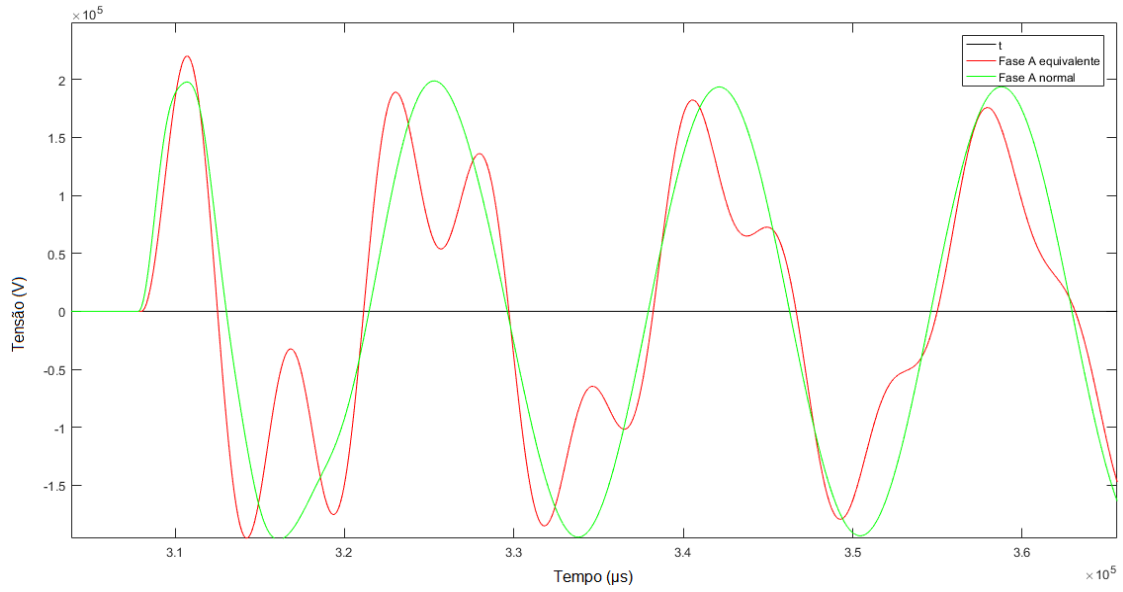
Tabela 4 - Parâmetros de impedância equivalente nos terminais da barra 9 do sistema malhado 9 barras.

Parâmetros	
R+ (Ω)	35,53
XL+ (Ω)	82,34
C+ (μf)	4,06

Fonte - Autor.

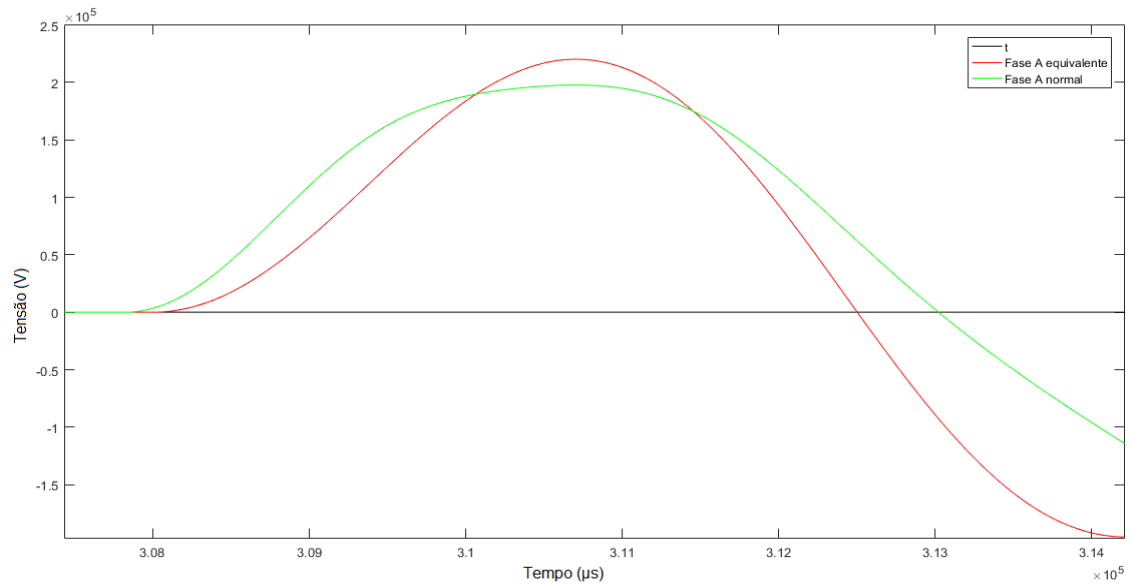
Foi feito o comparativo entre o sistema normal e o sistema do equivalente como mostram as Figuras 24 e 25. Neste caso a taxa de crescimento é próxima, porém a tensão de pico apresenta diferença.

Figura 24 - Comparação de TRTs do sistema malhado com curto-circuito na barra 9



Fonte - Autor.

Figura 25 - Comparação de TRTs no meio ciclo inicial barramento 9.



Fonte - Autor.

Para este caso do sistema malhado de 9 barras, com curto-circuito trifásico (3ϕ) na barra 6 o erro foi,

$$\text{Erro (\%)} = 100 * \frac{220kV - 200kV}{200kV}$$

$$\text{Erro} = 10,00\%$$

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentado o procedimento do método de cálculo da TRT pela impedância equivalente, mostrando que, com uma fonte de corrente ideal acionando a equivalência de impedância do sistema, gera-se uma TRT muito próxima a do sistema completo.

Foram analisadas e comparadas através do software ATP, as TRTs em sistema radial e malhado, mostrando que mesmo com complexidades diferentes no cálculo da impedância equivalente entre os sistemas, com alguns erros devido ao fato de não ter 100% de equivalência entre o sistema completo e o sistema com a impedância equivalente.

Apesar de apresentar erros consideráveis em alguns casos, é possível usar o método proposto como uma opção de triagem. Devido ao grande número de disjuntores em um sistema elétrico, a simulação da TRT, que já é um processo demorado, se torna complicada. Com este método, uma simulação rápida através do equivalente pode ser feita para encontrar a curva de TRT aproximada e determinar quais disjuntores estão em risco de superação. A partir daí, uma simulação completa e detalhada dos disjuntores em questão pode ser realizada, evitando a simulação de TRT de todos os disjuntores do sistema.

4 CONCLUSÃO

Com o crescimento dos sistemas elétricos de potência, o cálculo da TRT é de suma importância para o equilíbrio e proteção destes, pois ajuda no dimensionamento dos equipamentos e na prevenção de possíveis falhas ou até mesmo danos irreversíveis ao equipamento.

Este trabalho propôs a análise e simulação de um método de cálculo de TRT que conseguiu ter resultados com teor de precisão próximo aos de uma TRT com sistema completo. Mesmo utilizando o ATP, se conclui que o método da impedância equivalente pode acelerar o processo de análise dos transitórios eletromagnéticos em disjuntores, pois o circuito do sistema equivalente é mais simples de ser implementado e simulado no ATP.

Quanto às simulações, podemos observar que a corrente que utilizamos no método foi a corrente simétrica, visto que a corrente assimétrica influenciaria na precisão do método devido à oscilação da TRT no meio ciclo inicial.

Portanto, de modo geral verifica-se que o método de cálculo da TRT pela impedância equivalente teve bons resultados, partindo de que a comparação entre as TRTs foram muito próximas no meio ciclo inicial, tanto quanto à taxa de crescimento, quanto na amplitude da curva. Conclui-se então, como mencionado anteriormente, que o método proposto pode servir como um processo de triagem nos disjuntores do sistema, identificando possíveis riscos.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Depois de uma pesquisa em determinado tema, sempre ficam alguns possíveis temas relacionados a este mesmo para uma pesquisa futura, dentro do tema proposto neste trabalho, ficam sugestões para a realização de novas pesquisas.

- Superação de disjuntores de alta tensão com simulação de casos reais.
- Buscar e analisar outros métodos de cálculo de TRT para comparação.
- Refinação do método para redução dos erros
- Automatização do processo de cálculo da impedância equivalente.

REFERÊNCIAS

ALVES, Rimon. **Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)**, Belo Horizonte, maio de 2012, Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/VRNS-9RMMHK/1/monografia_rimon_alves_tensao_de_restabelecimento_transitoria.pdf>

ALVES, W. F. **Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2007. 332f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR IEC 62271-200**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR IEEE C37.011**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AZEVÊDO, Wilker Victor. **Contribuições para Análise e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória**, Campina Grande, março de 2010, Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp124900.pdf>>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Capacidade de geração de energia elétrica cresce 357 MW**. Fevereiro de 2017.

FENOCCHIO, Giovana. **Modelagem de Transformadores de Potência para Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória**. Rio de Janeiro, dezembro de 2013. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/11538/1/monopoli10009062.pdf>>

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais**, 2012, Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fisica_da_soldagem1.pdf>

NOBRE, Diana. **Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV as Solicitações de TRT**. Campina Grande, novembro de 1999. Disponível em: <[file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/arquivototal%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/arquivototal%20(2).pdf)>

OLIVEIRA, Patrícia; ZANETTA, Luiz. - **Cálculo da TCTRT - Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória**. São Paulo 2017 – Brasil. Disponível em:

<<https://ssl4799.websitesequero.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/SBSE20160036.pdf>>

RABITO, Caio; PALOMA, Rodrigo; SILVESTRI, Tatiane. **Especificação de Disjuntores de Alta Tensão com base na Superação por Curto-circuito e Tensão de Restabelecimento Transitória**. Curitiba 2011. Disponível em:

<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/330/1/CT_COELE_2011_2_07.pdf>

RODRIGUES, Rusângela. **Influência do Arco Elétrico em Disjuntores para Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória**, Campina Grande, Outubro de 2010, Disponível em:

<<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/3308/1/RUS%20NGEL A%20RODRIGUES%20GUIDO%20CAVALCANTI%20-%20DISSERTA%2087%2083O%20PPGEE%202010..pdf>>

SINDER, Daniel. **Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão**.

Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

SLAMECKA, E. **Prüfung von Hochspannungs-Leistungsschaltern**. New York: Springer-Verlag, 1966.

STEURER, Michael; HRIBERNIK, Wolfgang; BRUNKE, John H. **Calculating the Transient Recovery Voltage Associated With Clearing Transformer Determined Faults by Means of Frequency Response Analysis**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19 1, January 2004.

WISBECK, John. **Teorema de Thévenin** – aulas Cap 6, Ufrgs, Porto Alegre – Rio Grande do Sul – 2001. Disponível em:

<http://www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/cap_06/thevenin.htm>

ANEXOS

ANEXO A – DADOS DO SISTEMA RADIAL CINCO BARRAS

As tabelas de A.1 a A.4, mostram os dados do sistema radial cinco barras utilizadas no caso 1. Elas contêm os dados de linha, de transformador, de carga e de gerador.

Tabela A.1 - Dados de linha em pu sistema 5 barras.

Linhas	R+ (%)	X+ (%)	B (MVA _r)
2 - 3	1,5	8	15
3 - 4	0,9	7,9	16
4 - 5	3	15	35

Fonte - Autor.

Tabela A.2 - Dados de transformador em pu sistema 5 barras.

Transformador	Ligação (kV)	X+ (%)
1-2	13,8 / 230	5,34

Fonte - Autor.

Tabela A.3 - Dado do gerador sistema 5 barras.

Gerador	Tensão (kV)
1	13,8

Fonte - Autor.

Tabela A.4 - Dados de carga sistema 5 barras.

Carga	P (MW)	Q (MVAr)
3	55	27
5	35	15

Fonte – Autor.

R_+ - Resistência de sequência positiva.

X_+ - Reatância de sequência positiva.

B – Susceptância shunt.

P – Potência ativa.

Q – Potência reativa.

ANEXO B – DADOS DO SISTEMA MALHADO NOVE BARRAS

As tabelas de B.1 a B.4, mostram os dados do sistema malhado nove barras utilizadas no caso 2. Elas contêm os dados de linha, de transformador, de carga e de gerador.

Tabela B.1 - Dados de linha em pu sistema 9 barras.

Linhas	R+ (%)	X+ (%)	B (MVar)
3 - 5	1,7	9,2	15,8
3 - 8	1,0	8,5	17,6
4 - 6	0,85	7,2	14,9
4 - 7	0,9	7,9	16,2
5 - 7	3,2	16,1	30,6
6 - 8	1,1	8,4	25,6
7 - 9	1,19	10,08	20,9
8 - 9	3,9	17,0	35,8

Fonte – Alves, 2007.

Tabela B.2 - Dados de transformador em pu sistema 9 barras.

Tranformador	Ligação (kV)	X+ (%)
1 - 3	13,8 / 230	5,34
2 - 4	13,8 / 230	7,68

Fonte – Alves, 2007.

Tabela B.3 - Dados de gerador sistema 9 barras.

Gerador	Tensão (kV)
1	13,8
2	13,8

Fonte – Alves, 2007.

Tabela B.4 - Dados de carga sistema 9 barras.

Carga	P (MW)	Q (MVAr)
5	55	27
6	37	18
7	68	45
8	90	35
9	75	28

Fonte – Alves, 2007.

R_+ - Resistência de sequência positiva.

X_+ - Reatância de sequência positiva.

B – Susceptância shunt.

P – Potência ativa.

Q – Potência reativa.