

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Cezar Augusto da Silva Oliveira

**ANÁLISE DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM  
DISJUNTOR DE ALTA TENSÃO: ESTUDO DE CASO EM UMA  
INSTALAÇÃO ELÉTRICA INDUSTRIAL**

**Cezar Augusto da Silva Oliveira**

**ANÁLISE DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTOR DE ALTA  
TENSÃO: ESTUDO DE CASO EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA INDUSTRIAL**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título **de Mestre em Engenharia Elétrica.**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Oliveira, Cezar Augusto da Silva

Instalação Elétrica Análise da Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntor de Alta Tensão: Estudo de Caso em uma Industrial / Cezar Augusto da Silva Oliveira. - 2021.  
102p.; 30cm

Orientador: Adriano Peres de Moraes  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Santa Maria, RS, 2021.

1. Tensão de Restabelecimento Transitória
2. Disjuntor
3. Modelagem Analítica
4. ATPDraw.

---

©2021

Todos os direitos autorais reservados a Cezar Augusto da Silva Oliveira. A reprodução de partes ou todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: oliveiracezara@gmail.com

Santa Maria, RS  
2021

**Cezar Augusto da Silva Oliveira**

**ANÁLISE DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTOR DE ALTA TENSÃO: ESTUDO DE CASO EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA INDUSTRIAL**

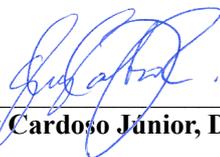
Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em Junho de 2021:**



---

**Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Ghendy Cardoso Júnior, Dr. (UFSM)**



---

**Chrystian Dalla Lana da Silva, Dr. (UNIPAMPA)**

## DEDICATÓRIA

*Aos meus familiares, em especial à minha esposa Sandra Stafford Vasconcelos e ao meu filho Anthony Gabriel Stafford Oliveira por toda compreensão na ausência que tive no dia-a-dia durante este desafio. Dedico a minha mãe Juvina Luiza da Silva Oliveira e ao meu pai Sizino Brião de Oliveira (em memória) que me ensinaram sobre a vida, educação e como ser digno ao outro ser humano. Ao meu irmão Nedis de Jesus da Silva Oliveira por cuidar os meus pais em casa e permitir que desta forma pudesse dar continuidade em meus estudos e realização dos meus sonhos. Dedico-lhes esta conquista a todos vocês.*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus em primeiro lugar por ter me dado saúde, força e fé para continuar batalhando por meus objetivos e vencendo os desafios.*

*Agradeço aos meus familiares, minha esposa e o meu filho, principalmente, pela compreensão da minha ausência em casa e nos finais de semana ou, muitas vezes, não poder dar a atenção necessária em função da necessidade de dedicação aos estudos.*

*Ao Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes por me aceitar como orientando, pelo tempo disposto durante todo o período do desenvolvimento desta pesquisa, inclusive em domingos e feriados. E, também, por incentivar na continuidade neste estudo, principalmente nos momentos difíceis que enfrentei em minha vida.*

*Agradeço também ao Prof. Dr. Luiz Fernando de Freitas Gutierrez pelos ensinamentos sobre o tema deste trabalho, suas contribuições foram fundamentais para alcançar os objetivos.*

*Ao colega Eng. Me. Ângelo Felipe Sartori pelo companheirismo nas longas viagens para Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em busca de novos conhecimentos.*

*Encaminho também meu agradecimento ao Eng. Me. Gilson Batista por toda a colaboração na pesquisa frente a este desafio. Além disso, agradeço ao meu colega e amigo Eng. Eletricista Mauricio Rosa, por ajudar a conseguir informações técnicas para elaboração deste trabalho, bem como, incentivo no dia-a-dia.*

*À UFSM pela oportunidade de realizar o Mestrado no qual adquiri conhecimentos teórico-práticos de alta qualidade.*

*Para finalizar, agradeço a todos os colegas, servidores e professores do PPGEE pela dedicação, amizade e cordialidade.*

## RESUMO

### ANÁLISE DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTOR DE ALTA TENSÃO: ESTUDO DE CASO EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA INDUSTRIAL

AUTOR: Cezar Augusto da Silva Oliveira

ORIENTADOR: Adriano Peres de Moraes

O sistema elétrico é passível a diversos tipos de ocorrências de falhas, curtos-circuitos e condições anormais de operação, assim, produzindo transitórios na rede. Por estes motivos, é fundamental que os disjuntores desempenhem seu papel para garantir a proteção e integridade nas instalações elétricas. Desta forma, exigem atenção especial em seu dimensionamento e estudos de superação por Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRTs). Os tipos de falhas mais comuns em instalações elétricas é o curto-circuito, logo, as impedâncias equivalentes no sistema elétrico sofrem alterações. Com isso, aumentam riscos operacionais dos disjuntores já instalados e superação por TRT. Frente a tudo isso, existem padrões IEEE STD C37.011-2011 e IEEE STD C37.04b-2008 que são guias técnicos para a análise e a especificação de disjuntores, estabelecendo capacidades máximas para evitar a superação frente a TRT. Estes padrões auxiliaram no entendimento e na avaliação do disjuntor objeto deste estudo de caso. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho com foco na TRT de um disjuntor isolado à gás SF<sub>6</sub> de uma subestação de 69 kV localizada em uma instalação elétrica industrial. Diferentes cenários de estudos são averiguados como, por exemplo, circuito completo representando as instalações elétricas da subestação e circuito elétrico simplificado desta subestação. Além disso, para esta análise de TRT foram utilizados valores de capacitâncias intrínsecas reais dos equipamentos e também valores recomendados pelo padrão IEEE STD C37.011. Ainda, provocou-se alterações nas impedâncias equivalentes da rede elétrica e no nível de tensão, pressupondo uma mudança nas características do sistema elétrico do agente distribuidor. As simulações foram executadas através do EMTP/ATP e do seu pré-processador gráfico ATPDraw. Os resultados mostram a necessidade de realizar uma análise TRT detalhada durante o desenvolvimento do projeto de uma subestação, para garantir o dimensionamento adequado do disjuntor para uma aplicação específica. Outro objetivo deste trabalho foi modelar analiticamente o circuito elétrico simplificado das instalações elétricas da subestação. Logo, com esta equação matemática reproduziu-se um sinal de TRT e comparou-se este sinal com os resultados apresentados pelos *softwares* ATP/EMTP e PSIM. Dessa forma, o trabalho contribui também pelo desenvolvimento da modelagem analítica apresentada para análise de TRT, pois o resultado do sinal de TRT encontrado por meio deste método proposto, foi satisfatório e condizente, assim, tornando-se uma ferramenta para comparação de resultado neste estudo de caso.

Palavras-chave: Tensão de Restabelecimento Transitória, Disjuntor, Modelagem Analítica, ATPDraw.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF THE TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE IN HIGH VOLTAGE BREAKER: CASE STUDY IN AN INDUSTRIAL ELECTRICAL INSTALLATION**

AUTHOR: Cezar Augusto da Silva Oliveira  
ADVISOR: Adriano Peres de Moraes

The electrical system is subject to several types of failure occurrences, short circuits and abnormal operating conditions, thus producing transients in the network. For these reasons, it is essential that circuit breakers play their role in ensuring the protection and integrity of electrical installations. Thus, they require special attention in their dimensioning and studies of overcoming by Transient Recovery Voltages (TRVs). The most common types of faults in electrical installations are short circuits, so the equivalent impedances in the electrical system undergo changes. As a result, operational risks of circuit breakers already installed and overrun by TRV increase. In view of all this, there are IEEE STD C37.011-2011 and IEEE STD C37.04b-2008 standards that are technical guides for the analysis and specification of circuit breakers, establishing maximum capacities to avoid overruns against TRV. These patterns helped in the understanding and evaluation of the circuit breaker object of this case study. Thus, this study aims to evaluate the performance with a focus on TRV of an SF6 gas insulated circuit breaker from a 69 kV substation located in an industrial electrical installation. Different study scenarios are investigated such as, for example, complete circuit representing the electrical installations of the substation and simplified electrical circuit of this substation. In addition, for this TRV analysis, the actual intrinsic capacitance values of the equipment and values recommended by the IEEE STD C37.011 standard were used. Furthermore, changes were caused in the equivalent impedances of the electrical network and in the voltage level, presupposing a change in characteristics of the electrical system of the distributor agent. The simulations were performed using EMTP/ATP and its ATPDraw graphics preprocessor. The results show the need to carry out a detailed TRV analysis during the development of a substation project, to ensure the proper sizing of the circuit breaker for a specific application. Another objective of this work was to analytically model the simplified electrical circuit of the electrical installations of the substation. Therefore, with this mathematical equation a TRV signal was reproduced, and this signal was compared with the results presented by the ATP/EMTP and PSIM software. Thus, the work also contributes to the development of analytical modeling presented for TRV analysis. The result of the TRV signal found through this proposed method was satisfactory and consistent, thus becoming a tool for comparing the result in this case study.

Keywords: Transient Recovery Voltage, Circuit breaker, Analytical Modeling, ATPDraw.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Disjuntor sem superação por TRT.....  | 29 |
| Figura 2 - Disjuntor superado por TRT.....   | 30 |
| Figura 3 - Valor máximo TRT versus Tensão. ....  | 30 |
| Figura 4 - Sistema elétrico elementar para o surgimento da TRT exponencial.....            | 31 |
| Figura 5 - Forma de onda elementar da TRT exponencial. ....                                | 32 |
| Figura 6 - Sistema elétrico elementar para surgimento da TRT oscilatória.....              | 32 |
| Figura 7 - Forma de onda elementar da TRT oscilatória. ....                                | 32 |
| Figura 8 - Sistema elétrico elementar para surgimento da TRT triangular.....               | 33 |
| Figura 9 - Forma de onda elementar da TRT triangular. ....                                 | 33 |
| Figura 10 - Envoltória de dois parâmetros. ....  | 34 |
| Figura 11 - Envoltória de quatro parâmetros. ....  | 35 |
| Figura 12 - Ilustra os limites das envoltórias em regime T10, T30, T60 e T100. ....        | 38 |
| Figura 13 - Características dos sinais durante interrupção de um curto-circuito. ....      | 39 |
| Figura 14 - Disjuntor de alta tensão. ....   | 41 |
| Figura 15 - Diagrama unifilar da subestação elétrica. ....                                 | 42 |
| Figura 16 - Circuito elétrico completo com capacitâncias distribuídas.....                 | 49 |
| Figura 17 - Circuito elétrico simplificado com capacitâncias de acordo com modelo PI. .... | 50 |
| Figura 18 - Circuito elétrico simplificado com capacitância concentrada. ....              | 52 |
| Figura 19 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.....        | 54 |
| Figura 20 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.....          | 55 |
| Figura 21 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.....        | 56 |
| Figura 22 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.....          | 57 |
| Figura 23 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60.....        | 58 |
| Figura 24 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60.....          | 59 |
| Figura 25 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100.....       | 60 |
| Figura 26 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.....         | 61 |
| Figura 27 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.....        | 63 |
| Figura 28 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.....          | 63 |
| Figura 29 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.....        | 64 |
| Figura 30 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.....          | 65 |
| Figura 31 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60.....        | 66 |
| Figura 32 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60.....          | 66 |
| Figura 33 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100.....       | 67 |
| Figura 34 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.....         | 68 |
| Figura 35 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.....        | 70 |
| Figura 36 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.....          | 71 |
| Figura 37 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.....        | 72 |
| Figura 38 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.....          | 73 |
| Figura 39 - Sinais das TRTs obtido no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60. ....        | 74 |
| Figura 40 - Sinais das TRTs obtido no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60. ....          | 75 |
| Figura 41 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100.....       | 76 |
| Figura 42 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.....         | 77 |
| Figura 43 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.....        | 79 |
| Figura 44 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.....          | 80 |
| Figura 45 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.....        | 81 |
| Figura 46 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.....          | 82 |
| Figura 47 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60.....        | 83 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 48 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60. ....   | 84 |
| Figura 49 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100..... | 85 |
| Figura 50 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.....   | 86 |
| Figura 51 - Circuito simplificado utilizado na modelagem analítica. ....             | 88 |
| Figura 52 - Nomenclatura dos elementos no circuito.....                              | 89 |
| Figura 53 - Circuito elétrico simulado no PSIM. ....                                 | 94 |
| Figura 54 - Circuito no PSIM com a Função de Transferência. ....                     | 95 |
| Figura 55 - Sinais das TRTs obtidos através do <i>software</i> MATLAB - T10.....     | 96 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados de capacitâncias intrínsecas.....                                    | 43 |
| Tabela 2 - Dados dos instrumentos TC e TP.....  | 43 |
| Tabela 3 - Dados técnicos dos cabos. ....   | 43 |
| Tabela 4 - Parâmetros dos equivalentes na rede. ....                                  | 44 |
| Tabela 5 - Valores mínimos, médios e máximos de capacitâncias em (pF). ....           | 44 |
| Tabela 6 - Alterações nos equivalentes na fonte.....                                  | 44 |
| Tabela 7 - Valores das correntes de curto-circuito entre PTW vs ATP/EMTP.....         | 45 |
| Tabela 8 - Parâmetros de impedâncias no circuito completo. ....                       | 49 |
| Tabela 9 - Valores de capacitâncias do circuito completo. ....                        | 50 |
| Tabela 10 - Parâmetros de impedâncias do circuito simplificado. ....                  | 51 |
| Tabela 11 - Valores de capacitâncias parasitas. ....                                  | 51 |
| Tabela 12 - Valores de capacitâncias especificado pela (IEEE STD C37.011, 2011). .... | 52 |
| Tabela 13 - Parâmetros de capacitâncias intrínsecas. ....                             | 53 |
| Tabela 14 - Parâmetros de impedâncias do circuito simplificado. ....                  | 89 |
| Tabela 15 - Apresenta as impedâncias e Transformada de Laplace. ....                  | 93 |
| Tabela 16 - Parâmetros usados na configuração do circuito. ....                       | 94 |
| Tabela 17 - Parâmetros utilizados na Equação 23. ....                                 | 94 |
| Tabela 18 - Parâmetros utilizados no circuito com a Função de Transferência.....      | 95 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                  |  |
|------------------|--|
| ATP              | <i>Alternative Transients Program</i>                            |
| CC               | Curto-circuito   |
| EMTP             | <i>Electromagnetic Transients Program</i>                        |
| FT               | Função de Transferência  |
| GVO              | Grande Volume de Óleo  |
| IEEE             | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>         |
| LKC              | Lei de Kirchhoff para Corrente Elétrica                          |
| ONS              | Operador Nacional do Sistema Elétrico                            |
| PTW              | <i>Power Tools for Windows</i>                                   |
| PVO              | Pequeno Volume de Óleo   |
| SEP              | Sistema Elétrico de Potência                                     |
| SOGI-ANF         | <i>Second Order Generalized Integrator-Adaptive Notch Filter</i> |
| SF6              | Hexafluoreto de Enxofre  |
| TC               | Transformador de Corrente  |
| TCTRT            | Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória    |
| TRT              | Tensão de Restabelecimento Transitória                           |
| TP               | Transformador de Potencial                                       |
| ZnO              | Óxido de Zinco   |
| SnO <sub>2</sub> | Óxido de Estanho   |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Critérios para análise de superação. ....                       | 27 |
| Quadro 2 - Valores para definição das envoltórias de dois parâmetros. .... | 37 |
| Quadro 3 - Resultados obtidos nas simulações em regime T10. ....           | 54 |
| Quadro 4 - Valores encontrados nas simulações em regime T10. ....          | 55 |
| Quadro 5 - Resultados extraídos nas simulações em regime T30. ....         | 56 |
| Quadro 6 - Valores obtidos nas simulações em regime T30. ....              | 57 |
| Quadro 7 - Resultados encontrados nas simulações em regime T60. ....       | 58 |
| Quadro 8 - Valores extraídos nas simulações em regime T60. ....            | 59 |
| Quadro 9 - Resultados obtidos nas simulações em regime T100. ....          | 60 |
| Quadro 10 - Valores encontrados nas simulações em regime T100. ....        | 61 |
| Quadro 11 - Resultados extraídos nas simulações em regime T10. ....        | 64 |
| Quadro 12 - Valores obtidos nas simulações em regime T30. ....             | 65 |
| Quadro 13 - Resultados encontrados nas simulações em regime T60. ....      | 67 |
| Quadro 14 - Valores extraídos nas simulações em regime T100. ....          | 68 |
| Quadro 15 - Valores encontrados nas simulações em regime T10. ....         | 70 |
| Quadro 16 - Resultados extraídos nas simulações em regime T10. ....        | 71 |
| Quadro 17 - Valores obtidos nas simulações em regime T30. ....             | 72 |
| Quadro 18 - Resultados encontrados nas simulações em regime T30. ....      | 73 |
| Quadro 19 - Valores extraídos nas simulações em regime T60. ....           | 74 |
| Quadro 20 - Resultados obtidos nas simulações em regime T60. ....          | 75 |
| Quadro 21 - Valores encontrados nas simulações em regime T100. ....        | 76 |
| Quadro 22 - Resultados extraídos nas simulações em regime T100. ....       | 77 |
| Quadro 23 - Valores obtidos nas simulações em regime T10. ....             | 79 |
| Quadro 24 - Resultados encontrados nas simulações em regime T10. ....      | 80 |
| Quadro 25 - Valores extraídos nas simulações em regime T30. ....           | 81 |
| Quadro 26 - Resultados obtidos nas simulações em regime T30. ....          | 82 |
| Quadro 27 - Valores encontrados nas simulações em regime T60. ....         | 83 |
| Quadro 28 - Resultados extraídos nas simulações em regime T60. ....        | 84 |
| Quadro 29 - Valores obtidos nas simulações em regime T100. ....            | 85 |
| Quadro 30 - Resultados encontrados nas simulações em regime T100. ....     | 86 |

# SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>16</b> |
| 1.1          | CONSIDERAÇÕES GERAIS   | 16        |
| 1.2          | OBJETIVOS  | 17        |
| <b>1.2.1</b> | <b>Objetivos Gerais</b>  | <b>17</b> |
| <b>1.2.2</b> | <b>Objetivos Específicos</b>   | <b>17</b> |
| 1.3          | MOTIVAÇÃO  | 18        |
| 1.4          | CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO   | 19        |
| 1.5          | ESTADO DA ARTE   | 19        |
| 1.6          | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO   | 22        |
| <b>2</b>     | <b>DISJUNTORES DE PROTEÇÃO</b>   | <b>23</b> |
| 2.1          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS   | 23        |
| 2.2          | PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS DISJUNTORES   | 23        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Disjuntores isolados a SF6</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.2.2</b> | <b>Disjuntores isolados a óleo</b>   | <b>24</b> |
| <b>2.2.3</b> | <b>Disjuntores isolados a ar comprimido</b>  | <b>25</b> |
| <b>2.2.4</b> | <b>Disjuntores isolados a vácuo</b>  | <b>26</b> |
| 2.3          | SUPERAÇÃO EM DISJUNTORES   | 26        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Superação por corrente de carga</b>   | <b>27</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Superação por corrente de curto-circuito</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.3.3</b> | <b>Superação por relação X/R da rede (Constante de Tempo)</b>                                  | <b>27</b> |
| <b>2.3.4</b> | <b>Superação por TRT</b>   | <b>28</b> |
| 2.4          | FORMAS DE ONDA DA TRT  | 31        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Limites de TRT definidos em padrões e regulamentações</b>                                   | <b>33</b> |
| 2.4.1.1      | <i>TAXA DE AUMENTO DA TENSÃO DE RECUPERAÇÃO (TCTRT)</i>  | 34        |
| <b>2.4.2</b> | <b>Limite inferior inicial da TRT</b>  | <b>35</b> |
| 2.5          | ARCO ELÉTRICO  | 38        |
| 2.6          | CONSIDERAÇÕES FINAIS   | 40        |
| <b>3</b>     | <b>MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO TESTE EM ESTUDO</b>   | <b>41</b> |
| 3.1          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS   | 41        |
| 3.2          | SISTEMA ELÉTRICO DE TESTE  | 41        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Diagrama unifilar</b>   | <b>42</b> |
| 3.3          | MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO TESTE NO ATPDRAW   | 45        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Fonte de alimentação</b>  | <b>46</b> |
| <b>3.3.2</b> | <b>Trechos de cabos</b>  | <b>46</b> |
| <b>3.3.3</b> | <b>Capacitâncias intrínsecas</b>   | <b>46</b> |
| <b>3.3.4</b> | <b>Disjuntor</b>   | <b>47</b> |
| <b>3.3.5</b> | <b>Curto-circuito</b>  | <b>47</b> |
| 3.4          | CONSIDERAÇÕES FINAIS   | 47        |
| <b>4</b>     | <b>ESTUDO DE CASO</b>  | <b>48</b> |
| 4.1          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS   | 48        |
| <b>4.1.1</b> | <b>Circuitos elétricos investigados</b>  | <b>48</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b>Circuito elétrico completo com capacitâncias distribuídas</b>                               | <b>48</b> |
| <b>4.1.3</b> | <b>Circuito elétrico simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com o modelo PI</b> | <b>50</b> |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| <b>4.1.4</b> | <b>Circuito elétrico simplificado com capacitâncias concentradas.....</b>   | <b>52</b>  |
| <b>4.2</b>   | <b>RESULTADOS DAS MODELAGENS COMPUTACIONAIS NO ATPDRAW .....</b>  | <b>53</b>  |
| <b>4.2.1</b> | <b>Modelagem do circuito completo vs circuito simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com o modelo PI .....</b>                                     | <b>53</b>  |
| 4.2.1.1      | <i>Cenário regime - T10.....</i>  | 53         |
| 4.2.1.2      | <i>Cenário regime - T30.....</i>  | 55         |
| 4.2.1.3      | <i>Cenário regime - T60.....</i>  | 57         |
| 4.2.1.4      | <i>Cenário regime - T100.....</i>   | 59         |
| 4.2.1.5      | <i>Análise dos resultados .....</i>   | 61         |
| <b>4.2.2</b> | <b>Modelagem do circuito elétrico simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com o modelo PI vs circuito com capacitância concentrada.....</b>         | <b>62</b>  |
| 4.2.2.1      | <i>Cenário regime - T10.....</i>  | 62         |
| 4.2.2.2      | <i>Cenário regime - T30.....</i>  | 64         |
| 4.2.2.3      | <i>Cenário regime - T60.....</i>  | 65         |
| 4.2.2.4      | <i>Cenário regime - T100.....</i>   | 67         |
| 4.2.2.5      | <i>Análise dos resultados .....</i>   | 68         |
| <b>4.2.3</b> | <b>Modelagem no ATPDRAW circuitos com capacitâncias definidas pela norma IEEE std c37.011 (2011) .....</b>  | <b>69</b>  |
| 4.2.3.1      | <i>Cenário regime - T10.....</i>  | 69         |
| 4.2.3.2      | <i>Cenário regime - T30.....</i>  | 71         |
| 4.2.3.3      | <i>Cenário regime - T60.....</i>  | 73         |
| 4.2.3.4      | <i>Cenário regime - T100.....</i>   | 75         |
| 4.2.3.5      | <i>Análise dos resultados .....</i>   | 77         |
| <b>4.2.4</b> | <b>Modelagem do circuito elétrico completo vs circuito elétrico simplificado com capacitâncias definidas em norma e distribuídas de acordo com modelo PI.....</b> | <b>78</b>  |
| 4.2.4.1      | <i>Cenário regime - T10.....</i>  | 78         |
| 4.2.4.2      | <i>Cenário regime - T30.....</i>  | 80         |
| 4.2.4.3      | <i>Cenário regime - T60.....</i>  | 82         |
| 4.2.4.4      | <i>Cenário regime - T100.....</i>   | 84         |
| <b>4.2.5</b> | <b>Análise dos resultados .....</b>   | <b>86</b>  |
| <b>4.3</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>   | <b>87</b>  |
| <b>5</b>     | <b>MODELAGEM ANALÍTICA DE TRT.....</b>  | <b>88</b>  |
| <b>5.1</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>   | <b>88</b>  |
| <b>5.1.1</b> | <b>Desenvolvimento da modelagem analítica.....</b>  | <b>88</b>  |
| <b>5.1.2</b> | <b>Simulação computacional e Modelagem matemática.....</b>  | <b>94</b>  |
| <b>5.1.3</b> | <b>Análise comparativa entre modelo computacional e modelo matemático .....</b>   | <b>96</b>  |
| 5.1.3.1      | <i>Definição da análise.....</i>  | 96         |
| <b>5.1.4</b> | <b>Análise dos resultados .....</b>   | <b>96</b>  |
| <b>5.2</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>6</b>     | <b>CONCLUSÃO.....</b>   | <b>98</b>  |
| <b>6.1</b>   | <b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>  | <b>99</b>  |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>100</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) surgem, com certa frequência, falhas nos seus componentes que podem resultar em interrupções no fornecimento de energia aos consumidores conectados a esses sistemas, com conseqüente redução da qualidade do serviço prestado. A falha mais comum em qualquer SEP é o curto-circuito que dá origem a correntes elevadas circulando no trecho faltoso. Além da elevada magnitude da corrente elétrica, o curto-circuito pode ocasionar distúrbios de tensão, resultando muitas vezes em danos irreparáveis ao sistema e às instalações das unidades consumidoras (MAMEDE FILHO; RIBEIRO MAMEDE, 2013). Assim, é importante conhecer o sistema elétrico como um todo, bem como as formas de onda de tensão e de corrente em pontos estratégicos. Dessa forma, é possível analisar como se comporta o sistema frente a esses fenômenos de natureza transitória e como se propagam os sinais. Essas interrupções nos circuitos elétricos de potência provocado por anomalias são fontes que originam transitórios e sobretensões nos equipamentos da rede elétrica (NOBRE, 1999).

Entre os diversos tipos de transitórios ocasionados no sistema elétrico a Tensão de Restabelecimento Transitório, ou simplesmente TRT, é um fenômeno que ocorre em disjuntores e é pouco abordado no setor industrial. A TRT é o transitório que surge entre os contatos elétricos do disjuntor durante a abertura no sistema elétrico. O termo TRT é definido para transitórios que ocorrem durante comutação de dispositivos de manobras multipolos e geralmente aplicada ao primeiro polo a ser aberto após uma falta trifásica em seus terminais (IEEE STD C37.04, 2018).

Os disjuntores são equipamentos que desempenham um papel fundamental para garantir o bom funcionamento e a proteção em sistemas elétricos, desde as plantas de geração de energia até as instalações elétricas industriais. Por esses motivos, os disjuntores exigem atenção especial em seu dimensionamento e em estudos de superação.

Os estudos de superação por corrente de carga ou por corrente de curto-circuito são amplamente conhecidos e, inclusive, são realizados para outros equipamentos, tais como chaves seccionadoras e bobinas de bloqueio (ONS, 2014). Já a análise de superação por TRT é realizada somente em disjuntores e, em geral, é uma tarefa mais complexa. Nesse contexto, existem ainda preocupações do setor industrial com o estabelecimento de TRT em disjuntores, pois esse

fenômeno é crítico e pode afetar diretamente o desempenho dos equipamentos de proteção (RIFAAT; LALLY; HONG, 2014)

Com decorrer do tempo, mudanças e expansões podem acontecer no SEP e nas instalações elétricas das indústrias, como, por exemplo, a inserção de novas cargas, a substituição de cabos, equipamentos e a integração de novas unidades geradoras. Essas alterações modificam as impedâncias equivalentes da instalação elétrica e, conseqüentemente, podem alterar os níveis de corrente de curto-circuito. Dessa forma, há maiores possibilidades de comprometimento por superação de TRT e no funcionamento dos disjuntores já instalados. Por esses motivos, existem recomendações de estudos de TRT antes de substituir ou integrar disjuntores no sistema elétrico (DUFOURNET; HU, 2012). Dessa maneira, pode-se evitar custos elevados de manutenção e até substituição de disjuntores.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo analisar a TRT em um disjuntor de uma subestação de 69 kV localizada em uma instalação elétrica industrial, situada na região Noroeste do Rio Grande do Sul.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

No contexto do tema TRT, essa dissertação tem como objetivos específicos:

- Modelar, simular e analisar a TRT em disjuntor isolado a gás SF<sub>6</sub> de alta tensão;
- Analisar a resposta de TRT e da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (TCTRT) para diferentes cenários de impedância do sistema equivalente e tensão de operação;
- Comparar a resposta de TRT e TCTRT utilizando parâmetros reais e recomendados em norma;
- Analisar a resposta de TRT para diferentes níveis de tensão e capacitâncias distribuídas de acordo com modelo PI de linha. Sendo, os valores mínimos, médios e máximos das capacitâncias especificado pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011);
- Modelar analiticamente a TRT para o circuito elétrico simplificado;

- Comparar a resposta de TRT entre simulações computacionais, tais como ATP/EMTP, PSIM e modelagem analítica.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

Nesse mundo moderno estamos cada vez mais dependentes da tecnologia e agilidades em todos os processos industriais, devido à alta competitividade do mercado e serviços prestados. Por essa razão, precisamos ter um sistema elétrico confiável disponibilizando energia elétrica em qualquer cenário global de produção. Além disso, nos últimos anos cada vez mais vem crescendo as interligações do SEP, assim aumentando as possibilidades dos disjuntores já instalados serem superados por TRT.

A principal motivação deste trabalho é realizar uma análise técnica de TRT em um disjuntor de alta tensão com base em estudos científicos sobre o surgimento deste fenômeno. Embora este tipo de estudo ainda seja pouco explorado durante a fase de desenvolvimento de novos projetos de subestações industriais, esta análise é essencial para evitar interrupção no fornecimento de energia elétrica, danos ao disjuntor e a outros equipamentos devido a reignição do arco elétrico.

Nesse contexto, o disjuntor objeto deste estudo é um exemplo, pois durante a fase de projeto da subestação não foi considerado estudo de TRT. O time técnico do projeto ao obter mais conhecimento sobre esse tema de superação por TRT, trouxe preocupação com a suportabilidade do disjuntor implementado. Sendo assim, reforçou-se a necessidade em realizar uma investigação de TRT no disjuntor definido pelo time de engenharia. Frente a tudo isso, a maior dificuldade encontrada para análise está relacionada na obtenção dos parâmetros da rede, bem como, informações de capacitâncias parasitas dos equipamentos instalados no pátio da subestação.

Outra motivação deste estudo está em cooperar e propor uma verificação de TRT, baseando-se em modelagem analítica. Principalmente, ao investigador deste fenômeno de superação por TRT neste estudo de caso. Desta forma, a metodologia da modelagem analítica proposta, serviu para comparar com a resposta de TRT encontrada através do *software* ATP/EMTP, já consolidado mundialmente para análise de transitórios eletromagnéticos.

## 1.4 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A contribuição deste trabalho está em trazer estudos de casos baseados na plena disponibilidade de dados técnicos sobre os equipamentos e comparar as respostas com situações em que há falta de informações, demandando o uso de valores típicos do padrão (IEEE STD C37.011, 2011). Isso permitirá que engenheiros e projetistas tenham um melhor entendimento dos impactos que a falta de informação sobre as capacitâncias intrínsecas dos cabos, transformadores de potencial, transformadores de corrente e contatos do disjuntor provocará em suas análises. O trabalho demonstra também comparações entre o uso de valores típicos das capacitâncias mínimos, médios e máximos demonstrando os impactos que provocam nos resultados das simulações.

Além disso, o trabalho contribui com o desenvolvimento de uma modelagem analítica baseado em um circuito elétrico simplificado, na qual representa um dos cenários de estudo. E, posteriormente esta modelagem analítica foi implementada no *software* PSIM. Logo, em sequência desenvolveu-se um algoritmo no MATLAB para integrar e visualizar todos os sinais das TRTs obtidas pelas ferramentas, tais como ATP/EMTP, PSIM e modelagem analítica. Com esta metodologia proposta é possível verificar se os limites do disjuntor foram ultrapassados por TRT, mesmo em situações em que o investigador não possui o *software* ATP/EMTP. Isso aplica-se para este circuito elétrico simplificado e modelado neste trabalho.

## 1.5 ESTADO DA ARTE

O tema TRT é considerado um tema complexo e crítico em instalações elétricas, pois uma vez um disjuntor superado por TRT ou pela TCTRT pode trazer danos irreparáveis aos equipamentos. Este tipo de transitório é considerado grave para o sistema elétrico, pois além de provocar falhas no fornecimento de energia elétrica aos clientes, também pode gerar altos custos de manutenção para a concessionária de energia (PRAMANA et al., 2019). Sendo assim, nesta seção será abordado de forma resumida sobre o surgimento e algumas investigações sobre o fenômeno de TRT. Além disso, será demonstrado alguns métodos desenvolvidos para auxiliar nas análises técnicas com o objetivo de minimizar estes efeitos provocados por este transitório no sistema elétrico.

As primeiras pesquisas sobre o fenômeno de TRT ocorreram nos primeiros anos do século XX. Uma descrição matemática clara sobre este fenômeno foi descrita por Slepian em 1923, onde descobriu que a capacidade de interrupção do disjuntor é muito afetada pelas

ocorrências de variações naturais na tensão no sistema elétrico, quando a corrente elétrica é interrompida após a passagem em instante do zero.

Desde o estudo Slepian alguns métodos de investigações de TRT foram desenvolvidos, tais como método de medição ou método cálculo. Este método de medição é subdividido em outros métodos, tais como diretos ou indiretos. Ou seja, dependendo da forma como é realizada as medições diretamente pela interrupção da corrente de curto-circuito ou indiretamente por meio de medição de alguns destes fenômenos auxiliares.

O segundo método é realizado por meio de cálculos matemáticos, porém requer um vasto conhecimento na área de modelagem de elementos de rede juntamente com seus parâmetros do sistema. Alguns destes métodos já foram implementados com sucesso em alguns *softwares*, tais como o ATP/EMTP ou MATLAB/SIMULINK para uso afim de investigações de superação por TRT em disjuntores de proteção (SZEWCZYK; KULAS, 2007).

Investigações ainda apontam que a maior contribuição para superação por TRT em disjuntores é por meio da componente da tensão de recuperação. Este fenômeno surge entre os contatos elétricos do disjuntor e o potencial terra no lado da fonte, principalmente em sinais de TRT com caráter de onda do tipo dente de serra. Nestes casos, a alta frequência do sinal ao sobrepor a componente de tensão de recuperação, pode causar uma elevada taxa de aumento na TRT. Com isso, dificultando a interrupção da corrente de curto-circuito pelo disjuntor (RAHIMOV et al., 2019). Ainda, de acordo com Rahimov et al., (2019) os autores mencionam que o sinal de transitório TRT, além de ser modificada pela componente da tensão de recuperação entre os contatos do próprio disjuntor de proteção e a terra, também podem sofrer alterações com as variações nos comprimentos das linhas de transmissão entre o disjuntor e o local na ocorrência do curto-circuito no sistema elétrico.

A análise técnica de superação em disjuntor por TRT é considerada uma tarefa de difícil execução, pois em alguns casos a obtenção de parâmetros reais de um sistema elétrico é o maior desafio em estudos de transitórios eletromagnéticos. Sendo assim, existe pesquisa no sentido de extrair formas de onda de TRT para situações em que o investigador não possui parâmetros completos sobre o sistema elétrico. Desta forma, é possível obter sinais de TRT através de método adaptativo, com base no conceito de *second order generalized integrator-adaptive notch filter* (SOGI-ANF). A tecnologia deste filtro SOGI-ANF é conhecido como um bloco de construção para o gerar de sinais ortogonais, constituídos por integradores e multiplicadores que tornam-se possível a implementação em *software/hardware* (MALEKPOUR et al., 2018).

Existem ainda outras pesquisas onde foram investigados os métodos de cálculos das TRTs em disjuntores de alta tensão instalados em sistemas elétricos densamente malhados, com o foco em análise massiva de superação. Ainda neste sentido, são averiguadas algumas metodologias de cálculos matemáticos baseados nos domínios do tempo e frequência. Logo, propondo e desenvolvendo uma metodologia que usa as transformadas rápidas de Fourier para realizar cálculos de transitórios de TRT (SINDER, 2013).

A outra pesquisa sobre fenômeno provocado por transitórios de TRT demonstra o uso de método por meio de modelagem matemática com o objetivo de encontrar a TCTRT. No desenvolvimento desta modelagem matemática foi considerado a abertura do primeiro polo do disjuntor frente a ocorrência de um curto-circuito no sistema elétrico. A metodologia utilizada para desenvolver este cálculo matemático para a TCTRT é feita através método de injeção de corrente e princípio da superposição (PRETO, 2017).

Existem outros trabalhos direcionados em encontrar dispositivos elétricos e eletrônicos com objetivo em reduzir picos das TRTs em média tensão. Os elementos como varistores de óxido de zinco (ZnO) são modelados em programas computacionais como ATP/EMTP, e tornando-se uma alternativa para atenuar os picos das TRTs em disjuntores de proteção e religadores com classe de tensão entre 15 a 72,5 kV. Ainda, os pesquisadores deste tema comentam que a instalação física a campo dos componentes ZnO deve ser em paralelo com os terminais do disjuntor (AZEVEDO et al., 2011).

Outra pesquisa sugere investigações mais aprofundadas sobre outro dispositivo eletroeletrônico capaz de reduzir os valores máximos de TRT. Estes dispositivos limitadores são compostos por outros materiais como, por exemplo, óxido de estanho (SnO<sub>2</sub>). Esta sugestão é devido estes elementos possuírem semelhanças entre o coeficiente de não-linearidade entre os dispositivos compostos de SnO<sub>2</sub> e ZnO (JÚNIOR; SOUZA).

Além disso, estudos também abordaram critérios e procedimentos para disjuntores superados por TRT. Esta investigação recomenda que os disjuntores superados por TRT não devem ser substituídos de forma imediata, ou seja, devem ser averiguadas medidas adicionais que possam reduzir as solicitações de TRT, visando em torná-los disjuntores adequados ao sistema elétrico. Ainda, este trabalho menciona que disjuntores que estão próximo ao limite da capacidade de suportabilidade ou próximo a serem superados por TRT devem ter a configuração do sistema elétrico reavaliada, com o objetivo de reduzir as possibilidades de superação (JANAINA MIRSES DE S. C. COSTA et al., 2013).

Por fim, as análises investigativas sobre o fenômeno de TRT nunca serão concluídas completamente, uma vez que os processos de desenvolvimento de projetos para disjuntores de proteção e redes são continuamente estudados e inovados com novas tecnologias (SZEWCZYK; KULAS, 2007).

## 1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de Mestrado está dividida em cinco capítulos e está organizada da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 descreve a teoria dos principais modelos de disjuntores, meios de isolamento e tipos de superação e, em destaque superação por TRT. Além disso, será abordado os limites de suportabilidade dos disjuntores estabelecido pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011). Por fim, detalha-se o surgimento de arco elétrico;
- O Capítulo 3 apresenta o sistema elétrico teste de uma subestação elétrica real, bem como os parâmetros dos equipamentos definidos pelos fabricantes e capacitâncias intrínsecas conforme especificado pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011). Além disso, apresenta-se o *software* ATPDraw e os modelos dos componentes utilizados.
- O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso e a configuração dos circuitos elétricos definidos para a investigação das TRTs, além disso, demonstra os cenários de estudos para diferentes regimes. Por fim, será apresentado as análises dos resultados e a comparação entre os sinais das TRTs obtidas pelo programa ATP/EMTP;
- No Capítulo 5 detalha-se o desenvolvimento da modelagem analítica do circuito elétrico simplificado. Este capítulo demonstra também a comparação do sinal de TRT obtido pela modelagem analítica com os as respostas das TRTs alcançados pelos *softwares* ATP/EMTP e PSIM;
- O Capítulo 6 apresenta a conclusão dos cenários de estudos propostos para o disjuntor objeto da investigação.

## 2 DISJUNTORES DE PROTEÇÃO

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será abordado de forma breve os disjuntores em média tensão, pois está diretamente relacionado ao tema do estudo de caso. O foco será principalmente nos meios isolantes dos disjuntores, pois o surgimento e a extinção do arco elétrico no interior do disjuntor se comportam diferentes para cada meio de extinção. Além disso, serão apresentados os tipos de superação (corrente de carga, corrente de curto-circuito, relação de X/R e TRT), os limites de envoltória especificado em norma e surgimento de arco elétrico.

### 2.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS DISJUNTORES

Um dos principais objetivos dos disjuntores de proteção é garantir a proteção do sistema elétrico na ocorrência de um curto-circuito. Para isso, precisa apresentar características de rapidez e sensibilidade para interromper a corrente de curto-circuito em curtíssimos intervalos de tempo durante a ocorrência de uma falta. Esses equipamentos, devido à sua importância, são instalados em subestações de geração, transmissão e distribuição de energia, de modo a garantir a integridade da instalação elétrica (FRONTIN, 2013).

De acordo com João Mamede Filho e Daniel Ribeiro Mamede (2013), a detecção de um defeito no sistema elétrico pode ser entendida, de uma forma geral, pelas seguintes grandezas e critérios:

- Elevação da corrente;
- Elevação e redução da tensão;
- Inversão do sentido da corrente;
- Alteração da impedância do sistema;
- Comparação de um módulo e ângulo de fase na entrada e saída do sistema.

Por isso, deve-se considerar no dimensionamento de uma proteção esses fenômenos que podem surgir durante uma falta no sistema elétrico. Além disso, devem ser realizados estudos sobre as características técnicas do sistema, tais como partidas das máquinas que solicitam altos valores de corrente elétrica e aterramentos de proteção aos equipamentos. De acordo com Gabriel D. Mello (2017), nas últimas décadas, houve muita evolução na elaboração de projetos e na fabricação de disjuntores, com o emprego de novas tecnologias eficientes e materiais mais

resistentes, mas os tipos dos disjuntores ofertados no mercado não acompanharam essa evolução. Atualmente, os principais tipos de disjuntores disponíveis para comercialização e aplicação no sistema elétrico, quanto ao meio de extinção do arco elétrico, são:

- Disjuntores isolados a SF<sub>6</sub>;
- Disjuntores isolados a óleo;
- Disjuntores isolados a ar comprimido;
- Disjuntores isolados a vácuo.

### **2.2.1 Disjuntores isolados a SF<sub>6</sub>**

O gás hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) foi sintetizado pela primeira vez em 1904, mas somente nos anos de 1930 começou a ser aplicado como meio isolante, sendo usado primeiramente em transformadores devido à sua excepcional propriedade dielétrica. O gás SF<sub>6</sub>, depois de muitas pesquisas experimentais que comprovaram sua eficácia, começou a ser usado como um meio isolante e extintor de arco com o desenvolvimento dos disjuntores e chaves de abertura em carga no final dos anos de 1940 (ALVES, 2006).

Segundo Patrícia Oliveira Preto (2017), o gás SF<sub>6</sub> é considerado muito estável podendo chegar uma rigidez dielétrica 2,5 vezes maior que o ar. Esta relação de suportabilidade dielétrica pode ser ainda maior com o aumento da pressão. O gás SF<sub>6</sub> tem como característica uma alta capacidade de transferência de calor e a baixa temperatura de ionização, tornando-o um excelente meio de extinção de arco elétrico.

Atualmente, os disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub> são os mais utilizados em níveis de extra-alta tensão, principalmente pela rapidez de atuação e alta capacidade de recuperação dielétrica do meio de extinção. Normalmente, são aplicados em sistemas onde as redes têm níveis de tensões em 138 kV, 230 kV, 326 kV, 550 kV e 800 kV. O disjuntor isolado a gás SF<sub>6</sub> reduz a possibilidade de reacendimento do arco elétrico, devido à característica de eletronegatividade do gás favorecendo uma rápida recuperação dielétrica (ALVES, 2006).

### **2.2.2 Disjuntores isolados a óleo**

Os primeiros disjuntores desenvolvidos foram com os contatos isolados a óleo. O óleo sob efeito de um arco elétrico em temperaturas elevadas produz vários tipos de gases por decomposição, com influência do hidrogênio. No entanto, a condutividade térmica desse gás é bastante elevada, logo, o óleo por ter sua temperatura mais baixa ajuda resfriar de forma eficaz

os gases resultantes produzidos pelo arco. Sendo assim, a quantidade de gás liberada depende da magnitude da corrente elétrica e do tempo de duração do arco elétrico (FRONTIN, 2013).

Os disjuntores a óleo podem ser divididos em dois tipos, tais como (GVO) grande volume de óleo e (PVO) pequeno volume de óleo. A diferença básica entre estes modelos, é que nos disjuntores GVO os contatos elétricos são no centro de um grande tanque contendo óleo. Portanto, essa tecnologia serve para garantir a interrupção das correntes e assegurar o isolamento à terra. No caso do disjuntor PVO, o principal objetivo do uso do óleo é garantir a extinção do arco e não necessariamente a isolação entre as partes vivas e a terra (MELLO, 2017).

Ainda, os disjuntores GVO são aplicados em níveis de média e alta tensão, sendo limitado a 230 kV. Disjuntores isolados à óleo aplicado em níveis de tensão entre 138 kV e 230 kV requerem que a capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito seja em torno 63 kA. Esse tipo de equipamento não é apropriado para proteção de sistemas elétricos onde a amplitude das correntes de curto-circuito sejam consideradas baixas. Nesta condição a potência do arco elétrico é baixa, podendo ser insuficiente para desencadear a dissociação do óleo em gases nos níveis necessários à sua extinção. Portanto, circuitos elétricos com cargas, tais como banco de capacitores, reatores ou linhas a vazio não deve ser aplicada este tipo de disjuntor (ALVES, 2006).

### **2.2.3 Disjuntores isolados a ar comprimido**

Os disjuntores mais modernos isolados a ar comprimido, são uma ascensão do princípio de interrupção a sopro de ar desenvolvido na década de 1920. O ar comprimido fica armazenado em um reservatório pressurizado a montante do bocal, permitindo um fluxo de ar de alta intensidade. Sendo assim, esse o fluxo de ar entre os contatos é o responsável por resfriar e interromper o arco elétrico (ONS, 2014). Muitos disjuntores isolados a ar comprimido ainda continuam em atividade no sistema elétrico. Por sua vez, esse tipo de disjuntor apresenta uma característica própria em produzir um grande ruído durante a operação, esse fenômeno é causado pela exaustão de ar para atmosfera. Tecnicamente, silenciadores são empregados nas unidades interruptoras para este tipo de disjuntor com o objetivo de reduzir este nível de ruído (FRONTIN, 2013).

Os disjuntores que utilizam ar comprimido como um meio isolante possuem algumas desvantagens devido ao alto custo na produção e distribuição do ar comprimido em alta pressão, bem como requer alto custo de manutenção estas centrais de geração. Além disso, não é

recomendada a instalação deste modelo de disjuntor próximo a residências, devido ao alto nível de ruído provocado pela atuação, conforme citado em (ALVES, 2006).

#### **2.2.4 Disjuntores isolados a vácuo**

O surgimento dos primeiros disjuntores isolados à vácuo foram nos anos de 1926, num sistema com amplitude de corrente de 900 A e com nível de tensão em 40 kV. Mas, devido as dificuldades técnicas encontradas e métodos que garantisse bom desempenho, estes tipos disjuntores de média tensão iniciaram o processo de fabricação em larga escala nos anos de 1970 (ALVES, 2006).

O arco elétrico produzido entre os contatos de um disjuntor isolado a vácuo é bastante diferente dos outros tipos de disjuntores. A interrupção da corrente elétrica ocorre pela passagem em zero durante a separação dos contatos móveis dos contatos fixos, logo produzindo vapores metálicos provenientes dos contatos que são diretamente proporcionais à amplitude da corrente elétrica. Os disjuntores isolados a vácuo apresentam características quase ideais de suportabilidade dielétrica, devido à ausência de íons após uma interrupção (FRONTIN, 2013).

Ainda pode-se destacar que as principais vantagens dos disjuntores isolado a vácuo são sua vida útil e a baixa manutenção que esse modelo de equipamento exige durante a utilização em sistemas elétricos (BONGIOLO, 2019).

### **2.3 SUPERAÇÃO EM DISJUNTORES**

De acordo com (FRONTIN, 2013) os equipamentos elétricos instalados em um SEP são especificados para operar por um período que seja suficiente para compensar os investimentos dos custos de aquisição e instalação. Com isso, esses equipamentos devem serem projetados para comportar possíveis ampliações no sistema elétrico por este período. Mas, é possível que ocorram mudanças nas configurações do sistema que não haviam sido considerados nos estudos de planejamento de longo prazo. Logo, estes equipamentos podem ficar submetidos a estresses não planejados.

Diante disso é recomendado estudos periódicos de superação, na qual sejam comparadas as solicitações impostas aos equipamentos pela rede, com objetivo de verificar se os limites estão dentro dos parâmetros dimensionados. Destacam-se, as superações aos equipamentos pelas seguintes grandezas elétricas:

- Corrente de carga;

- Corrente de curto-circuito;
- Relação X/R da rede (constante de tempo);
- Superação por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

O Quadro 1 resume os critérios para análise de superação por equipamento. Como este trabalho aborda a superação por TRT, este tópico será aprofundado na sequência.

Quadro 1 - Critérios para análise de superação.

| Critérios                                | Equipamentos |                      |                     |
|--|--------------|----------------------|---------------------|
|  | Disjuntores  | Chaves seccionadoras | Bobinas de bloqueio |
| 1 - Corrente nominal                     | X            | X                    | X                   |
| 2 - Corrente de curto-circuito nominal   | X            | X                    | X                   |
| 3 - Crista da corrente de curto-circuito | X            | X                    | X                   |
| 4 - Constante de tempo (X/R)             | X            |                      |                     |
| 5 - TRT                                  | X            |                      |                     |

Fonte: Adaptado (ONS, 2014).

### 2.3.1 Superação por corrente de carga

A superação por corrente de carga, juntamente com o estudo de superação por corrente de curto-circuito, é o mais conhecido e praticado. Por esse motivo, é necessário realizar estudos de fluxo de potência no sistema elétrico, considerando que esse circuito poderá alimentar outros circuitos de forma emergencial, de forma garantir o funcionamento conforme o arranjo adotado (SINDER, 2013).

### 2.3.2 Superação por corrente de curto-circuito

A superação por curto-circuito ocorre devido a uma falta no sistema elétrico em que as correntes de curto-circuito possuem magnitudes superiores àquelas estabelecidas como nominais para os disjuntores, em condições normais e de emergência (FERREIRA; BORGES, 2007).

### 2.3.3 Superação por relação X/R da rede (Constante de Tempo)

A verificação de superação por relação X/R é determinada pela investigação dessa razão em conjunto com o valor máximo da corrente de curto-circuito simétrica, ambos baseados pelo cálculo de curto-circuito do sistema elétrico (FRONTIN, 2013). A relação de X/R tem potencial de influenciar na capacidade de interrupção de curto-circuito do disjuntor, pois quanto maior

for essa relação, mais lento é o decaimento exponencial da corrente. Para definição correta para essas análises, recomenda-se que sejam realizadas considerando os parâmetros de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos (FERREIRA; BORGES, 2007).

#### **2.3.4 Superação por TRT**

Segundo o padrão IEEE Std C37.011-2011(2011), o seccionamento do sistema elétrico por meio de um disjuntor frente a um curto-circuito produz transitório conhecido como TRT. Este transitório é a diferença de potencial elétrico entre a resposta do sistema elétrico no lado da fonte e no lado da carga do disjuntor em abertura. Portanto, considera-se o disjuntor superado por TRT quando a magnitude ou a taxa de crescimento da tensão ultrapassa os limites dielétricos e térmicos admissíveis (ONS, 2014).

As manobras e seccionamentos em sistema elétrico são comuns, podendo ser em situações normais, visando à manutenção preventiva em um determinado equipamento, por exemplo, ou de forma emergencial, com objetivo de restabelecimento do sistema (NOBRE, 1999). Independente do objetivo, essas manobras são realizadas através de chaves seccionadoras ou disjuntores. As manobras em condições normais geralmente ocorrem após um planejamento, assim não envolvendo a interrupção de correntes elétricas de amplitude elevada. Já no caso de um curto-circuito em algum ponto do sistema elétrico, o disjuntor é submetido a altos valores de correntes de curto-circuito, esforços mecânicos e térmicos.

Os efeitos transitórios no sistema elétrico produzidos por manobras de disjuntores frente a um curto-circuito dão origem as sobretensões. Esse fenômeno transitório possui amplitude e tempo de duração, assim, estas grandezas estão relacionadas às características técnicas do próprio sistema, como por exemplo, os parâmetros de rede e configuração (MARCHESAN, 2016).

O surgimento destes transitórios no sistema elétrico podem trazer danos aos disjuntores e, muitas vezes, problemas irreparáveis. Um dos principais problemas que o transitório pode provocar é a superação por TRT em disjuntores. Devido a este motivo, recomenda-se realizar estudos deste fenômeno, pois ao investigar a TRT, é possível verificar se o limite de isolamento elétrica do disjuntor está dentro da capacidade de suportabilidade eletromecânica para suportar este transitório. Após estas verificações, pode-se assegurar uma operação confiável do disjuntor frente à interrupção de um curto-circuito nas instalações elétricas (SALGE et al., 2019).

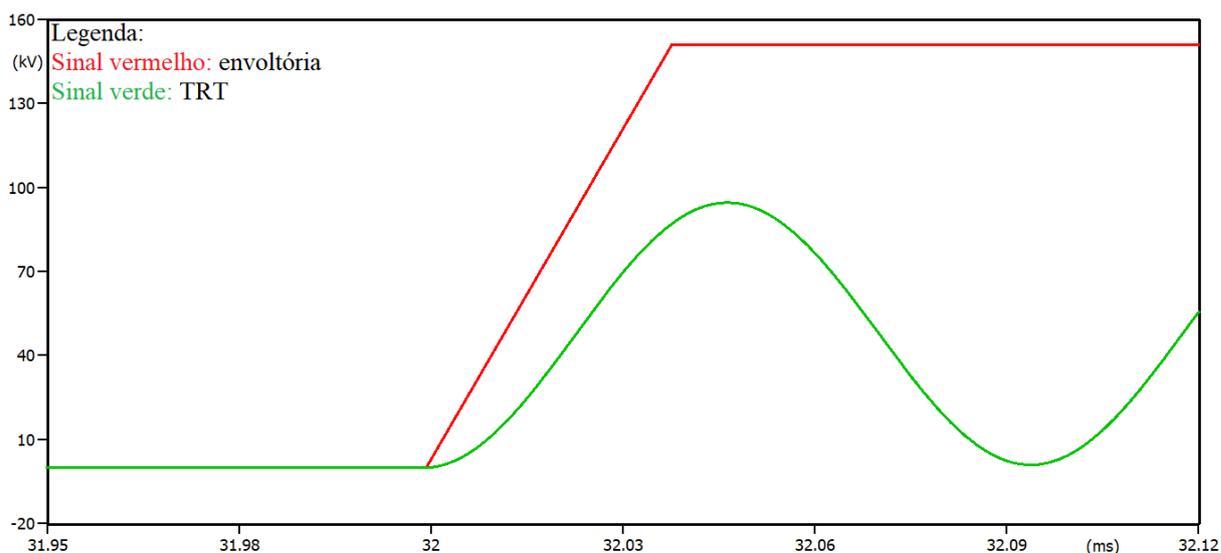
De acordo com Cigré Working Group A3.11 (2006) quando o disjuntor é especificado por meio de estudos de transitórios elétricos, esse equipamento tem que suportar os níveis de TRT e a TCTRT imposto pelo sistema elétrico.

A realização de um estudo de TRT deve ser feita de forma criteriosa e recomenda-se que considere as solicitações mais críticas para o disjuntor. Sendo assim, os estudos de TRT são uma tarefa complexa, pois diversos fatores podem influenciar na determinação da resposta. As principais dificuldades encontradas são: definição da metodologia, modelagem do sistema elétrico, definição de critérios e simulação. Também, podem-se destacar outros pontos que merecem atenção na modelagem, como:

- Configuração da rede próximo ao disjuntor;
- Tipos de curto-circuito a serem testados;
- Locais de aplicação do curto-circuito na rede;
- Condições dos disjuntores nos terminais remotos das linhas abertos ou fechados (ONS, 2014).

Segundo Swindler, Schwartz, Hamer (1997) considera-se que um disjuntor não foi superado quando nenhum ponto da forma de onda da TRT ultrapassa a envoltória definida pela norma (IEEE STD C37.011, 2011), que será estudada em detalhes em seguida. A Figura 1 apresenta um exemplo de disjuntor que não foi superado por TRT.

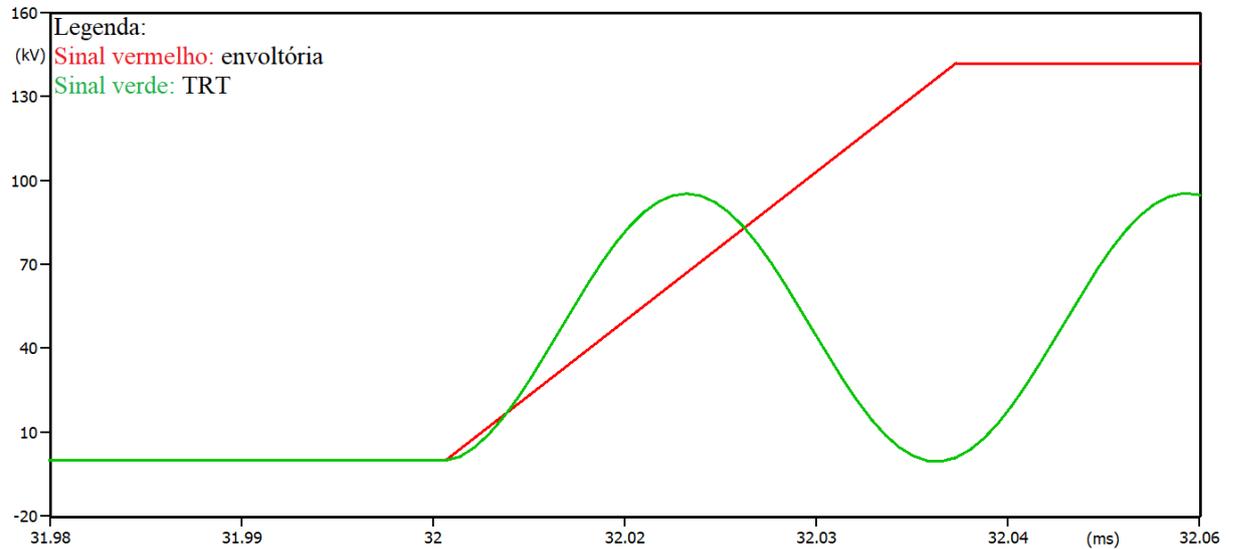
Figura 1 - Disjuntor sem superação por TRT.



Fonte: Adaptado de (IEEE STD C37.011, 2011).

A Figura 2 demonstra um exemplo de disjuntor superado em que a TCTRT, ultrapassa a curva limite (capacidade máxima do disjuntor).

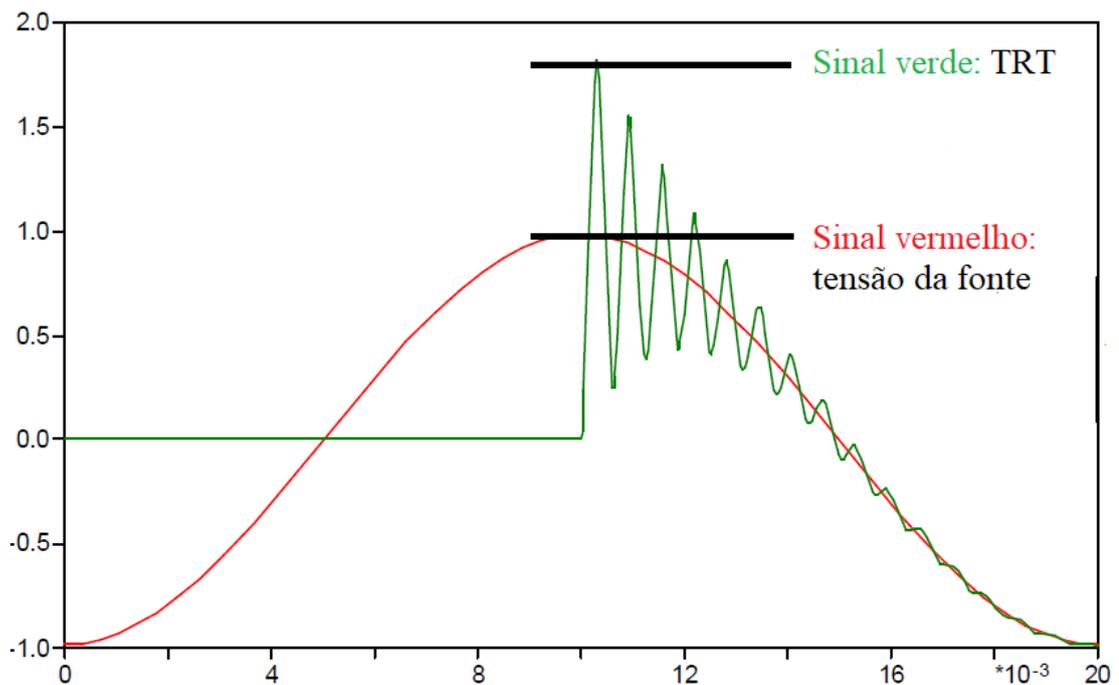
Figura 2 - Disjuntor superado por TRT.



Fonte: Adaptado de (IEEE STD C37.011, 2011).

De acordo com Penkov et al.(2012) após a TRT atingir o valor máximo de amplitude, a tensão entre os contatos abertos do disjuntor irá decrescer conforme o valor da tensão máxima da fonte. A Figura 3 demonstra a amplitude durante o surgimento de uma TRT versus o sinal nominal conforme nível de tensão da fonte.

Figura 3 - Valor máximo TRT versus Tensão.



Fonte: Modificado de (PENKOV et al., 2012).

## 2.4 FORMAS DE ONDA DA TRT

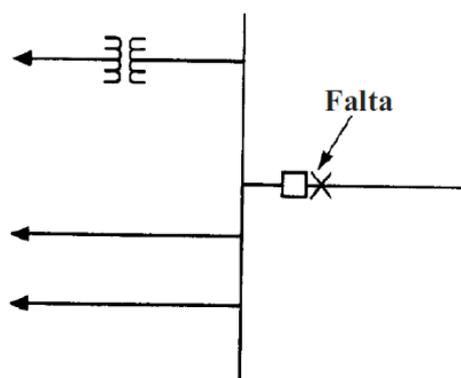
Segundo o padrão IEEE Std C37.011-2011(2011), as formas de onda da TRT são apresentadas de acordo com tipo, localização da falta no sistema elétrico e do arranjo do circuito. Existem também outros fatores que podem influenciar na forma de onda de uma TRT, tal como o tipo de carga que o disjuntor está protegendo, podendo ser uma característica resistiva, indutiva ou capacitiva. Segundo Dufournet and Hu (2012) existem ainda outros fatores que contribuem com a TRT e o formato do sinal:

- Indutâncias do sistema;
- Nível de corrente de curto-circuito a ser interrompida;
- Capacitância intrínseca de elementos do sistema;
- Posição no sistema onde está alocado o disjuntor;
- Parâmetros e constantes internas do disjuntor;
- Aterramento do sistema.

De acordo com o padrão IEEE Std C37.011-2011(2011), essas formas de onda de um transitório originado pela TRT podem ser representadas por: exponencial, oscilatória, triangular ou combinadas. As TRT oscilatória ou exponencial são mais severas e tendem a ocorrer durante a abertura do primeiro polo do disjuntor, no momento da interrupção de uma falta simétrica em seu terminal quando a tensão do sistema é máxima.

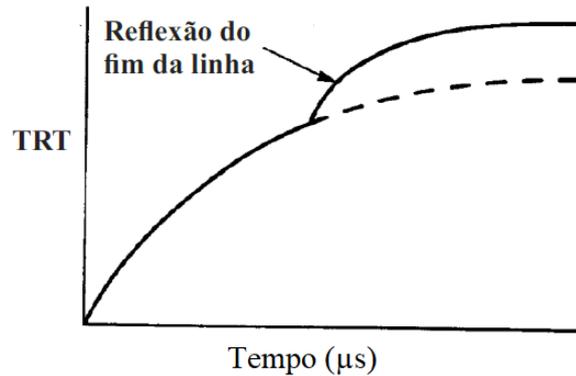
As TRTs exponenciais ocorrem quando o disjuntor interrompe uma falta trifásica não aterrada nos seus terminais e há ao menos um transformador e uma linha no lado não-faltoso do disjuntor, como ilustra a Figura 4. A Figura 5 demonstra a forma de onda elementar da TRT exponencial.

Figura 4 - Sistema elétrico elementar para o surgimento da TRT exponencial.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.011, 2011).

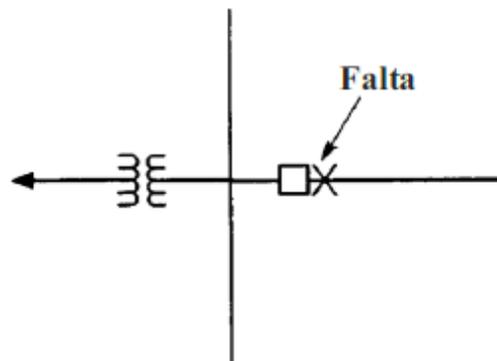
Figura 5 - Forma de onda elementar da TRT exponencial.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.011, 2011).

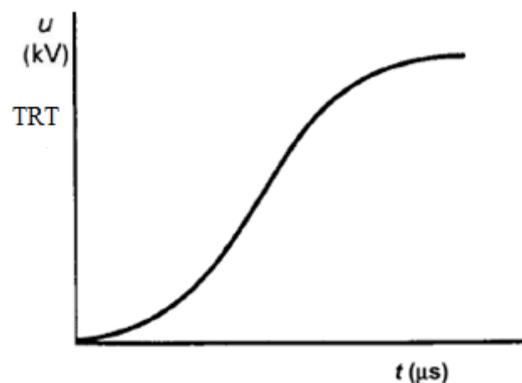
As TRTs oscilatórias ocorrem quando um transformador ou um reator série estão no lado não-faltoso do disjuntor e não há linhas de transmissão ou cabos conectados na barra onde ocorreu a falta, fazendo com que exista um típico amortecimento na forma de onda. A Figura 6 ilustra o sistema elétrico elementar para o surgimento da TRT oscilatória. A Figura 7 mostra a forma de onda típica de TRT oscilatória.

Figura 6 - Sistema elétrico elementar para surgimento da TRT oscilatória.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.011, 2011).

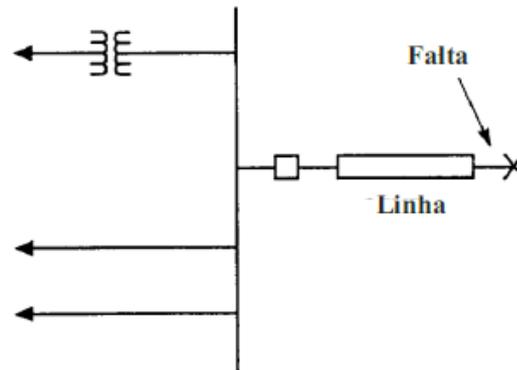
Figura 7 - Forma de onda elementar da TRT oscilatória.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.011, 2011).

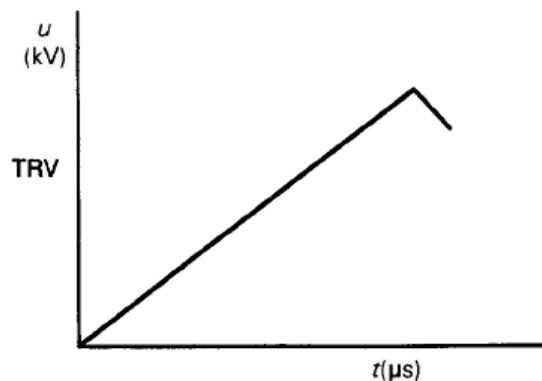
As TRTs com forma de onda triangular são caracterizadas pela impedância de surto da linha. São conhecidas como faltas de “linha curta”. Segundo o padrão IEEE STD C37.011 (2011) a forma de onda de uma TRT em forma de dente de serra é normalmente mais alta que as TRTs exponenciais ou oscilatórias. A Figura 8 ilustra o sistema elétrico elementar para o surgimento da TRT triangular. A Figura 9 ilustra a forma de onda elementar da TRT triangular.

Figura 8 - Sistema elétrico elementar para surgimento da TRT triangular.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.011, 2011).

Figura 9 - Forma de onda elementar da TRT triangular.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.011, 2011).

#### 2.4.1 Limites de TRT definidos em padrões e regulamentações

De acordo com o padrão IEEE STD C37.04B (2008) existem dois tipos de envoltórias normatizados, uma envoltória modelada com dois parâmetros e uma outra com quatro parâmetros. Os limites da capacidade de interrupção dos disjuntores são estipulados pela classe de tensão e pela configuração do sistema de aterramento. A envoltória com dois parâmetros é aplicada a sistemas com tensão nominal de até 100 kV. Já a envoltória com quatro parâmetros é utilizada em sistemas com tensões acima de 100 kV.

As principais características da envoltória de dois parâmetros são a amplitude máxima e a taxa de crescimento da TRT. O valor máximo da amplitude da TRT é definido por uma reta na horizontal medida em kV. Os limites da taxa de crescimento são determinados por uma reta inclinada e medida em kV/ $\mu$ s (DUFOURNET; HU, 2012). Para um melhor entendimento sobre a normatização, algumas definições técnicas são detalhadas na sequência.

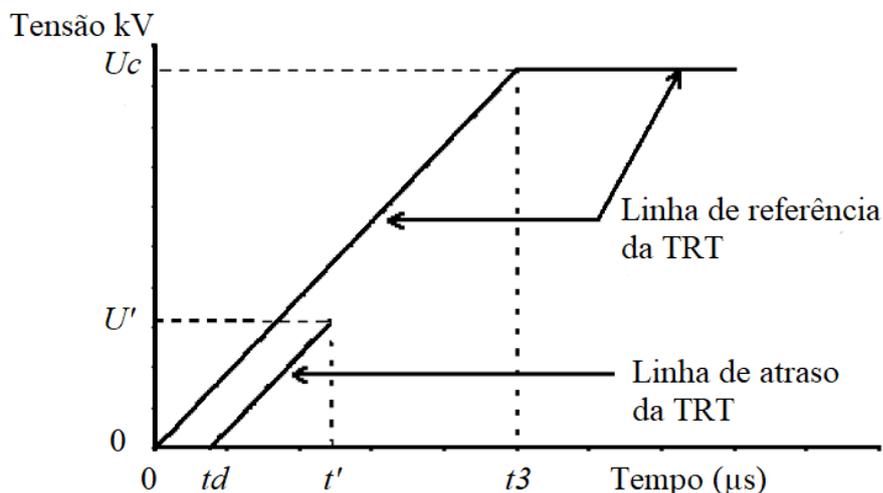
#### 2.4.1.1 TAXA DE AUMENTO DA TENSÃO DE RECUPERAÇÃO (TCTRT)

A TCTRT é a inclinação máxima da tangente da envoltória, iniciando a partir do instante da interrupção da corrente pelo disjuntor. A TCTRT pode ser enquadrada como T10, T30, T60 e T100. Isso significa a máxima corrente de curto-circuito que o disjuntor será submetido no ponto de instalação, respectivamente 10%, 30%, 60%, e 100% de sua capacidade nominal de interrupção (DUFOURNET; HU, 2012). Os principais parâmetros utilizados na modelagem das envoltórias são as seguintes:

- $uc$ : tensão máxima de TRT (usado nas envoltórias de dois e quatro parâmetros);
- $u1$ : primeira tensão de referência (usado em envoltórias a quatro parâmetros);
- $t1$ : tempo para atingir  $u1$  (usado em envoltórias a quatro parâmetros);
- $t2$ : tempo para atingir  $uc$  (usado em envoltórias a quatro parâmetros);
- $t3$ : tempo para atingir  $uc$  (usado em envoltórias a dois parâmetros).

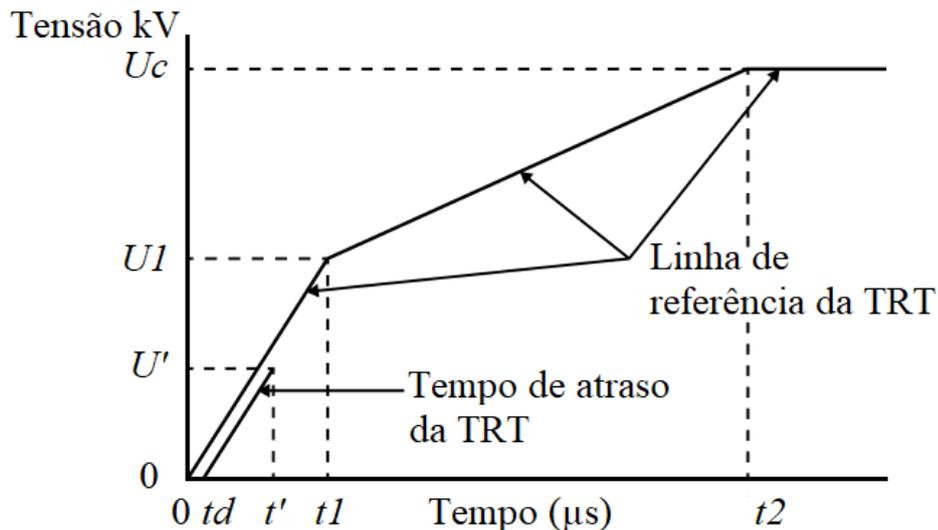
As propriedades  $uc$  e  $t3$  são utilizadas na modelagem para envoltórias a dois parâmetros. Por outro lado,  $u1$ ,  $t1$ ,  $uc$  e  $t2$  são utilizadas na modelagem de envoltórias a quatro parâmetros. A Figura 10 ilustra os limites da envoltória com dois parâmetros e a Figura 11 ilustra a envoltória de quatro parâmetros, destacando as propriedades discutidas anteriormente.

Figura 10 - Envoltória de dois parâmetros.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.06, 2009).

Figura 11 - Envoltória de quatro parâmetros.



Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.06, 2009).

#### 2.4.2 Limite inferior inicial da TRT

De acordo com o padrão IEEE STD C37.04B (2008) nos primeiros microssegundos ocorre um atraso na taxa de aumento da tensão no sinal da TRT, isso ocorre devido a influência da capacitância no lado da fonte do disjuntor. Esse atraso é representado por uma linha que corre paralelamente à linha de referência da envoltória e definido pelos parâmetros de tensão ( $u'$ ), tempo ( $t'$ ) e um atraso de tempo ( $td$ ) conforme é ilustrado pelas Figuras 10 e 11. As unidades desses parâmetros são:

- $u'$ : tensão de referência (quilovolts);
- $t'$ : tempo para alcançar  $u'$  (microssegundos);
- $td$ : tempo de atraso (microssegundos).

Esse valor de atraso é baseado no sinal típico da TRT do sistema. Em sistemas de linhas de transmissão para níveis de tensão em 100 kV e acima, o tempo de atraso é 2  $\mu$ s, sendo considerado um valor pequeno e conservador. Essa definição técnica foi definida em 1997 para IEEE/ANSI para usar os mesmos padrões da época usado pela IEC. Em edições anteriores (IEEE STD C37.06, 2009) em 1987 e antes, os valores de atraso de tempo variavam de acordo com os níveis de tensão, sendo 2,9  $\mu$ s para 121 kV até 7,9  $\mu$ s em 800 kV.

De acordo com a especificação do padrão (IEEE STD C37.06, 2009), o Quadro 2 apresenta os fatores que definem a envoltória de dois parâmetros para um disjuntor com as características, tais como classe S1, sistemas de cabos, sistema de aterramento não efetivo e

para os limites de capacidade T100, T60, T30 e T10. Assim, já alinhado com o disjuntor objeto do estudo de caso.

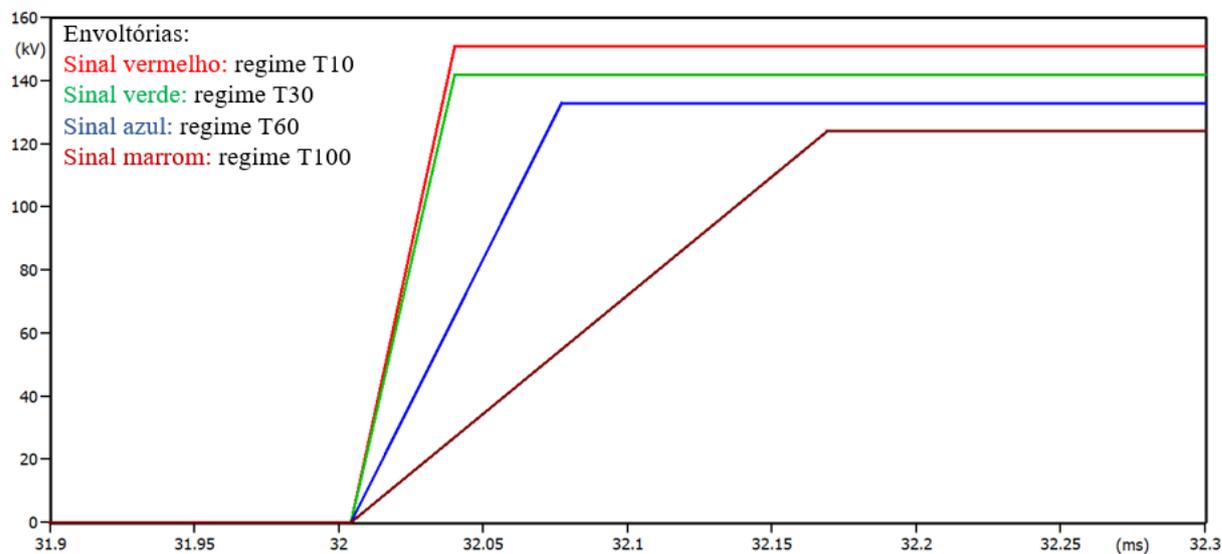
Quadro 2 - Valores para definição das envoltórias de dois parâmetros.

| Nº<br>Linha | Tensão<br>máxima | Limite<br>envoltória | Fator de primeiro<br>polo <i>kpp</i> (p.u.) | Fator de<br>amplitude | Valor pico TRT<br><i>uc</i> kV | Tempo <i>t3</i> $\mu$ s | Tempo atraso<br><i>td</i> $\mu$ s | Tensão<br>referência | Tempo <i>t'</i><br>$\mu$ s | TCTRT <i>uc/t3</i><br>kV/ $\mu$ s |
|-------------|------------------|----------------------|---|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1           | 4,76             | T100                 | 1,5   | 1,4                   | 8,2                            | 44                      | 7                                 | 2,7                  | 21                         | 0,19                              |
| 2           | 4,76             | T60                  | 1,5   | 1,5                   | 8,7                            | 19                      | 3                                 | 2,9                  | 9                          | 0,46                              |
| 3           | 4,76             | T30                  | 1,5   | 1,6                   | 9,3                            | 10                      | 1,5                               | 3,1                  | 5                          | 0,93                              |
| 4           | 4,76             | T10                  | 1,5   | 1,7                   | 9,9                            | 10                      | 1,5                               | 3,3                  | 5                          | 0,99                              |
| 5           | 8,25             | T100                 | 1,5   | 1,4                   | 14,1                           | 52                      | 8                                 | 4,7                  | 25                         | 0,27                              |
| 6           | 8,25             | T60                  | 1,5   | 1,5                   | 15,1                           | 23                      | 3                                 | 5,1                  | 11                         | 0,66                              |
| 7           | 8,25             | T30                  | 1,5   | 1,6                   | 16,2                           | 11                      | 2                                 | 5,4                  | 6                          | 1,47                              |
| 8           | 8,25             | T10                  | 1,5   | 1,7                   | 17,2                           | 11                      | 2                                 | 5,7                  | 6                          | 1,56                              |
| 9           | 15               | T100                 | 1,5   | 1,4                   | 25,7                           | 66                      | 10                                | 8,6                  | 32                         | 0,39                              |
| 10          | 15               | T60                  | 1,5   | 1,5                   | 27,5                           | 29                      | 4                                 | 9,2                  | 14                         | 0,95                              |
| 11          | 15               | T30                  | 1,5   | 1,6                   | 29,4                           | 15                      | 2                                 | 9,8                  | 7                          | 1,96                              |
| 12          | 15               | T10                  | 1,5   | 1,7                   | 31,2                           | 15                      | 2                                 | 10,4                 | 7                          | 2,08                              |
| 13          | 27               | T100                 | 1,5   | 1,4                   | 46,3                           | 92                      | 14                                | 15,4                 | 44                         | 0,5                               |
| 14          | 27               | T60                  | 1,5   | 1,5                   | 49,5                           | 40                      | 6                                 | 16,5                 | 19                         | 1,25                              |
| 15          | 27               | T30                  | 1,5   | 1,6                   | 52,9                           | 20                      | 3                                 | 17,6                 | 10                         | 2,53                              |
| 16          | 27               | T10                  | 1,5   | 1,7                   | 56,2                           | 20                      | 3                                 | 18,7                 | 10                         | 2,69                              |
| 17          | 38               | T100                 | 1,5   | 1,4                   | 65,2                           | 109                     | 16                                | 21,7                 | 53                         | 0,6                               |
| 18          | 38               | T60                  | 1,5   | 1,5                   | 69,8                           | 48                      | 7                                 | 23,3                 | 23                         | 1,45                              |
| 19          | 38               | T30                  | 1,5   | 1,6                   | 74,5                           | 24                      | 3,6                               | 24,8                 | 12                         | 3,1                               |
| 20          | 38               | T10                  | 1,5   | 1,7                   | 79,1                           | 24                      | 3,6                               | 26,4                 | 12                         | 3,3                               |
| 21          | 72,5             | T100                 | 1,5   | 1,4                   | 124                            | 165                     | 25                                | 41,4                 | 80                         | 0,75                              |
| 22          | 72,5             | T60                  | 1,5   | 1,5                   | 133                            | 73                      | 11                                | 44,4                 | 35                         | 1,82                              |
| 23          | 72,5             | T30                  | 1,5   | 1,6                   | 142                            | 36                      | 5                                 | 47,4                 | 18                         | 3,94                              |
| 24          | 72,5             | T10                  | 1,5   | 1,7                   | 151                            | 36                      | 5                                 | 50,3                 | 18                         | 4,19                              |

Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.06, 2009).

A Figura 12 apresenta as curvas padronizadas para as envoltórias de dois parâmetros em regimes T10, T30, T60 e T100 para um disjuntor com tensão nominal de 72,5 kV. As especificações destas envoltórias foram baseadas nos dados técnicos do Quadro 2.

Figura 12 - Ilustra os limites das envoltórias em regime T10, T30, T60 e T100.



Fonte: Adaptado de (IEEE STD C37.06, 2009).

## 2.5 ARCO ELÉTRICO

Segundo Pedral (2012) o arco elétrico pode ser definido como uma corrente elétrica que surge de forma visível em um meio isolante, podendo ser ar, vácuo, gás e SF<sub>6</sub>. Esse efeito acontece devido a ionização desta matéria. Este fenômeno surge entre duas superfícies condutoras devido à diferença de potencial, quanto mais próximas estiverem as superfícies, mais fácil será o surgimento desse evento. Durante esse processo, o meio ionizado produz um caminho condutor que se junta a estas superfícies de contato. É possível que o arco não se extinga mesmo com os condutores já separados, o que pode acontecer devido à diferença de potencial, que mantém o arco aceso.

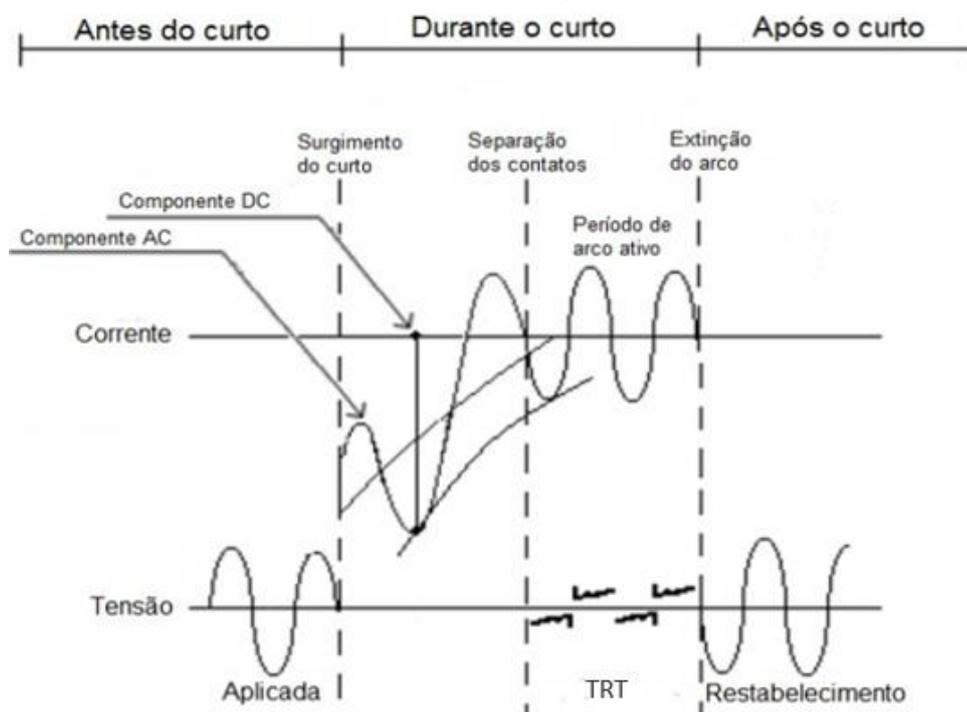
Além disso, o arco elétrico é percorrido por uma corrente elétrica de forma excessiva e instável, emitindo uma radiação com um espectro característico do meio onde se localiza. Esse evento produz um barulho intenso devido à grande expansão da matéria e calor excessivo. O surgimento do arco elétrico tem relação direta com a ocorrência de transitórios no sistema elétrico TRT. Quando o disjuntor interrompe uma falta no sistema elétrico, surge um arco elétrico no interior do equipamento que rapidamente perde condutividade quando a corrente elétrica instantânea se aproxima de zero (SALGE et al., 2019). Após a eliminação do arco, uma reignição pode ser reproduzida (TRT em sentido contrário) no interior do disjuntor, caso valor

máximo da TRT seja superior à tensão mínima necessária para romper a rigidez dielétrica do meio isolante. Esse fenômeno é denominado *Restrike* e pode provocar danos estruturais irreversíveis comprometendo o equipamento (SALGE et al., 2019). O termo *Restrike*, é conhecido como a tensão que surge através dos terminais de um disjuntor após a interrupção e extinção do arco e o fim do período oscilatório (PEDRAL, 2012).

Segundo o padrão IEEE STD C37.011 (2011), o sinal de TRT pode ser modificado pelo arco gerado no interior do disjuntor durante sua operação. Portanto, o sinal de TRT medido através dos terminais de dois disjuntores diferentes em condições idênticas pode ser diferente. Sendo assim, devido a essa característica de modificação que os disjuntores instalados apresentam, por isso, considera-se uma atividade complexa para calcular um sinal de TRT ou definir um valor relacionado para um disjuntor. Por estes motivos, neste trabalho não é modelado o efeito do arco elétrico com o intuito de simplificar a classificação e a aplicação. Assim, define-se como um disjuntor ideal na qual não produz efeitos modificadores nas características elétricas do sistema.

A grande parte dos disjuntores são projetados para evitar a reignição do arco elétrico após a primeira passagem da corrente por zero depois da separação dos contatos. Para melhor entendimento deste processo de operação do disjuntor inclusive o momento exato do surgimento do arco elétrico é ilustrado Figura 13.

Figura 13 - Características dos sinais durante interrupção de um curto-circuito.



Fonte: (PEDRAL, 2012).

Além disso, através da Figura 13 pode-se notar antes da separação dos contatos elétricos do disjuntor, o comportamento do sinal da corrente de curto-circuito apresentando uma certa deformação, isso ocorre devido ao surgimento da componente simétrica e, principalmente da componente DC (PEDRAL, 2012).

Por fim, destaca-se o tempo de arco, sendo em função da potência do curto-circuito e o comprimento da rede de distribuição. Além disso, ressalta-se que o maior desafio de um projetista de disjuntor está relacionado em assegurar que o equipamento suporte valores elevados de TCTRT, pois este fenômeno TCTRT surge após a interrupção da corrente sem que ocorra reacendimento de arco elétrico, ou garantir que a probabilidade seja baixa (ALVES, 2006).

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo abordou as principais características técnicas dos disjuntores de proteção e meios isolantes. Foi também dada ênfase principalmente aos conceitos necessários para o entendimento da superação por TRT em disjuntores. Os limites das envoltórias, conforme definido em norma (IEEE STD C37.011, 2011) e (IEEE STD C37.06, 2009) e os tipos das formas de onda das TRTs, foram elucidados. Detalhou-se ainda a definição de arco elétrico e o surgimento de reignição. Por fim, com base em todas estas teorias servirão para entendimento e conclusões nos resultados obtidos no estudo de caso apresentado nos próximos capítulos.

### 3 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO TESTE EM ESTUDO

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentado o sistema elétrico teste de uma subestação elétrica industrial real. Também serão ilustrados os parâmetros dos equipamentos elétricos, regimes de estudos, modelagem do sistema elétrico teste e os modelos dos componentes utilizados no *software* ATPDraw. Além disso, a definição para a redução na impedância equivalente na fonte de alimentação no ponto de entrega de energia pela concessionária.

#### 3.2 SISTEMA ELÉTRICO DE TESTE

O sistema elétrico de teste representa uma instalação elétrica real de uma subestação abaixadora de 69/22 kV. O sistema teste foi configurado utilizando parâmetros informados pelos fabricantes dos equipamentos e, posteriormente, por meio de valores típicos especificados em norma (IEEE STD C37.011, 2011).

A Figura 14 apresenta a imagem real do disjuntor de alta tensão para este objeto de estudo, situado no interior do pátio da subestação elétrica.

Figura 14 - Disjuntor de alta tensão.

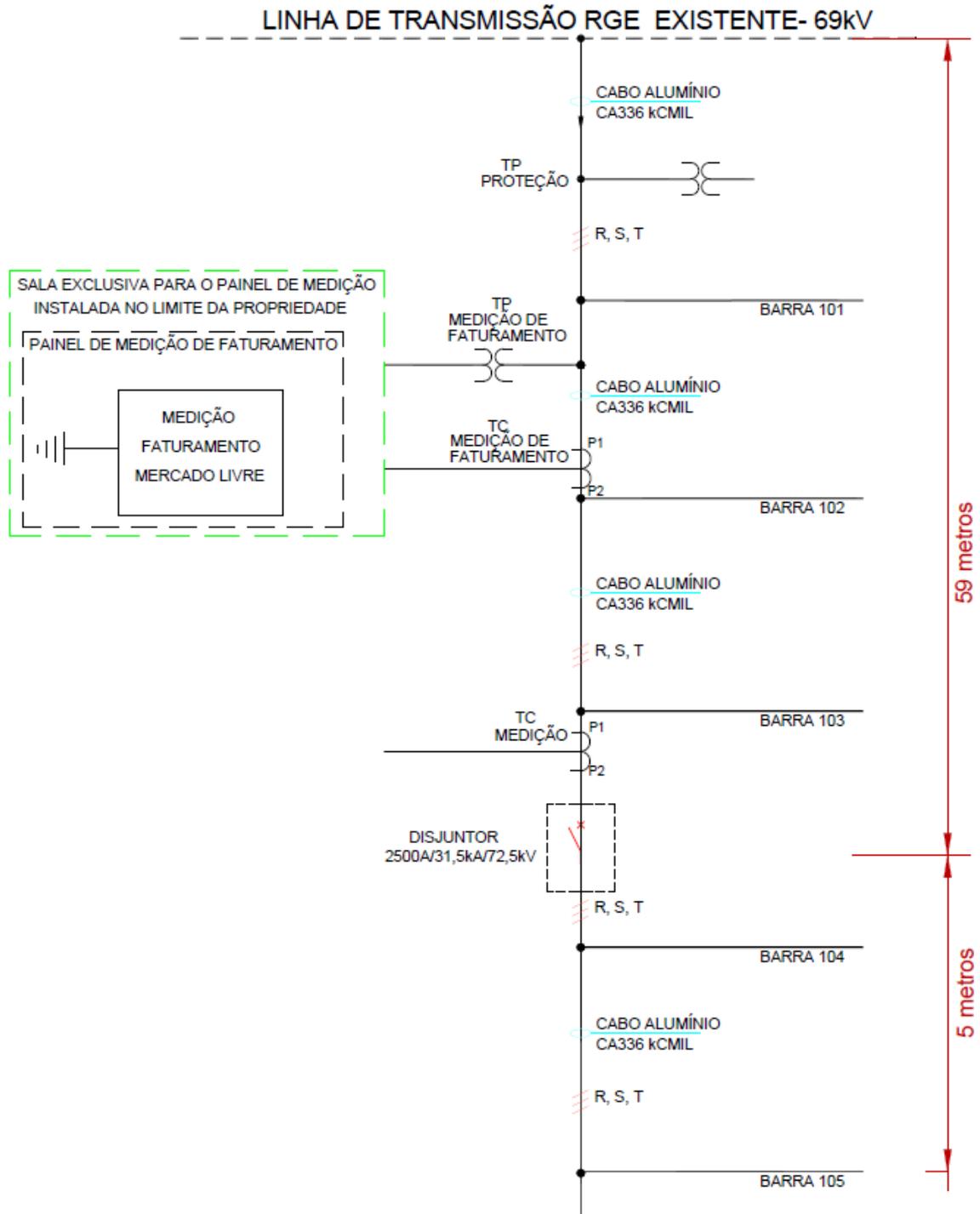


Fonte: Próprio Autor.

### 3.2.1 Diagrama unifilar

A Figura 15 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico em estudo, incluindo a disposição dos equipamentos, distância entre a fonte e o disjuntor e o local onde configurou-se o curto-circuito na barra 105.

Figura 15 - Diagrama unifilar da subestação elétrica.



Fonte: Próprio Autor.

Conforme ilustrado na Figura 14 e destacado no diagrama unifilar, o disjuntor de alta tensão na qual foi realizada a análise de superação de TRT é do tipo Live Tank Siemens (3AP1FG3), fabricado para a tensão de 72,5 kV, com corrente nominal de 2,5 kA e capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito assimétrica de 31,5 kA. As capacitâncias dos contatos elétricos do disjuntor em relação a terra são representadas por C1 e C2 e a capacitância entre as extremidades dos contatos é descrita por C3, conforme apresenta Tabela 1. Esses dados foram adquiridos junto ao fabricante Siemens.

Tabela 1 - Dados de capacitâncias intrínsecas.

| Descrição | Capacitância (pF) |
|-----------|-------------------|
| C1        | 14                |
| C2        | 18                |
| C3        | 11                |

Fonte: Adaptado do fabricante Siemens (2020).

Os dados técnicos de capacitâncias do transformador de corrente (TC) e transformador de potencial (TP) foram informados pelo fabricante através de ensaios e testes. A Tabela 2 demonstra os valores das capacitâncias parasitas para estes equipamentos em específico.

Tabela 2 - Dados dos instrumentos TC e TP.

| Instrumentos               | Tipo   | Capacitância (pF) |
|----------------------------|--------|-------------------|
| Transformador de corrente  | TCR-72 | 1000              |
| Transformador de potencial | TPI-72 | 350               |

Fonte: Adaptado do fabricante Balteau (2020).

As interligações entre as barras no interior da subestação foram realizadas através de cabos. Os parâmetros dos cabos foram adquiridos por meio da empresa que desenvolveu o projeto da subestação, baseando-se nos manuais do fabricante Nexans, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 - Dados técnicos dos cabos.

| Tipo de cabo | Modelo         | Capacitância (pF/m) |
|--------------|----------------|---------------------|
| Alumínio Nu  | CA Série KCMIL | 11,64               |

Fonte: Adaptado do fabricante Nexans (2020).

Os parâmetros equivalentes no ponto de entrega (fonte de alimentação) da subestação foram informados pela concessionária de energia elétrica, conforme demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros dos equivalentes na rede.

| Sequência           | Impedância ( $\Omega$ ) | X/R   | Icc simétrica (A) |
|---------------------|-------------------------|-------|-------------------|
| Positiva e negativa | 14,2206 + j 25,9097     | 1,82  | 1.347,0           |
| Zero                | 7,02496 + j 22,7412     | 3,237 |                   |

Fonte: Adaptado da concessionária RGE (2017).

O sistema deste também foi modelado utilizando valores típicos de capacitâncias especificados pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011), conforme ilustra a Tabela 5. Com estes valores típicos configurou-se o arranjo do circuito elétrico simplificado em alguns cenários que serão ilustrados posteriormente.

Tabela 5 - Valores mínimos, médios e máximos de capacitâncias em (pF).

| Equipamentos                    | Valores mínimos | Valores médios | Valores máximos |
|---------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Transformador de potencial (TP) | 125             | 312,5          | 500             |
| Transformador de corrente (TC)  | 75              | 167,5          | 260             |
| Trechos de cabos                | 8,2/m           | 13,1/m         | 18/m            |
| Disjuntor                       | 20              | 35             | 50              |

Fonte: Modificado de (IEEE STD C37.011, 2011).

Com o foco em construir diversos cenários de estudos de TRT, provocou-se alterações nas impedâncias equivalentes na fonte de alimentação considerando que as características técnicas do agente distribuidor mudaram, conforme mostra a Tabela 6. Dessa maneira, foi possível desenvolver várias simulações computacionais e em diferentes regimes.

Tabela 6 - Alterações nos equivalentes na fonte.

| Cenários      | Impedância equivalente da fonte |
|---------------|---------------------------------|
| Regime - T10  | Nominal do sistema*             |
| Regime - T30  | 15,62% da nominal               |
| Regime - T60  | 7,75% da nominal                |
| Regime - T100 | 4,63% da nominal                |

\*Valor apresentado na Tabela 4

Fonte: Próprio Autor.

Com a impedância nominal do sistema caracterizou-se um regime T10, pois ao configurar uma falta trifásica no sistema teste a corrente de curto-circuito ficou inferior a 10% da capacidade de interrupção do disjuntor em estudo. E, a redução da impedância equivalente na fonte foi necessária, pois assim, elevou-se o nível das correntes de curto-circuito no ponto

de instalação do disjuntor. Tomando como exemplo, ao reduzir a impedância equivalente na fonte 15,62% da nominal, o disjuntor ficou submetido a um nível de corrente de curto-circuito próximo a 30% da capacidade de interrupção, logo tornando-se um cenário de estudos em regime T30.

A Tabela 7 demonstra os valores das correntes de curto-circuito trifásica assimétrica (0,5 ciclos) e simétrica em (2 ciclos). Estes resultados foram extraídos por meio de simulações computacionais utilizando os *softwares Power Tools for Windows (PTW)* e *ATP/EMTP*. Os valores obtidos pelo *software* PTW foi informada pela empresa que desenvolveu o projeto de engenharia da subestação, enquanto que os resultados das correntes de curto-circuito evidenciadas no ATP/EMTP foram obtidos por meio de simulação do circuito completo e sem acoplamento de capacitâncias. Desta forma, demonstra-se a precisão nos valores encontrados entre diferentes *softwares*.

Tabela 7 - Valores das correntes de curto-circuito entre PTW vs ATP/EMTP.

| Local     | Software PTW      |                 | Software ATP/EMTP |                 |
|-----------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|           | Icc assimétrica A | Icc simétrica A | Icc assimétrica A | Icc simétrica A |
| Fonte     | 1.390,06          | 1.347,87        | 1.389,79          | 1.347,88        |
| Barra 101 | 1.390,06          | 1.347,87        | 1.389,79          | 1.347,88        |
| Barra 102 | 1.390,02          | 1.347,84        | 1.389,79          | 1.347,88        |
| Barra 103 | 1.389,99          | 1.347,81        | 1.389,79          | 1.347,74        |
| Barra 104 | 1.389,96          | 1.347,78        | 1.389,79          | 1.347,74        |
| Barra 105 | 1.389,96          | 1.347,78        | 1.389,79          | 1.347,60        |

Fonte: Próprio Autor.

### 3.3 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO TESTE NO ATPDRAW

O *software* ATPDraw é amplamente conhecido em simulações de transitórios e análises de fenômenos eletromagnéticos em SEP. O programa ATPDraw pode apresentar variáveis de interesse no sistema elétrico, como transitórios, provocados por comutação de dispositivos de manobras ou uma falha na rede elétrica. Além disso, pode realizar estudos específicos de eletrônica de potência, proteção contra sobretensão e controle em SEP.

O *software* ATPDraw é construído no programa de domínio público EMTP, sendo desenvolvido na *Bonneville Power Administration* em Portland, antes da tentativa de comercialização em 1984. Além disso, o programa ATPDraw foi desenvolvido sob administração direta dos Drs. W. Scott Meyer e Tsu-huei Liu, que são co-presidentes do grupo de usuários *Can/Am*. O ATPDraw permite que o usuário construa de forma intuitiva circuitos

utilizando componentes elétricos disponíveis na sua própria biblioteca. O principal desafio na análise destes circuitos são obter e inserir os parâmetros corretamente nos modelos de componentes adequados, que é responsabilidade do usuário (ATPDRAW, 2019). Para realizar as investigações computacionais nos cenários propostos neste estudo de caso foi utilizado *software* ATP/EMTP versão 6.0.

### **3.3.1 Fonte de alimentação**

Originalmente a subestação elétrica é alimentado por uma linha de transmissão de alta tensão, ou seja, a tensão (RMS entre linha) na fonte igual a 69 kV. No ATP/EMTP, a fonte trifásica é representada pelo componente ACSOURCE. Esta fonte de tensão é ajustada em 69 kV ou 72,5 kV, dependendo do cenário de estudo. Além disso, a fonte de alimentação foi configurada na ACSOURCE com o ângulo de tensão igual zero (0) durante a incidência da falta.

### **3.3.2 Trechos de cabos**

Os trechos de cabos entre o ponto de entrega de energia da concessionária e as barras no interior da subestação são interligadas por meio de condutores aéreos de alumínio. O comprimento total aproximado entre a fonte e a barra 105 é igual a 64 metros conforme ilustra a Figura 15. Sendo assim, os cabos usados na modelagem do circuito completo no ATP/EMTP utilizaram parâmetros, tais como resistências, reatâncias indutivas, tanto de sequência positiva, negativa e zero. Logo, sendo representado pelo elemento LINESY\_3 em (Ohms). Em contrapartida, o circuito de teste simplificado utilizou o componente RLC3 em (Ohms), por meio de resistências e reatâncias indutivas ambas de sequência positiva.

### **3.3.3 Capacitâncias intrínsecas**

As capacitâncias intrínsecas dos equipamentos elétricos, tais como disjuntor, cabos, transformadores de corrente e de potencial, são representados no ATP/EMTP pelo elemento RLCY3. Os parâmetros R e L foram ajustados em zero (0) e C foi configurado de acordo com o valor de capacitância definido no cenário de estudo.

### 3.3.4 Disjuntor

O disjuntor geral de proteção de alta tensão no sistema teste é representado no ATP/EMTP por uma chave ideal SWIT-3XT, disponibilizada na biblioteca deste *software*. Optou-se em utilizar uma chave ideal, pois assim, não há nenhum efeito capaz de alterar as características do sistema elétrico, e também pelo fato de quando estiver conduzindo corrente elétrica, a impedância é nula.

### 3.3.5 Curto-circuito

A análise do comportamento dos sinais das TRTs no disjuntor em estudo foi possível a partir da configuração de um curto-circuito trifásico, conforme ilustram a seguir os circuitos de teste. No ATP/EMTP, o curto-circuito é realizado ao conectar a extremidade do elemento SPLITTER no circuito de teste.

## 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados alguns parâmetros utilizados para configurar o sistema teste dos cenários de estudo propostos neste trabalho. Além disso, apresentou-se uma breve introdução sobre o *software* ATPDraw e os modelos dos componentes utilizados para configurar os circuitos elétricos no ambiente deste programa computacional.

## **4 ESTUDO DE CASO**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo serão apresentados os circuitos elétricos investigados e os resultados computacionais da análise de superação por TRT em um disjuntor de alta tensão. Além dos sinais das TRTs, também serão possíveis verificar a TCTRT e níveis das correntes de curto-circuito assimétrica e simétrica.

A metodologia aplicada para essa investigação foi por meio de modelagem, simulação e comparação nos sinais das TRTs impostos pelo sistema teste, frente a um curto-circuito trifásico franco. A principal diferença entre os circuitos simulados neste estudo são os valores e a forma de distribuição das capacitâncias intrínsecas dos equipamentos elétricos, além dos parâmetros utilizados na fonte de alimentação, tais como nível de tensão nominal e redução na impedância equivalente, conforme destacado no capítulo anterior.

#### **4.1.1 Circuitos elétricos investigados**

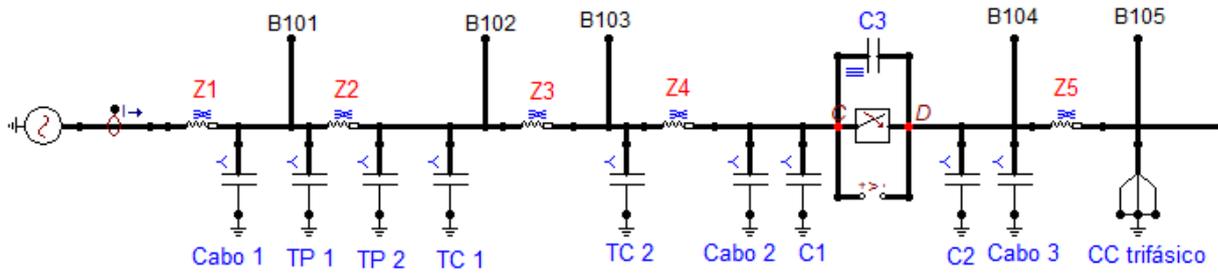
Diferentes cenários e configurações no sistema elétrico de teste foram investigados neste estudo, tais como:

- Circuito elétrico completo com capacitâncias distribuídas;
- Circuito elétrico simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com modelo PI;
- Circuito elétrico simplificado com capacitâncias concentradas.

#### **4.1.2 Circuito elétrico completo com capacitâncias distribuídas**

O circuito elétrico completo com capacitâncias distribuídas representa o modelo mais detalhado da instalação e equipamentos elétricos, considerados neste estudo de caso, conforme demonstra a Figura 16.

Figura 16 - Circuito elétrico completo com capacitâncias distribuídas.



Fonte: Próprio Autor.

Para modelar o circuito completo foram consideradas os seguintes parâmetros do sistema elétrico:

- Impedâncias equivalentes na fonte;
- Impedâncias dos trechos de cabos, tais como:
  - Resistências de sequência positiva, negativa e zero;
  - Reatâncias indutivas de sequência positiva, negativa e zero.
- Capacitâncias parasitas dos equipamentos, tais como:
  - Contatos elétricos do disjuntor;
  - Transformador de potencial;
  - Transformador de corrente;
  - Trechos de cabos.

A Tabela 8 mostra os parâmetros equivalentes na fonte e impedâncias dos trechos de cabos, ambos utilizados na modelagem do circuito completo no ATPDraw.

Tabela 8 - Parâmetros de impedâncias no circuito completo.

| Impedâncias    | $Z_{(+)} = Z_{(-)} (\Omega)$ | $Z_{(0)} (\Omega)$    |
|----------------|------------------------------|-----------------------|
| Z1 fonte       | 14,2206 + j 25,9097          | 7,02496 + j 22,7412   |
| Z2 trecho cabo | 7,68E-6 + j 1,086E-5         | 1,578E-5 + j 2,766E-5 |
| Z3 trecho cabo | 7,68E-6 + j 1,086E-5         | 1,578E-5 + j 2,766E-5 |
| Z4 trecho cabo | 7,68E-6 + j 1,086E-5         | 1,578E-5 + j 2,766E-5 |
| Z5 trecho cabo | 7,68E-6 + j 1,086E-5         | 1,578E-5 + j 2,766E-5 |

Fonte: Próprio Autor.

Os dados de capacitâncias intrínsecas dos equipamentos para o arranjo do circuito completo são mostrados na Tabela 9. As capacitâncias dos trechos de cabos estão distribuídas de acordo com modelo PI. Já as capacitâncias dos instrumentos de proteção e medição, tais

como transformadores de potencial e corrente estão distribuídos de acordo com a instalação física no pátio da subestação.

Tabela 9 - Valores de capacitâncias do circuito completo.

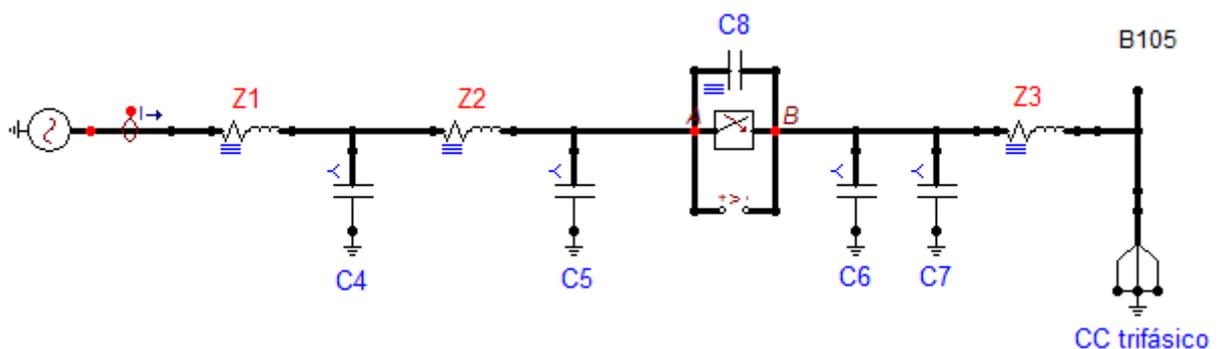
| Equipamentos  | Capacitâncias (pF) |
|---------------|--------------------|
| Trecho cabo 1 | 343,38             |
| Trecho cabo 2 | 343,38             |
| Trecho cabo 3 | 29,1               |
| TP 1          | 350                |
| TP 2          | 350                |
| TC 1          | 1000               |
| TC 2          | 1000               |
| C1            | 14                 |
| C2            | 18                 |
| C3            | 11                 |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1.3 Circuito elétrico simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com o modelo PI

Uma das metodologias de investigação no comportamento de TRT no disjuntor, foi reduzindo o circuito completo para um circuito simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com o modelo PI entre a fonte e o disjuntor, conforme ilustra a Figura 17. A seguir serão detalhados os elementos que compõem o sistema elétrico simplificado.

Figura 17 - Circuito elétrico simplificado com capacitâncias de acordo com modelo PI.



Fonte: Próprio Autor.

A modelagem do circuito elétrico simplificado foi realizada considerando os seguintes parâmetros:

- Resistências de sequência positiva;
- Reatâncias de sequência positiva;
- Capacitâncias intrínsecas dos equipamentos, tais como:
  - Contatos elétricos do disjuntor;
  - Transformador de potência;
  - Transformador de corrente;
  - Trechos de cabos.

A Tabela 10 ilustra os valores de impedâncias equivalentes na fonte e nos trechos de cabos para a configuração do circuito simplificado.

Tabela 10 - Parâmetros de impedâncias do circuito simplificado.

| Impedâncias    | $Z_{(+)} (\Omega)$                              |
|----------------|---|
| Z1 fonte       | $14,2206 + j 25,9097$                           |
| Z2 trecho cabo | $2,304 \times 10^{-5} + j 3,258 \times 10^{-5}$ |
| Z3 trecho cabo | $7,68 \times 10^{-6} + j 1.086 \times 10^{-5}$  |

Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 11 ilustra os valores de capacitâncias equivalentes para o arranjo do circuito simplificado. Logo, os parâmetros de capacitâncias dos elementos C4 e C5 representam os equivalentes dos equipamentos, tais como TP, TC e trechos de cabos entre a fonte e o disjuntor.

Tabela 11 - Valores de capacitâncias parasitas.

| Capacitor | Capacitâncias (pF) |
|-----------|--------------------|
| C4        | 1700,38            |
| C5        | 1700,38            |
| C6        | 18                 |
| C7        | 29,1               |
| C8        | 11                 |

Fonte: Próprio Autor.

Ainda, para o circuito simplificado configurou-se alguns cenários no sistema teste, utilizando apenas valores de capacitâncias definidas pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011). Sendo assim, a Tabela 12 demonstra os valores de capacitâncias equivalentes especificado em norma.

Tabela 12 - Valores de capacitâncias especificado pela (IEEE STD C37.011, 2011).

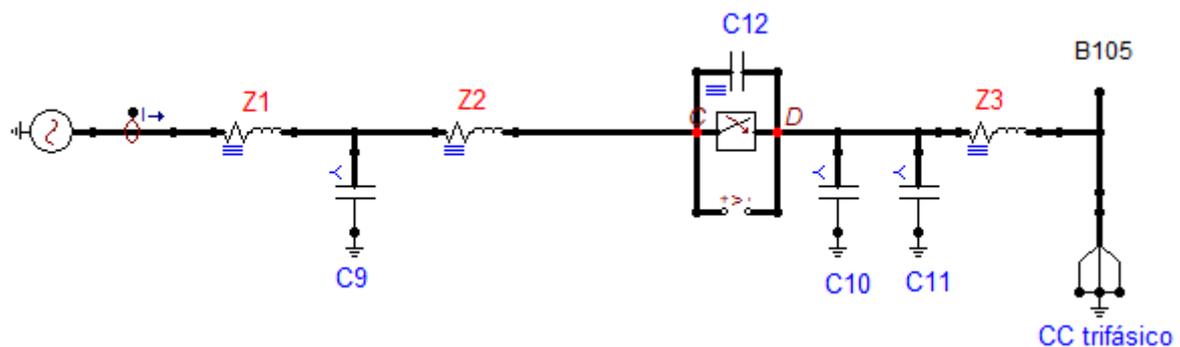
| Capacitâncias mínimas (pF) |       | Capacitâncias médias (pF) |        | Capacitâncias máximas (pF) |       |
|----------------------------|-------|---------------------------|--------|----------------------------|-------|
| C4                         | 451,9 | C4                        | 883,95 | C4                         | 1.316 |
| C5                         | 451,9 | C5                        | 883,95 | C5                         | 1.316 |
| C6                         | 20    | C6                        | 35     | C6                         | 50    |
| C7                         | 41    | C7                        | 65,5   | C7                         | 90    |
| C8                         | 20    | C8                        | 35     | C8                         | 50    |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1.4 Circuito elétrico simplificado com capacitâncias concentradas

A Figura 18 ilustra o circuito de teste com capacitância concentrada. O valor da capacitância concentrada C9, é o resultado das capacitâncias equivalentes dos equipamentos entre a fonte e o disjuntor em análise.

Figura 18 - Circuito elétrico simplificado com capacitância concentrada.



Fonte: Próprio Autor.

A modelagem do circuito elétrico simplificado com capacitância concentrada foi realizada considerando os seguintes parâmetros:

- Resistências de sequência positiva;
- Reatâncias de sequência positiva;
- Capacitâncias intrínsecas dos equipamentos, tais como:
  - Contatos elétricos do disjuntor;
  - Transformador de potencial;
  - Transformador de corrente;
  - Trechos de cabos.

Os parâmetros de impedâncias equivalentes na fonte de alimentação foram ajustados conforme ilustra Tabela 10. A Tabela 13 apresenta os parâmetros de capacitâncias intrínsecas para o arranjo do circuito.

Tabela 13 - Parâmetros de capacitâncias intrínsecas.

| Capacitor | Capacitâncias (pF) |
|-----------|--------------------|
| C9        | 3400,76            |
| C10       | 18                 |
| C11       | 29,1               |
| C12       | 11                 |

Fonte: Próprio Autor.

## 4.2 RESULTADOS DAS MODELAGENS COMPUTACIONAIS NO ATPDRAW

Para encontrar os resultados das TRTs obtidos pelas modelagens, configurou-se uma falta trifásica localizada na barra 105 no sistema teste, conforme ilustrado nos circuitos elétricos anteriormente. E, ainda na mesma simulação diferentes circuitos foram modelados, com o objetivo de comparar os sinais das TRTs impostos pelos circuitos elétricos. Além disso, serão verificadas as TCTRT e os níveis das correntes de curto-circuito assimétrica e simétrica de acordo com o nível de tensão nominal ajustado na fonte (69 kV e 72,5 kV).

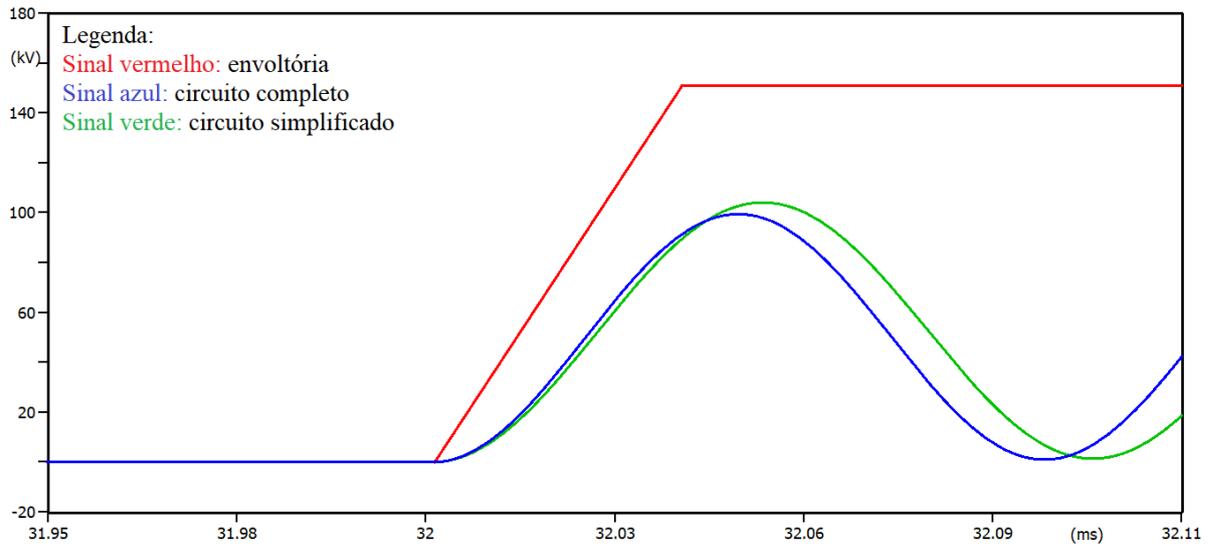
### 4.2.1 Modelagem do circuito completo vs circuito simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com o modelo PI

Com base nos parâmetros do circuito completo e circuito simplificado, conforme ilustrado na seção 3.3 , a seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações em regimes T10, T30, T60 e T100. Sendo assim, foi possível analisar o comportamento dos sinais das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para cada cenário proposto.

#### 4.2.1.1 *Cenário regime - T10*

Para primeiro caso deste cenário, uma tensão de 72,5 kV foi definida para as fontes de alimentação dos sistemas de testes. Além disso, respeita os valores padrões de impedância do sistema teste conforme informado pela concessionária de energia elétrica. A Figura 19 ilustra os sinais das TRTs obtidos para este cenário de estudos.

Figura 19 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 3 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e das correntes de curto-circuito trifásica para os dois circuitos simulados neste regime.

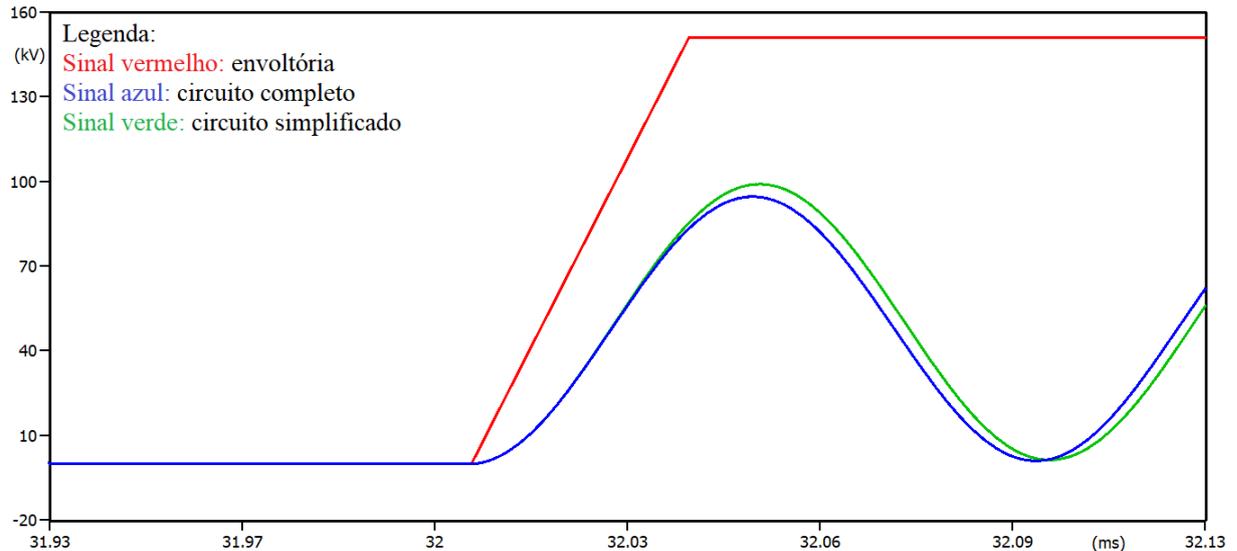
Quadro 3 - Resultados obtidos nas simulações em regime T10.

| Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                     |                     |                                     |                     |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| 1º caso                         | Circuito completo                   |                     | Circuito simplificado               |                     |
|                                 | TRT                                 | 99,4 kV             | TRT                                 | 104,1 kV            |
| TCTRT                           | 2,31 kV/μs                          | TCTRT               | 2,26 kV/μs                          |                     |
| Não superou                     |                                     | Não superou         |                                     |                     |
| Correntes de curto-circuito (A) |                                     |                     |                                     |                     |
|                                 | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A                          | 1.450,62                            | 1.444,68            | 1.426,57                            | 1.416,19            |
| Fase B                          | 1.483,48                            | 1.444,68            | 1.460,47                            | 1.416,19            |
| Fase C                          | 1.459,20                            | 1.444,68            | 1.428,23                            | 1.416,19            |

Fonte: Próprio Autor.

As fontes de alimentação ainda foram ajustadas para um a nível de tensão de 69 kV. Obtendo os sinais das TRTs conforme mostra Figura 20.

Figura 20 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 4 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito trifásica para os dois circuitos simulados com essa configuração da fonte de alimentação.

Quadro 4 - Valores encontrados nas simulações em regime T10.

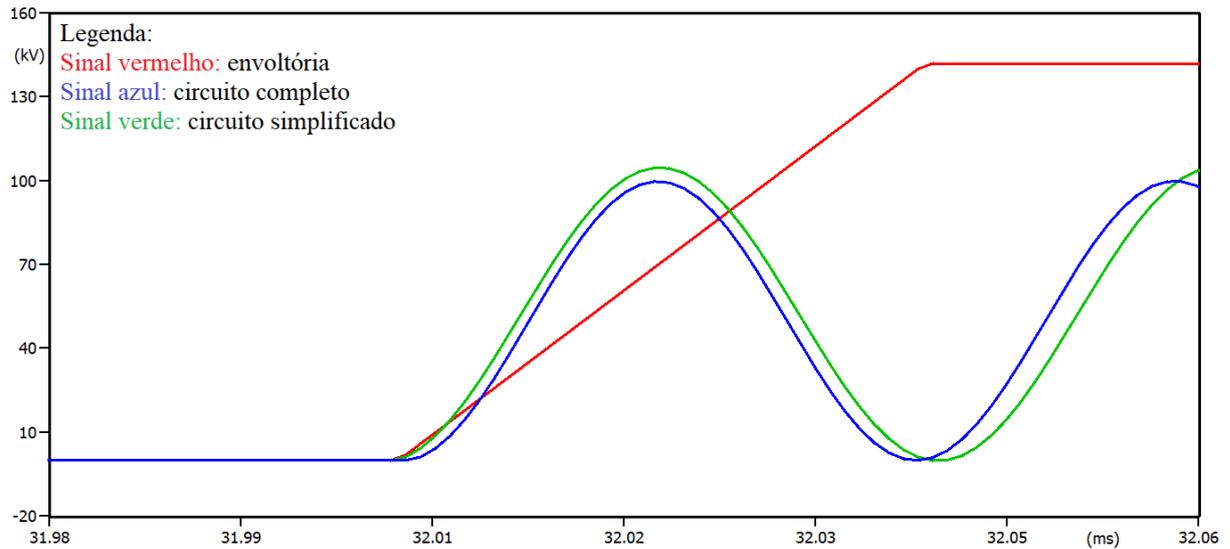
| 2º caso | Fonte de alimentação em 69 kV    |                     |                                  |                     |
|---------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
|         | Circuito completo                |                     | Circuito simplificado            |                     |
|         | TRT                              | 95 kV               | TRT                              | 99,1 kV             |
|         | TCTRT                            | 2,15 kV/ $\mu$ s    | TCTRT                            | 2,1 kV/ $\mu$ s     |
|         | Não superou                      |                     | Não superou                      |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)  |                     |                                  |                     |
|         | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 1.380,59                         | 1.374,89            | 1.357,45                         | 1.347,54            |
| Fase B  | 1.411,81                         | 1.374,89            | 1.389,72                         | 1.347,54            |
| Fase C  | 1.361,98                         | 1.374,89            | 1.349,03                         | 1.347,54            |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.1.2 Cenário regime - T30

Neste cenário assegurou-se o regime T30 para o disjuntor ao reduzir a impedância equivalente de rede em 15,62% da nominal com foco na corrente de curto-circuito assimétrica na barra 105. A Figura 21 apresenta o primeiro caso deste cenário, onde as fontes foram configuradas para um nível de tensão de 72,5 kV.

Figura 21 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 5 ilustra os valores encontrados para as TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema elétrico.

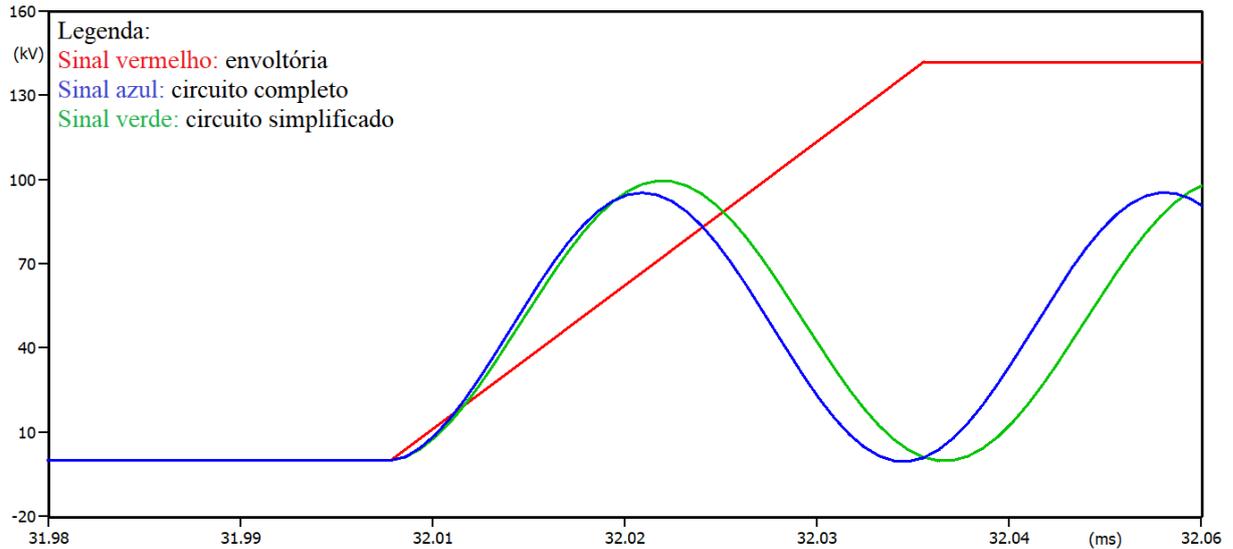
Quadro 5 - Resultados extraídos nas simulações em regime T30.

| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV     |                     |                                     |                     |
|---------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
|         | Circuito completo                   |                     | Circuito simplificado               |                     |
|         | TRT                                 | 99,7 kV             | TRT                                 | 104,1 kV            |
|         | TCTRT                               | 5,86 kV/ $\mu$ s    | TCTRT                               | 6,15 kV/ $\mu$ s    |
|         | Superou pela tangente               |                     | Superou pela tangente               |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 9.139,50                            | 9.077,83            | 9.088,28                            | 9.021,47            |
| Fase B  | 9.356,18                            | 9.077,83            | 9.305,85                            | 9.021,47            |
| Fase C  | 9.157,48                            | 9.077,83            | 9.098,70                            | 9.021,47            |

Fonte: Próprio Autor.

Para este segundo caso em regime T30, as fontes foram ajustadas para uma tensão nominal de 69 kV. A Figura 22 demonstra os sinais das TRTs alcançadas para esse arranjo do circuito teste.

Figura 22 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 6 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para este arranjo do sistema elétrico.

Quadro 6 - Valores obtidos nas simulações em regime T30.

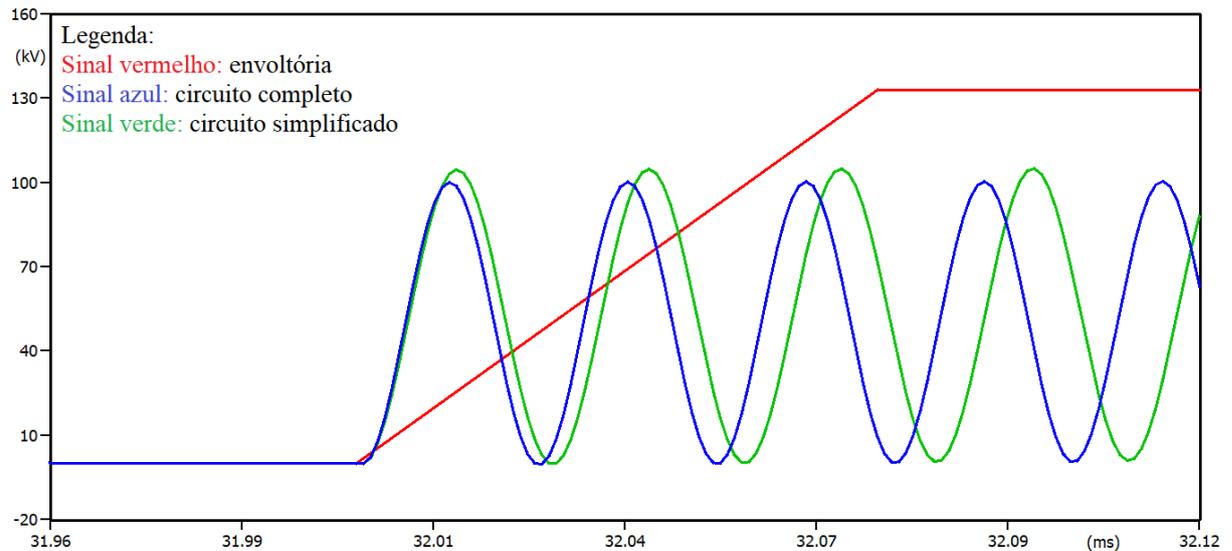
| 2º caso | Fonte de alimentação em 69 kV    |                     |                                  |                     |
|---------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
|         | Circuito completo                |                     | Circuito simplificado            |                     |
|         | TRT                              | 95,3 kV             | TRT                              | 99,6 kV             |
|         | TCTRT                            | 5,6 kV/ $\mu$ s     | TCTRT                            | 5,85 kV/ $\mu$ s    |
|         | Superou pela tangente            |                     | Superou pela tangente            |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)  |                     |                                  |                     |
|         | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 8.706,97                         | 8.647,20            | 8.696,92                         | 8.633,77            |
| Fase B  | 8.913,86                         | 8.647,20            | 8.902,63                         | 8.633,77            |
| Fase C  | 8.722,74                         | 8.647,20            | 8.706,76                         | 8.633,77            |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.1.3 Cenário regime - T60

Para este cenário, o sistema elétrico foi configurado para um regime T60. A corrente de curto-circuito assimétrica trifásica na barra 105 deve ficar próxima a 60% da capacidade de interrupção do disjuntor. A Figura 23 mostra os sinais das TRTs para uma tensão nominal de 72,5 kV.

Figura 23 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 7 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema.

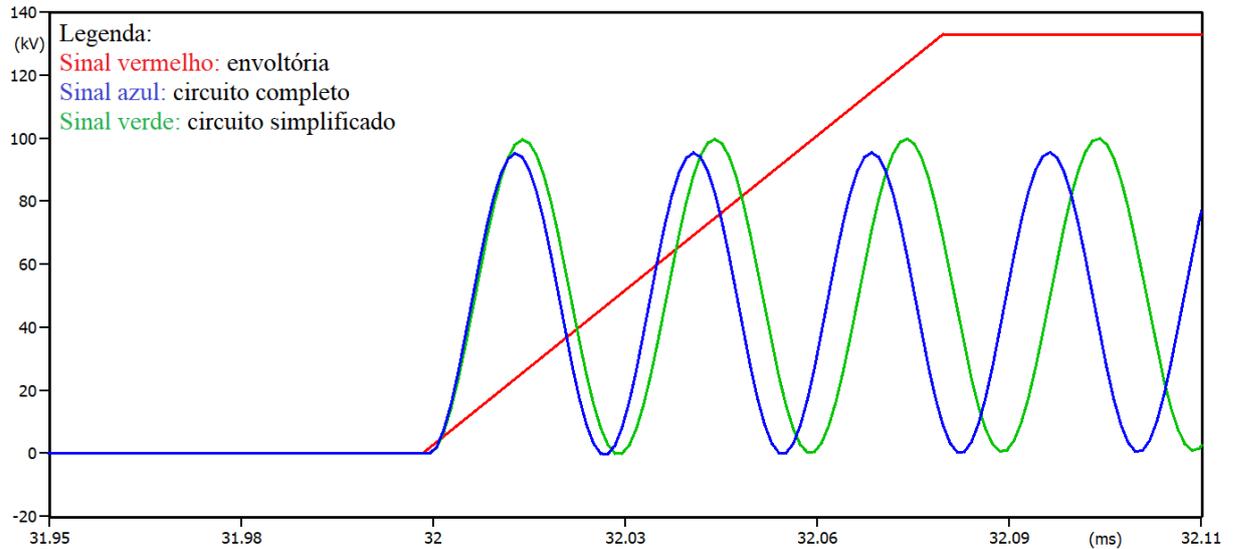
Quadro 7 - Resultados encontrados nas simulações em regime T60.

| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                     |                       |                                     |
|---------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
|         | Circuito completo               |                                     | Circuito simplificado |                                     |
|         | TRT                             | 100,1 kV                            | TRT                   | 104,6 kV                            |
|         | TCTRT                           | 8,34 kV/μs                          | TCTRT                 | 8,04 kV/μs                          |
|         | Superou pela tangente           |                                     | Superou pela tangente |                                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A) |                                     |                       |                                     |
|         |                                 | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos |
| Fase A  | 18.389,64                       | 18.260,32                           | 18.402,91             | 18.268,81                           |
| Fase B  | 18.827,44                       | 18.260,32                           | 18.840,65             | 18.268,81                           |
| Fase C  | 18.418,52                       | 18.260,32                           | 18.424,33             | 18.268,81                           |

Fonte: Próprio Autor.

Para o segundo caso deste cenário, a tensão nominal da fonte foi ajustada em 69 kV. Sendo assim, a Figura 24 demonstra os sinais das TRTs obtidos na simulação computacional para este arranjo do sistema elétrico.

Figura 24 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 8 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema elétrico.

Quadro 8 - Valores extraídos nas simulações em regime T60.

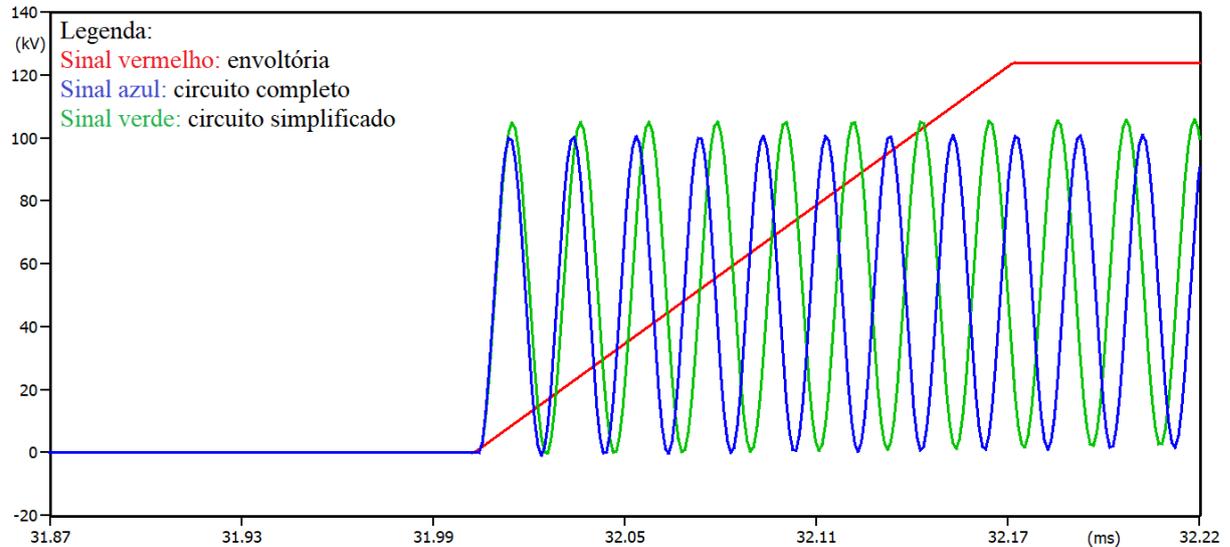
| 2 °<br>caso | Fonte de alimentação em 69 kV       |                     |                                     |                     |
|-------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
|             | Circuito completo                   |                     | Circuito simplificado               |                     |
|             | TRT                                 | 95,7 kV             | TRT                                 | 99,6 kV             |
|             | TCTRT                               | 7,93 kV/ $\mu$ s    | TCTRT                               | 7,66 kV/ $\mu$ s    |
|             | Superou pela tangente               |                     | Superou pela tangente               |                     |
|             | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|             | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
|             | Fase A                              | 17.522,72           | 17.399,77                           | 17.514,66           |
| Fase B      | 17.938,88                           | 17.399,77           | 17.931,21                           | 17.387,04           |
| Fase C      | 17.550,15                           | 17.399,77           | 17.535,04                           | 17.387,04           |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.1.4 Cenário regime - T100

Para esta análise de TRT o disjuntor em estudo foi submetido a valores próximo ao máximo de suportabilidade da corrente de curto-circuito. Sendo assim, a impedância equivalente na fonte foi reduzida 4,63% da nominal para assegurar este regime T100. A Figura 25 apresenta o sinal da TRT em um nível de tensão nominal nas fontes em 72,5 kV.

Figura 25 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 9 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para esse arranjo do sistema elétrico.

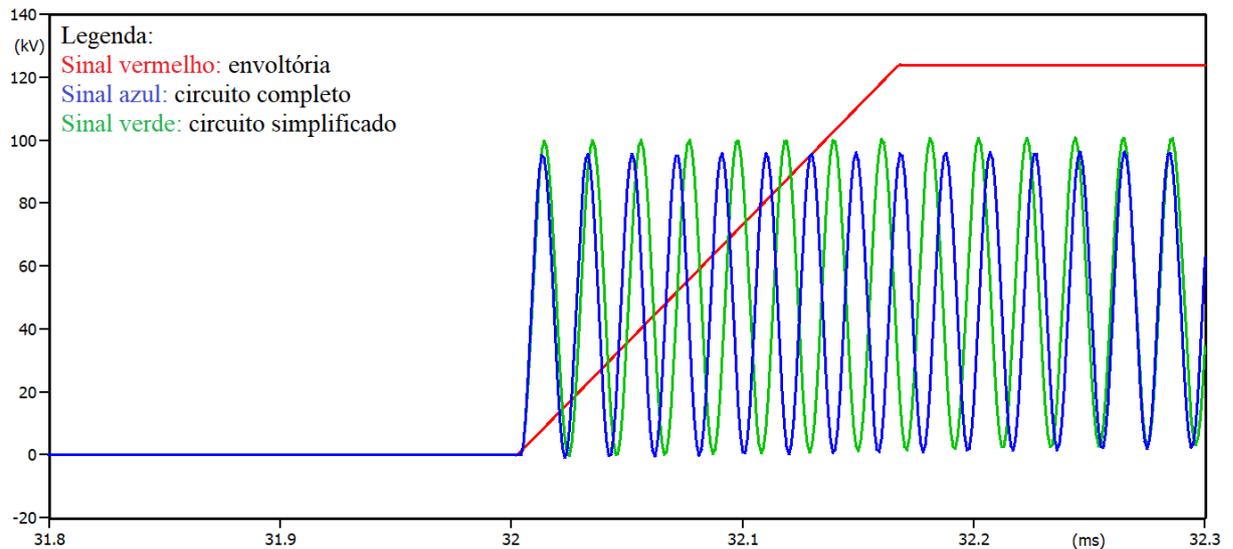
Quadro 9 - Resultados obtidos nas simulações em regime T100.

| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV     |                     |                                     |                     |
|---------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
|         | Circuito completo                   |                     | Circuito simplificado               |                     |
|         | TRT                                 | 100 kV              | TRT                                 | 104,8 kV            |
|         | TCTRT                               | 11,11 kV/ $\mu$ s   | TCTRT                               | 10,48 kV/ $\mu$ s   |
|         | Superou pela tangente               |                     | Superou pela tangente               |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 30.758,75                           | 30.530,04           | 30.743,16                           | 30.519,43           |
| Fase B  | 31.488,67                           | 30.530,04           | 31.473,16                           | 30.519,43           |
| Fase C  | 30.786,84                           | 30.530,04           | 30.778,92                           | 30.519,43           |

Fonte: Próprio Autor.

Para o segundo caso deste cenário, as fontes foram alteradas para 69 kV. A Figura 26 mostra o sinal de TRT obtidas por meio de simulação computacional para essa configuração do sistema elétrico de teste.

Figura 26 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 10 apresenta os valores obtidos para as TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema elétrico.

Quadro 10 - Valores encontrados nas simulações em regime T100.

| 2º caso | Fonte de alimentação em 69 kV       |                     |                                     |                     |
|---------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
|         | Circuito completo                   |                     | Circuito simplificado               |                     |
|         | TRT                                 | 96 kV               | TRT                                 | 99,7 kV             |
|         | TCTRT                               | 10,56 kV/ $\mu$ s   | TCTRT                               | 9,97 kV/ $\mu$ s    |
|         | Superou pela tangente               |                     | Superou pela tangente               |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 29.272,69                           | 29.055,01           | 29.258,04                           | 29.045,11           |
| Fase B  | 29.968,14                           | 29.055,01           | 29.953,13                           | 29.045,11           |
| Fase C  | 29.299,63                           | 29.055,01           | 29.292,08                           | 29.045,11           |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.1.5 Análise dos resultados

Para as duas simulações realizadas em regime T10 entre o circuito completo e simplificado, não houve ultrapassagem dos limites superiores e da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento definidos pelo padrão (IEEE STD C37.04B, 2008). Sendo assim, o disjuntor não foi superado por TRT, mesmo configurando diferentes níveis de tensão nas fontes de alimentação de 72,5 kV para 69 kV. Ainda, percebe-se que os valores encontrados para as

correntes de curto-circuito são inferiores a 10% da capacidade de interrupção do disjuntor em estudo para os dois casos analisados neste cenário.

Para os cenários em regime T30, T60 e T100 as simulações evidenciaram que os disjuntores em estudo foram superados por TRT. Isso aconteceu devido à redução nas impedâncias equivalentes nas fontes e pela configuração no limite máximo na envoltória para cada regime, conforme especificado pelo padrão (IEEE STD C37.06, 2009). Estes dados podem ser averiguados no Quadro 2. Tomando como exemplo o regime T30, a impedância equivalente na fonte foi reduzida 15,62% da nominal. Desta forma, assegurou-se que a corrente de curto-circuito no disjuntor ficasse próximo a 30% da capacidade de interrupção na ocorrência de um curto-circuito.

De forma geral, percebe-se que todos os casos destes cenários em estudo, os valores finais das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito são diferentes. Essas diferenças nos resultados obtidos estão relacionadas à configuração no nível de tensão na fonte do sistema teste, ao ajustar de 72,5 kV para 69 kV e a redução na impedância equivalente. Além disso, outro fator contribuinte foram os diferentes parâmetros utilizados entre o circuito completo e o circuito simplificado. O circuito completo foi configurado utilizando os parâmetros de sequência positiva, negativa e zero enquanto o circuito simplificado foi modelado utilizando apenas parâmetros de sequência positiva.

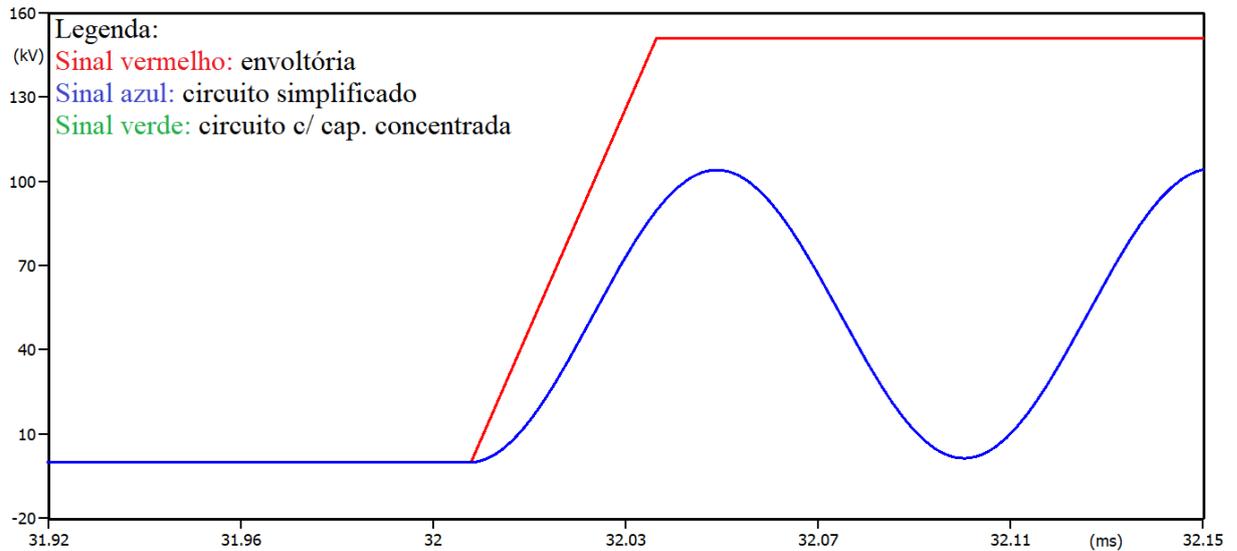
#### **4.2.2 Modelagem do circuito elétrico simplificado com capacitâncias distribuídas de acordo com o modelo PI vs circuito com capacitância concentrada**

Nessa seção apresenta detalhadamente os resultados extraídos nas simulações computacionais entre o circuito elétrico simplificado e o circuito com capacitância concentrada. Sendo assim, é possível visualizar apenas um sinal de TRT imposta pelo sistema elétrico frente a um curto-circuito na barra 105, isso acontece para todos os regimes devido a semelhança entre os circuitos. Os motivos serão detalhados na seção de análise dos resultados deste cenário.

##### **4.2.2.1 Cenário regime - T10**

Para a primeira simulação desse cenário em estudo, a fonte de alimentação foi ajustada em 72,5 kV, tanto para o circuito simplificado quanto para o circuito com capacitância concentrada. A Figura 27 demonstra os sinais atingidos pelas TRTs impostas pelo sistema elétrico de teste.

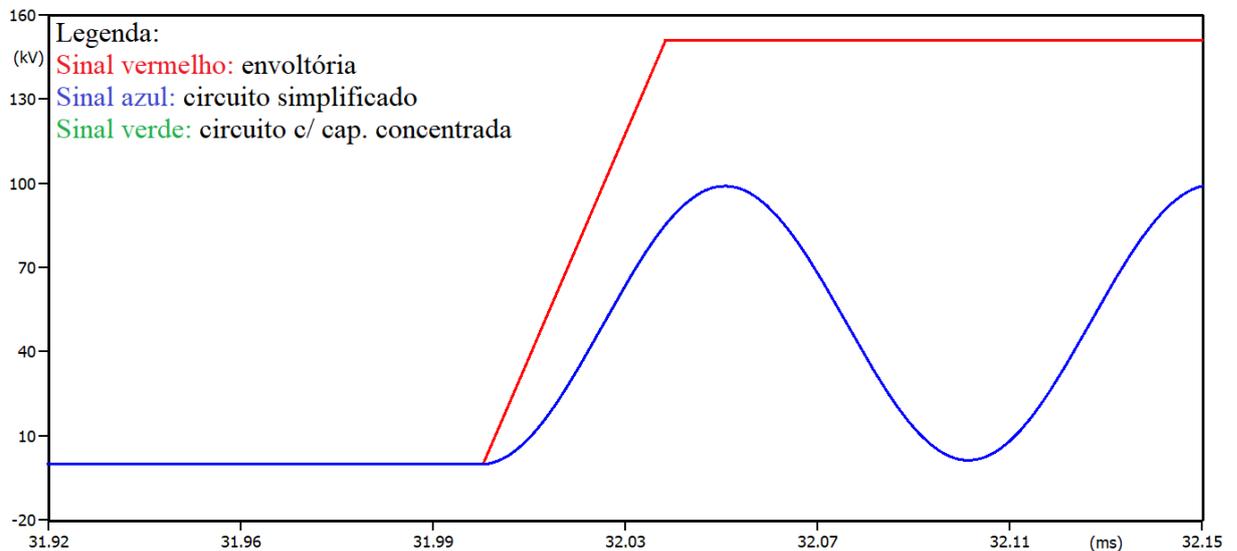
Figura 27 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

Ainda neste cenário, as fontes de alimentação foram configuradas em 69 kV. Sendo assim, a Figura 28 apresenta os sinais das TRTs para esse arranjo do circuito elétrico.

Figura 28 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 11 demonstra os resultados encontrados através das simulações computacionais, tais como valores instantâneos das TRTs, TCTRTs e valores máximos das correntes de curto-circuito assimétricas e simétricas.

Quadro 11 - Resultados extraídos nas simulações em regime T10.

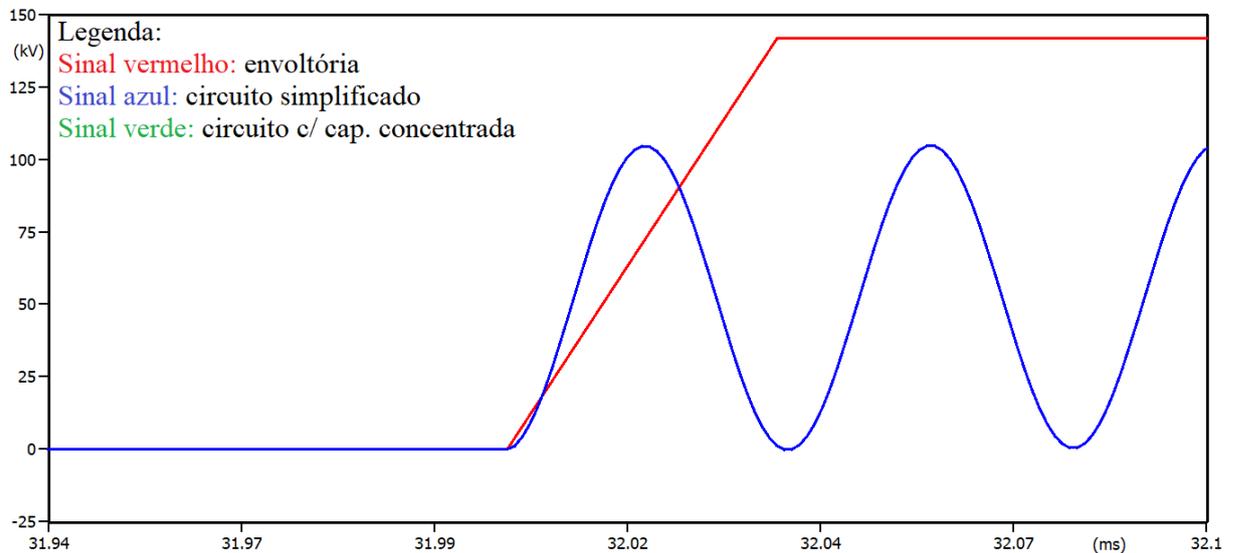
| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV     |                     | Fonte de alimentação em 69 kV       |                     |
|---------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
|         | TRT                                 | 104,1 kV            | TRT                                 | 99,1 kV             |
|         | TCTRT                               | 2,26 kV/μs          | TCTRT                               | 2,1 kV/μs           |
|         | Não superou                         |                     | Não superou                         |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 1.426,60                            | 1.416,19            | 1.357,45                            | 1.347,54            |
| Fase B  | 1.460,60                            | 1.416,19            | 1.389,72                            | 1.347,54            |
| Fase C  | 1.428,26                            | 1.416,19            | 1.349,03                            | 1.347,54            |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2.2 Cenário regime - T30

Para realizar as simulações neste cenário, foi necessário reduzir as impedâncias equivalentes nas fontes em 15,62% da nominal. Assim, foi possível submeter o disjuntor em estudo a uma corrente de curto-circuito próximo a 30% de sua capacidade de interrupção. A Figura 29 evidencia os sinais das TRTs do circuito elétrico para uma tensão nominal de 72,5 kV.

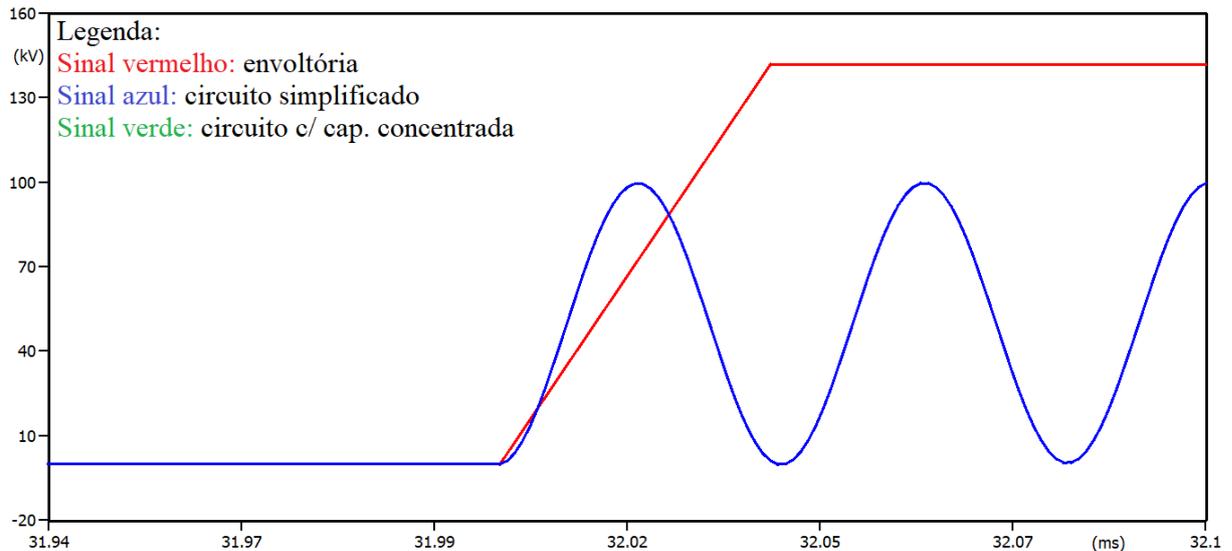
Figura 29 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

Para o segundo caso nesse cenário de estudos em regime T30 as fontes de alimentação dos circuitos ainda foram ajustadas em 69 kV. Através da Figura 30 é possível analisar os sinais das TRTs produzido durante o curto-circuito no sistema elétrico.

Figura 30 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 12 ilustra os resultados obtidos nas simulações computacionais desse cenário em regime T30. Resultados das TRTs, TCTRTs e valores máximos das correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema.

Quadro 12 - Valores obtidos nas simulações em regime T30.

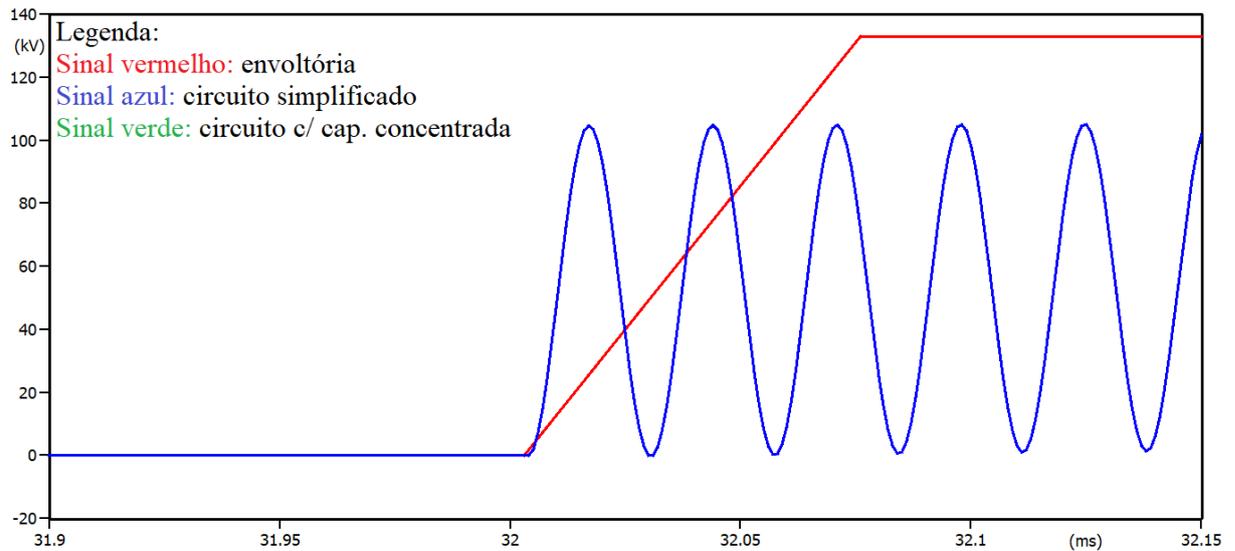
| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                     | Fonte de alimentação em 69 kV |                                     |
|---------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
|         | TRT                             | 104,1 kV                            | TRT                           | 99,6 kV                             |
|         | TCTRT                           | 6,15 kV/ $\mu$ s                    | TCTRT                         | 5,85 kV/ $\mu$ s                    |
|         | Superou pela tangente           |                                     | Superou pela tangente         |                                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A) |                                     |                               |                                     |
|         |                                 | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica        | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos |
| Fase A  | 9.088,20                        | 9.021,47                            | 8.696,92                      | 8.633,77                            |
| Fase B  | 9.305,49                        | 9.021,47                            | 8.902,63                      | 8.633,77                            |
| Fase C  | 9.098,59                        | 9.021,47                            | 8.706,76                      | 8.633,77                            |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2.3 Cenário regime - T60

Para este cenário, o sistema elétrico foi configurado para um regime T60. A corrente de curto-circuito assimétrica trifásica na barra 105 deve ficar próxima a 60% da capacidade de interrupção do disjuntor. Isso foi possível ao reduzir as impedâncias equivalentes nas fontes em 7,75% da nominal, conforme mencionado na Tabela 6. A Figura 31 apresenta os sinais das TRTs gerados durante o curto-circuito no sistema teste.

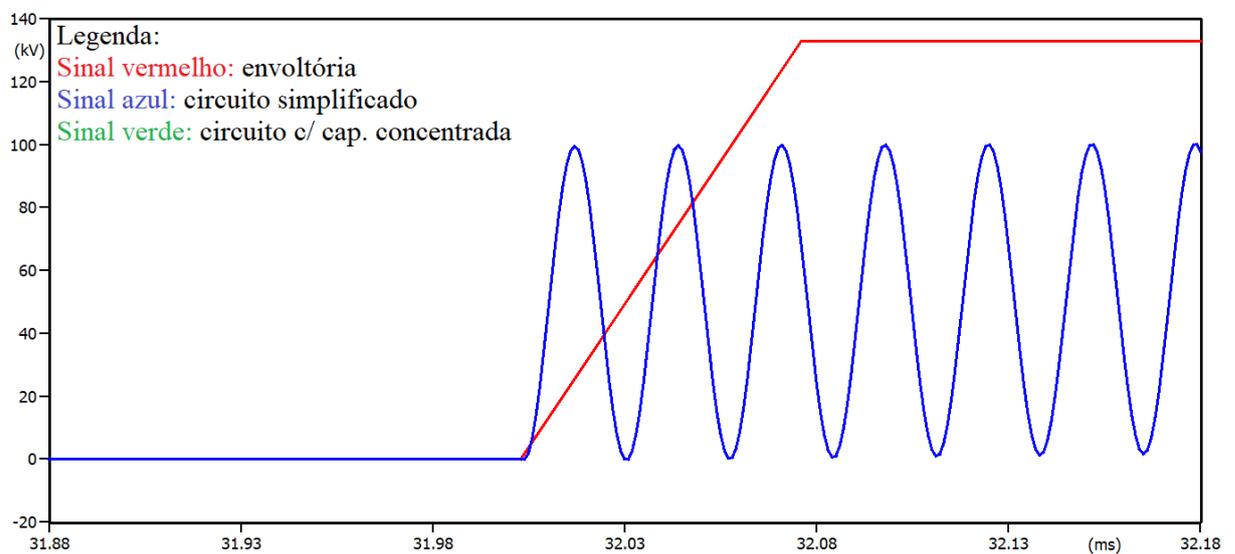
Figura 31 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

Para segundo caso deste cenário, as fontes de alimentação ainda foram configuradas em 69 kV. A Figura 32 demonstra os sinais das TRTs obtidos na simulação computacional deste cenário.

Figura 32 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

Resultados obtidos nas simulações desse cenário podem ser averiguados no Quadro 13, tais como os resultados das TRTs, TCTRTs e valores máximos das correntes de curto-circuito.

Quadro 13 - Resultados encontrados nas simulações em regime T60.

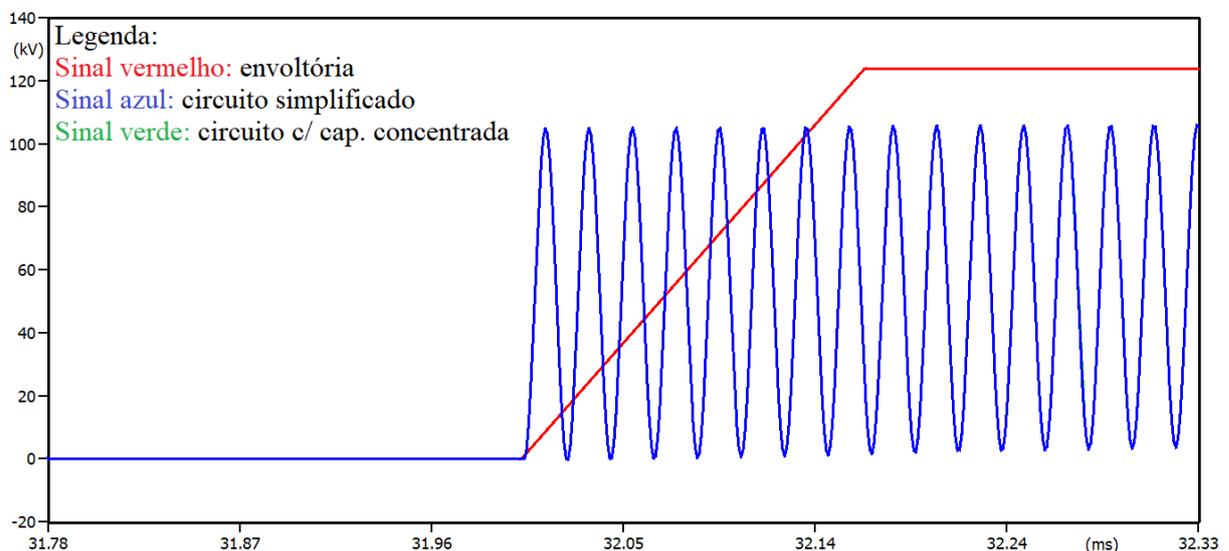
| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV     |                        | Fonte de alimentação em 69 kV       |                        |
|---------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
|         | TRT                                 | 104,6 kV               | TRT                                 | 99,6 kV                |
|         | TCTRT                               | 8,04 kV/μs             | TCTRT                               | 7,66 kV/μs             |
|         | Superou pela tangente               |                        | Superou pela tangente               |                        |
|         | Correntes de curto-circuito (A)     |                        |                                     |                        |
|         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica |
| Fase A  | 18.402,91                           | 18.268,81              | 17.514,66                           | 17.387,04              |
| Fase B  | 18.840,60                           | 18.268,81              | 17.931,21                           | 17.387,04              |
| Fase C  | 18.424,32                           | 18.268,81              | 17.535,04                           | 17.387,04              |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2.4 Cenário regime - T100

Para esta análise no disjuntor objeto de estudo foi submetido a valores máximos de suportabilidade da corrente de curto-circuito. Para que o disjuntor esteja em regime T100, as impedâncias equivalentes nas fontes foram reduzidas em 4,63% da nominal. A Figura 33 demonstra os sinais das TRTs produzido durante um curto-circuito provocado na barra 105.

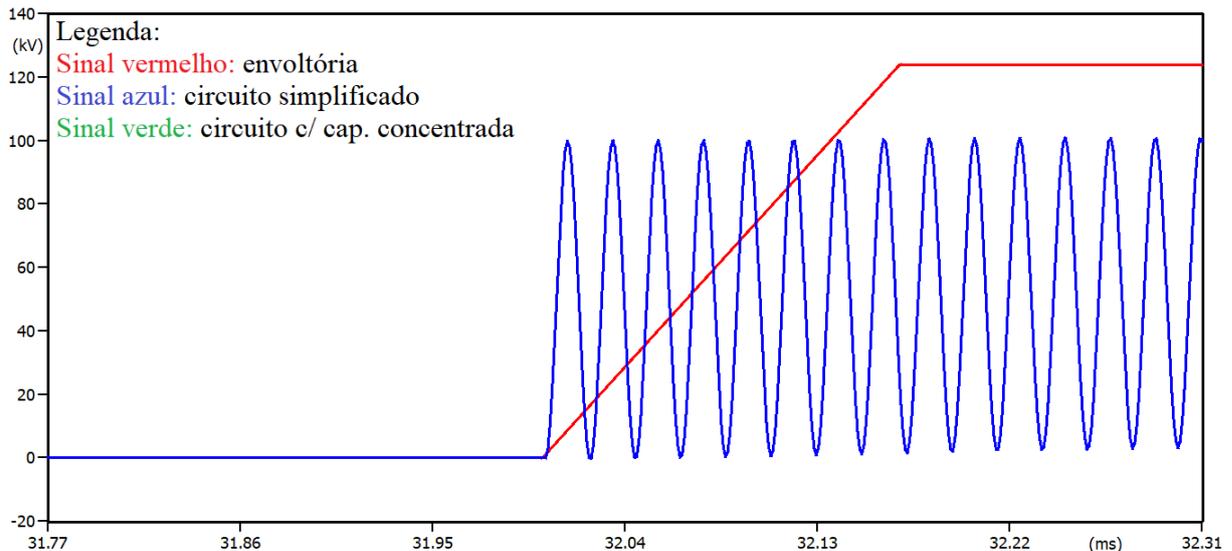
Figura 33 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

Para o segundo caso deste cenário, as fontes foram alteradas a tensão nominal igual a 69 kV. Sendo assim, a Figura 34 demonstra os sinais das TRTs imposta pelo sistema elétrico de teste.

Figura 34 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 14 ilustra os valores encontrados das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema elétrico.

Quadro 14 - Valores extraídos nas simulações em regime T100.

| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV     |                     | Fonte de alimentação em 69 kV       |                     |
|---------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
|         | TRT                                 | 104,8 kV            | TRT                                 | 99,7 kV             |
|         | TCTRT                               | 10,48 kV/μs         | TCTRT                               | 9,97 kV/μs          |
|         | Superou pela tangente               |                     | Superou pela tangente               |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 30.743,16                           | 30.519,43           | 29.258,04                           | 29.045,11           |
| Fase B  | 31.473,16                           | 30.519,43           | 29.953,13                           | 29.045,11           |
| Fase C  | 30.778,92                           | 30.519,43           | 29.292,08                           | 29.045,11           |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2.5 Análise dos resultados

A modelagem do circuito elétrico simplificado vs circuito com capacitância concentrada nos cenários mostrados anteriormente são muito semelhantes entre si. A diferença é apenas a localização e os valores das capacitâncias equivalentes nos circuitos. O circuito simplificado possui duas capacitâncias equivalentes de (1700,38 pF) distribuídas entre a fonte e o disjuntor em análise, enquanto que o circuito com capacitância concentrada possui apenas uma única capacitância equivalente de (3400,76 pF).

O comprimento do circuito elétrico de teste entre a fonte o disjuntor para ambos os circuitos é de aproximadamente 59 metros, pode-se então considerar como um circuito de pequeno trecho. Ou seja, mesmo com as capacitâncias equivalentes estando posicionadas em pontos diferentes nos circuitos, os resultados se mantêm os mesmos. Por esses motivos, visualizam-se apenas um único sinal de TRT nos gráficos apresentados pelo ATPDraw. Isso acontece para todos os cenários e regimes analisados, ou seja, os sinais das TRTs dos dois circuitos estão sobrepostos.

Para os dois cenários em regime T10 não houve superação por TRT no disjuntor em estudo. Além disso, os valores das correntes de curto-circuito respeitaram o limite definido próximo a 10% da capacidade de interrupção do disjuntor.

Os resultados demonstrados para os regimes T30, T60 e T100 evidenciaram que o disjuntor foi superado por TRT. A superação do disjuntor ocorreu através da inclinação da envoltória definida pelo padrão (IEEE Std C37.06, 2009). As amplitudes das correntes de curto-circuito para esses regimes seguiram os limites estabelecidos próximos a 30%, 60% e 100% da capacidade de interrupção do disjuntor.

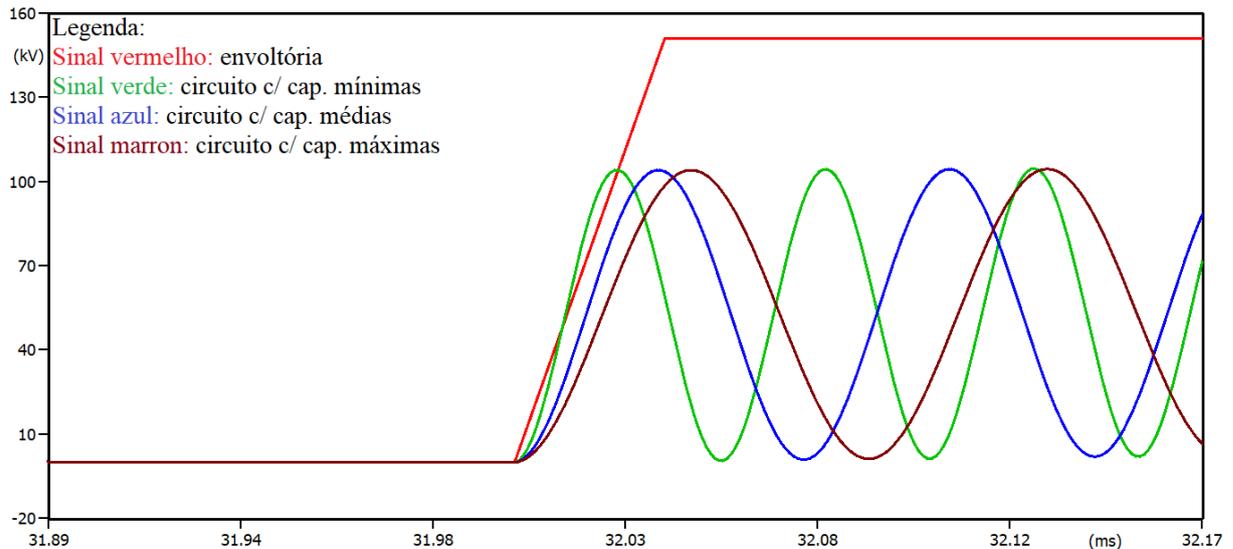
#### **4.2.3 Modelagem no ATPDRAW circuitos com capacitâncias definidas pela norma IEEE std c37.011 (2011)**

Neste cenário de estudo, configurou-se três circuitos elétricos simplificado com capacitância distribuída. Logo, cada circuito de teste utilizou-se valores de capacitâncias (cap.) intrínsecas (mínimas, médias e máximas), conforme especificado pelo padrão (IEEE Std C37.011, 2011). Os sinais das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito serão apresentados a seguir em cada regime de estudo. E, a discussão dos valores atingidos pelas modelagens referente aos cenários T10, T30, T60 e T100, são discutidas na seção de análises dos resultados.

##### **4.2.3.1 *Cenário regime - T10***

Com a fonte de alimentação configurada em 72,5 kV, mais o sistema teste utilizando valores de capacitâncias parasitas de acordo com o padrão (IEEE Std C37.011, 2011), a Figura 35 demonstra os sinais das TRTs obtidas para este arranjo do circuito de teste.

Figura 35 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 15 ilustra os resultados das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito, ambas obtidas por meio de simulação computacional.

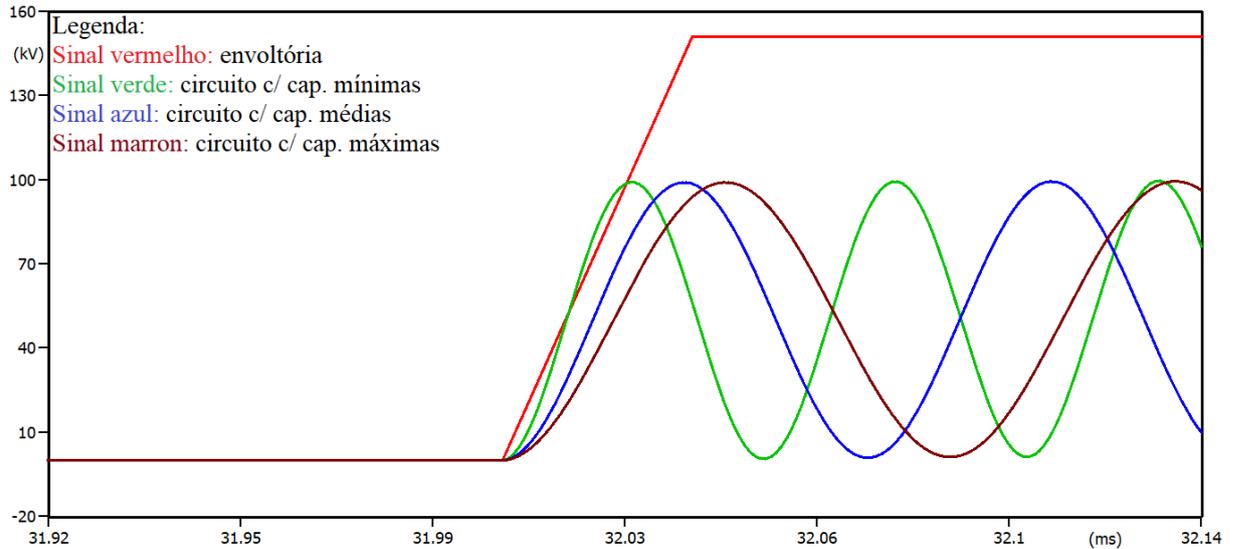
Quadro 15 - Valores encontrados nas simulações em regime T10.

| Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                 |                                  |                      |                                  |                       |                                  |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1º caso                         | Capacitâncias mínimas           |                                  | Capacitâncias médias |                                  | Capacitâncias máximas |                                  |
|                                 | TRT                             | 104,1 kV                         | TRT                  | 104,1 kV                         | TRT                   | 104,1 kV                         |
|                                 | TCTRT                           | 4,52 kV/μs                       | TCTRT                | 3,15 kV/μs                       | TCTRT                 | 2,53 kV/μs                       |
|                                 | Superou pela tangente           |                                  | Não Superou          |                                  | Não Superou           |                                  |
|                                 | Correntes de curto-circuito (A) |                                  |                      |                                  |                       |                                  |
|                                 |                                 | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica  | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos |
| Fase A                          | 1.426,78                        | 1.416,40                         | 1.426,36             | 1.415,98                         | 1.426,57              | 1.416,19                         |
| Fase B                          | 1.460,68                        | 1.416,40                         | 1.460,27             | 1.415,98                         | 1.460,47              | 1.416,19                         |
| Fase C                          | 1.428,44                        | 1.416,40                         | 1.428,02             | 1.415,98                         | 1.428,23              | 1.416,19                         |

Fonte: Próprio Autor.

As fontes de alimentação ainda foram ajustadas a um nível de tensão nominal de 69 kV. E, os resultados com o comportamento dos sinais das TRTs para este arranjo do sistema elétrico de teste são apresentados na Figura 36.

Figura 36 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 16 apresenta os valores atingidos pelas TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema elétrico.

Quadro 16 - Resultados extraídos nas simulações em regime T10.

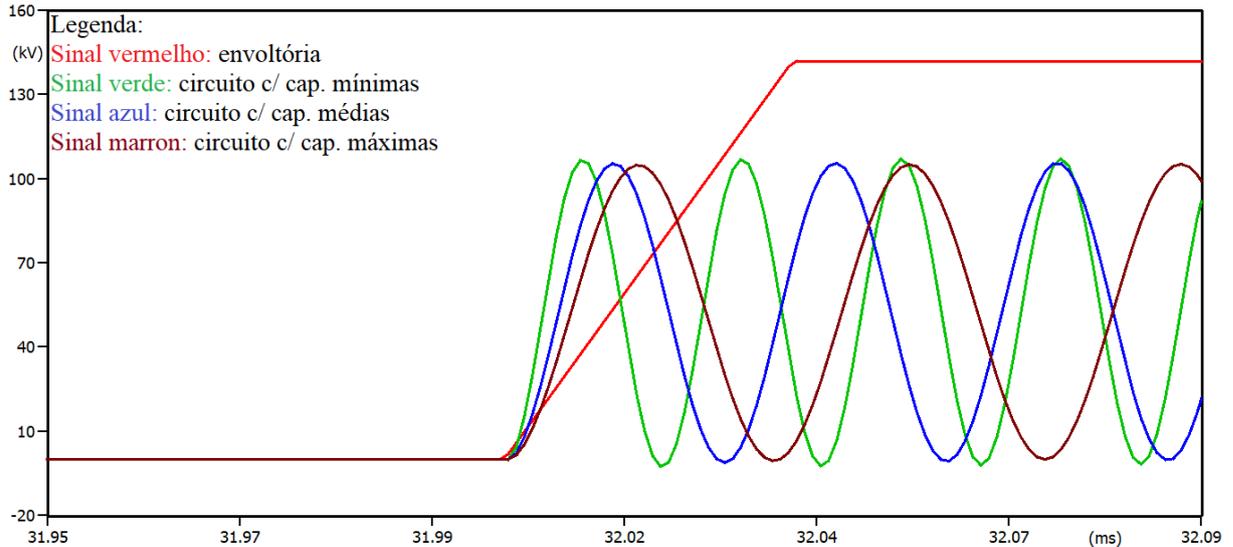
| 2º caso | Fonte de alimentação em 69 kV    |                     |                                  |                     |                                  |                     |
|---------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
|         | Capacitâncias mínimas            |                     | Capacitâncias médias             |                     | Capacitâncias máximas            |                     |
|         | TRT                              | 99,1 kV             | TRT                              | 99 kV               | TRT                              | 99,1 kV             |
|         | TCTRT                            | 4,12 kV/μs          | TCTRT                            | 3 kV/μs             | TCTRT                            | 2,41 kV/μs          |
|         | Superou pela tangente            |                     | Não Superou                      |                     | Não Superou                      |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)  |                     |                                  |                     |                                  |                     |
|         | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 1.357,83                         | 1.347,95            | 1.357,62                         | 1.347,74            | 1.357,69                         | 1.347,81            |
| Fase B  | 1.390,09                         | 1.347,95            | 1.389,89                         | 1.347,74            | 1.389,95                         | 1.347,81            |
| Fase C  | 1.359,29                         | 1.347,95            | 1.359,20                         | 1.347,74            | 1.359,27                         | 1.347,81            |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.3.2 Cenário regime - T30

Configurou-se as fontes em 72,5 kV, neste primeiro caso deste cenário de estudos. Logo, assegurou-se o regime T30 ao reduzir a impedância do equivalente na fonte em 15,62% da nominal, conforme definido pela Tabela 6. A Figura 37 ilustra os sinais das TRTs para o primeiro caso deste cenário.

Figura 37 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 17 apresenta os resultados obtidos das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito, utilizando parâmetros de capacitâncias especificado em norma.

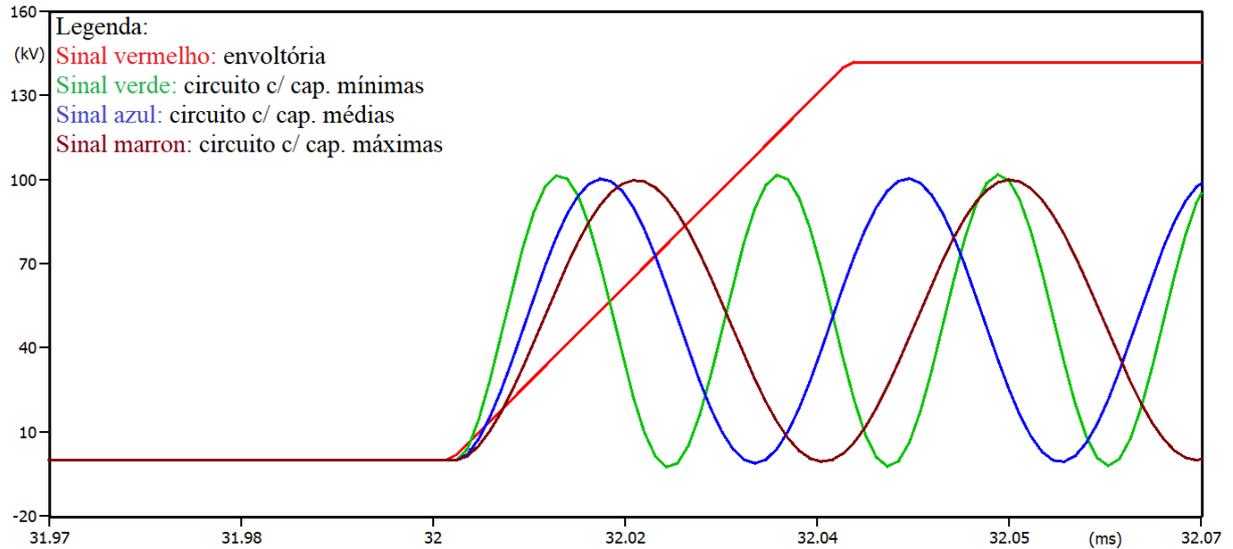
Quadro 17 - Valores obtidos nas simulações em regime T30.

|            |                                 | Fonte de alimentação em 72,5 kV        |                        |  |                        |  |                        |
|------------|---------------------------------|--|------------------------|--|------------------------|--|------------------------|
|            |                                 | Capacitâncias mínimas                  |                        | Capacitâncias médias                   |                        | Capacitâncias máximas                  |                        |
| 1°<br>caso | TRT                             | 106,6 kV                               | TRT                    | 105,4 kV                               | TRT                    | 104,9 kV                               |                        |
|            | TCTRT                           | 11,84 kV/ $\mu$ s                      | TCTRT                  | 8,1 kV/ $\mu$ s                        | TCTRT                  | 6,55 kV/ $\mu$ s                       |                        |
|            | Superou pela tangente           |  | Superou pela tangente  |  | Superou pela tangente  |  |                        |
|            | Correntes de curto-circuito (A) |  |                        |  |                        |  |                        |
|            |                                 | Trifásica<br>assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica | Trifásica<br>assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica | Trifásica<br>assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica |
|            | Fase A                          | 9.139,23                               | 9.072,88               | 9.137,83                               | 9.071,47               | 9.136,43                               | 9.070,05               |
| Fase B     | 9.355,34                        | 9.072,88                               | 9.353,97               | 9.071,47                               | 9.352,59               | 9.070,05                               |                        |
| Fase C     | 9.149,57                        | 9.072,88                               | 9.148,17               | 9.071,47                               | 9.146,77               | 9.070,05                               |                        |

Fonte: Próprio Autor.

Ainda, neste regime em T30 as fontes de alimentação foram alteradas para um nível de tensão nominal de 69 kV. A Figura 38 evidencia o comportamento dos sinais das TRTs para esse arranjo do sistema elétrico de teste.

Figura 38 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 18 demonstra os resultados das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito trifásica para configuração do sistema elétrico.

Quadro 18 - Resultados encontrados nas simulações em regime T30.

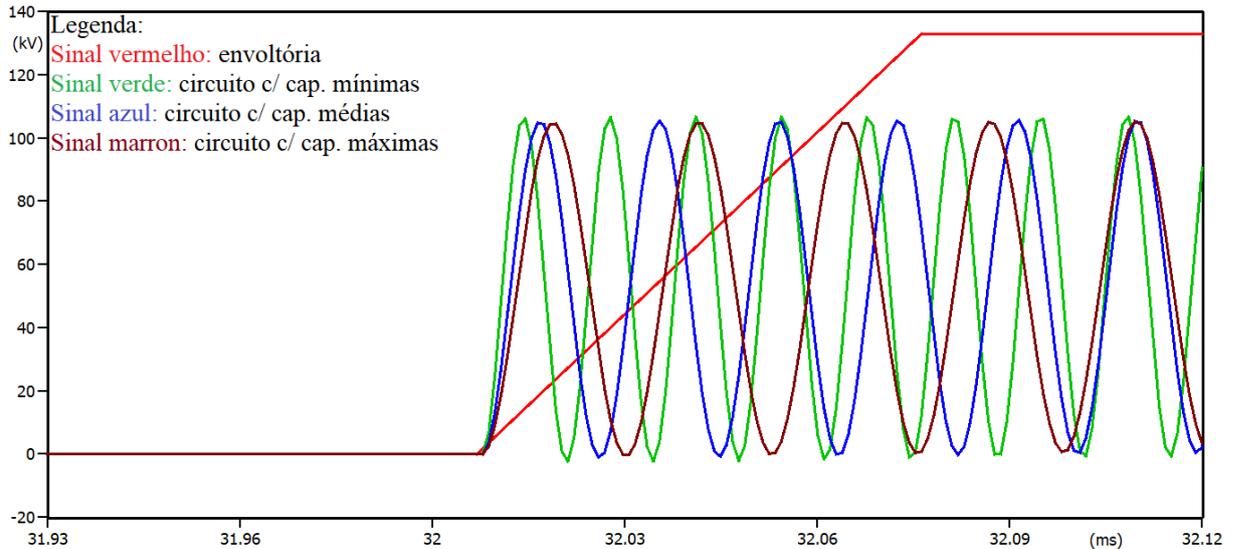
|         |                                 | Fonte de alimentação em 69 kV    |                       |                                  |                       |                                  |                     |
|---------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|
|         |                                 | Capacitâncias mínimas            |                       | Capacitâncias médias             |                       | Capacitâncias máximas            |                     |
| 2º caso | TRT                             | 101,5 kV                         | TRT                   | 100,3 kV                         | TRT                   | 99,8 kV                          |                     |
|         | TCTRT                           | 11,27 kV/μs                      | TCTRT                 | 7,71 kV/μs                       | TCTRT                 | 6,23 kV/μs                       |                     |
|         | Superou pela tangente           |                                  | Superou pela tangente |                                  | Superou pela tangente |                                  |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A) |                                  |                       |                                  |                       |                                  |                     |
|         |                                 | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
|         | Fase A                          | 8.698,32                         | 8.635,18              | 8.696,92                         | 8.633,77              | 8.696,22                         | 8.633,06            |
| Fase B  | 8.904,00                        | 8.635,18                         | 8.902,63              | 8.633,77                         | 8.901,94              | 8.633,06                         |                     |
| Fase C  | 8.708,16                        | 8.635,18                         | 8.706,76              | 8.633,77                         | 8.706,06              | 8.633,06                         |                     |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.3.3 Cenário regime - T60

Neste primeiro cenário de estudos em regime T60 as fontes dos sistemas elétricos foram configuradas em 72,5 kV. Sendo assim, a Figura 39 demonstra os sinais das TRTs encontradas com base em simulação computacional.

Figura 39 - Sinais das TRTs obtido no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 19 apresenta os valores atingidos pelas TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para este arranjo do sistema elétrico, conforme os parâmetros de capacitâncias especificado pelo padrão (IEEE Std C37.011, 2011).

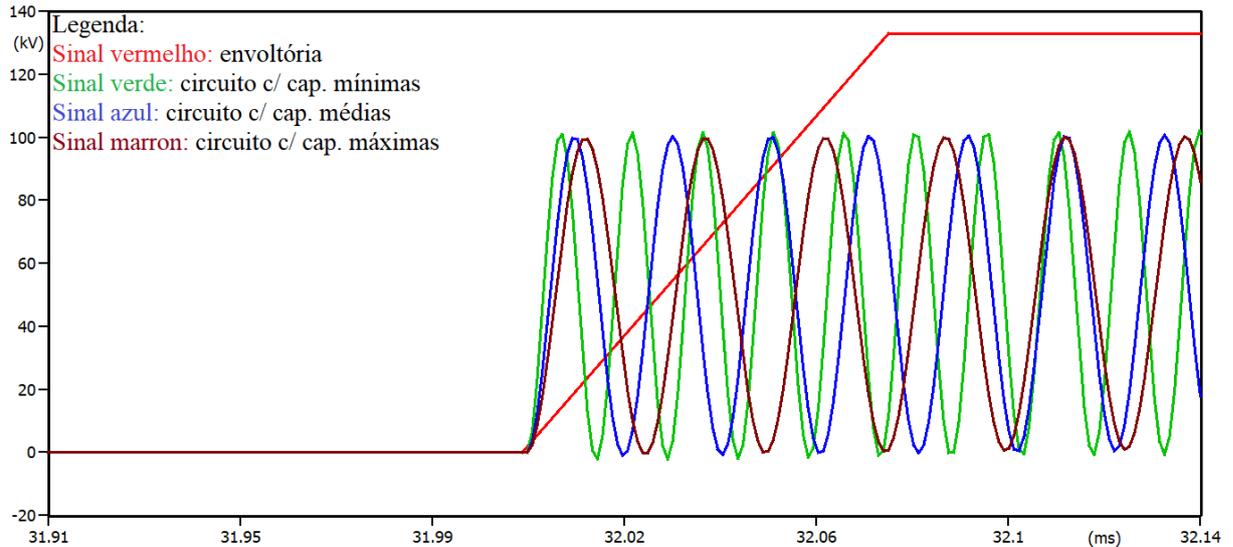
Quadro 19 - Valores extraídos nas simulações em regime T60.

| Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                 |                                  |                       |                                  |                       |                                  |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1º caso                         | Capacitâncias mínimas           |                                  | Capacitâncias médias  |                                  | Capacitâncias máximas |                                  |
|                                 | TRT                             | 106,6 kV                         | TRT                   | 104,8 kV                         | TRT                   | 104,5 kV                         |
|                                 | TCTRT                           | 11,84 kV/μs                      | TCTRT                 | 11,64 kV/μs                      | TCTRT                 | 8,7 kV/μs                        |
|                                 | Superou pela tangente           |                                  | Superou pela tangente |                                  | Superou pela tangente |                                  |
|                                 | Correntes de curto-circuito (A) |                                  |                       |                                  |                       |                                  |
|                                 |                                 | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos |
| Fase A                          | 18.406,41                       | 18.272,34                        | 18.402,91             | 18.268,81                        | 18.403,60             | 18.269,51                        |
| Fase B                          | 18.844,02                       | 18.272,34                        | 18.840,60             | 18.268,81                        | 18.841,28             | 18.269,51                        |
| Fase C                          | 18.427,80                       | 18.272,34                        | 18.424,30             | 18.268,81                        | 18.425,01             | 18.269,51                        |

Fonte: Próprio Autor.

Ao ajustar as fontes de alimentação 69 kV para este regime em T60, assim, obteve-se os sinais das TRTs do sistema elétrico de teste, conforme ilustra a Figura 40.

Figura 40 - Sinais das TRTs obtido no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 20 apresenta valores máximos das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito imposto pelo sistema elétrico de teste.

Quadro 20 - Resultados obtidos nas simulações em regime T60.

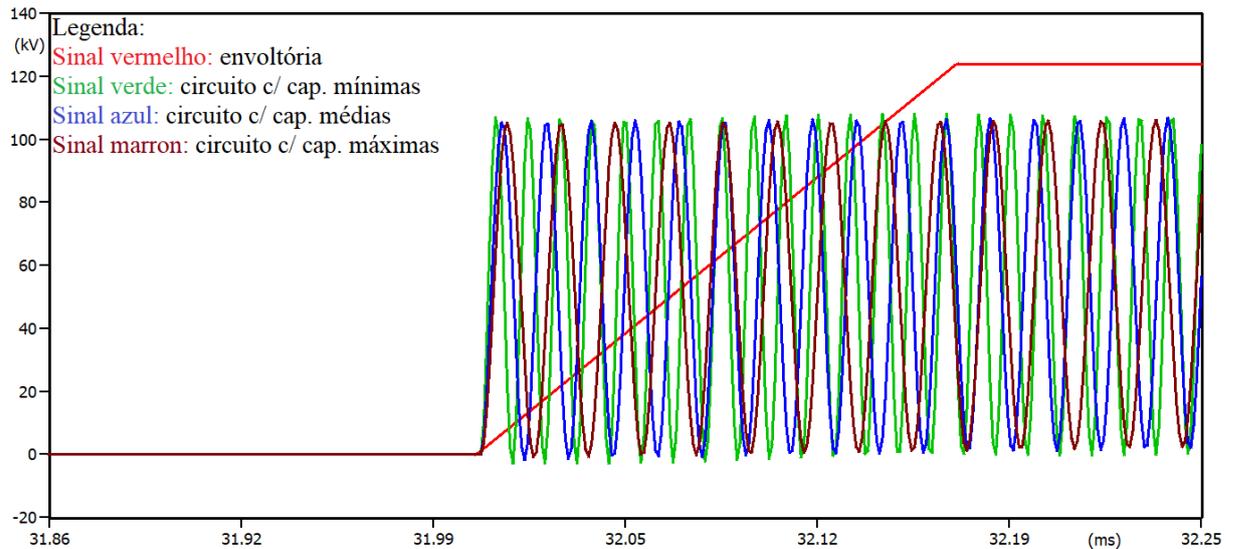
|         |                                 | Fonte de alimentação em 69 kV    |                       |                                  |                       |                                  |                     |
|---------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|
|         |                                 | Capacitâncias mínimas            |                       | Capacitâncias médias             |                       | Capacitâncias máximas            |                     |
| 2º caso | TRT                             | 101 kV                           | TRT                   | 99,7 kV                          | TRT                   | 99,5 kV                          |                     |
|         | TCTRT                           | 14,42 kV/μs                      | TCTRT                 | 11,07 kV/μs                      | TCTRT                 | 8,29 kV/μs                       |                     |
|         | Superou pela tangente           |                                  | Superou pela tangente |                                  | Superou pela tangente |                                  |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A) |                                  |                       |                                  |                       |                                  |                     |
|         |                                 | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica   | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 17.518,17                       | 17.390,58                        | 17.514,66             | 17.387,04                        | 17.513,96             | 17.386,34                        |                     |
| Fase B  | 17.934,65                       | 17.390,58                        | 17.931,21             | 17.387,04                        | 17.930,54             | 17.386,34                        |                     |
| Fase C  | 17.588,55                       | 17.390,58                        | 17.535,04             | 17.387,04                        | 17.534,35             | 17.386,34                        |                     |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.3.4 Cenário regime - T100

Com o foco em assegurar o regime T100 neste cenário, o disjuntor em estudo foi submetido a níveis de corrente de curto-circuito próximo a 100 % da capacidade de suportabilidade. Isto foi possível reduzindo as impedâncias equivalentes nas fontes em 4,63% da nominal, conforme especificado pela Tabela 6. A Figura 41 apresenta os sinais das TRTs impostas pelos sistemas elétricos com as fontes de tensão ajustadas em 72,5 kV.

Figura 41 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 21 apresenta os resultados alcançados pelos sinais das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito para essa configuração do sistema teste.

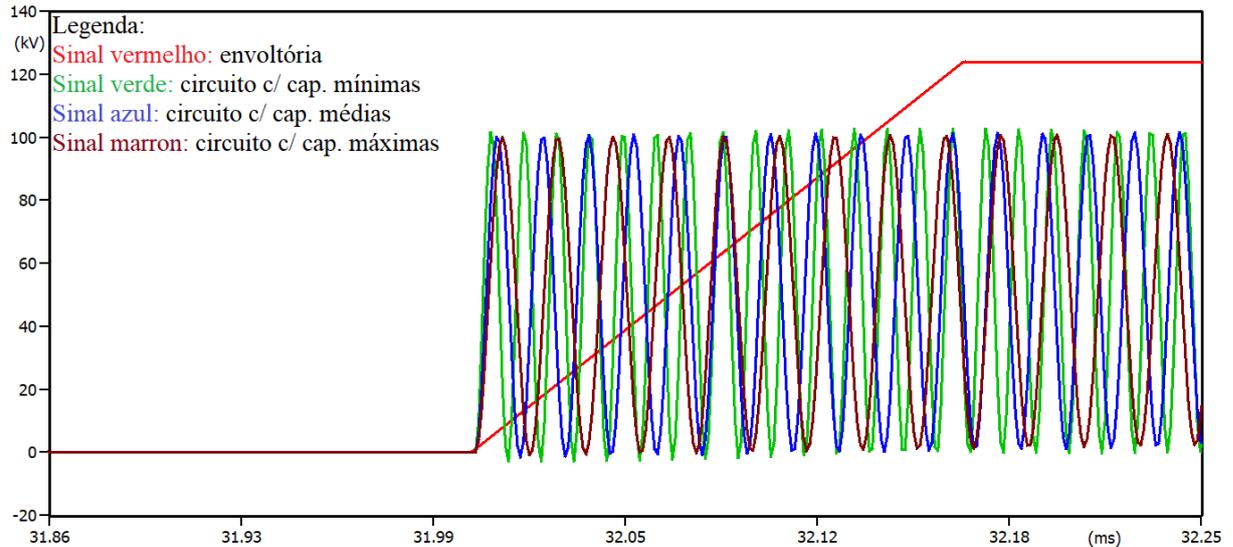
Quadro 21 - Valores encontrados nas simulações em regime T100.

| Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                  |                     |                                  |                     |                                  |                     |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1º caso                         | Capacitâncias mínimas            |                     | Capacitâncias médias             |                     | Capacitâncias máximas            |                     |
|                                 | TRT                              | 106,7 kV            | TRT                              | 105,2 kV            | TRT                              | 105,1 kV            |
|                                 | TCTRT                            | 21,34 kV/ $\mu$ s   | TCTRT                            | 15,02 kV/ $\mu$ s   | TCTRT                            | 11,67 kV/ $\mu$ s   |
|                                 | Superou pela tangente            |                     | Superou pela tangente            |                     | Superou pela tangente            |                     |
|                                 | Correntes de curto-circuito (A)  |                     |                                  |                     |                                  |                     |
|                                 | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A                          | 30.748,77                        | 30.525,09           | 30.748,77                        | 30.525,09           | 30.743,16                        | 30.519,43           |
| Fase B                          | 31.478,95                        | 30.525,09           | 31.478,95                        | 30.525,09           | 31.473,47                        | 30.519,43           |
| Fase C                          | 30.784,53                        | 30.525,09           | 30.784,53                        | 30.525,09           | 30.778,92                        | 30.519,43           |

Fonte: Próprio Autor.

Ainda neste regime as fontes de alimentação do sistema teste foram configuradas em 69 kV. E, o comportamento dos sinais das TRTs imposta pelo sistema elétrico frente a um curto-circuito, são demonstrados pela Figura 42.

Figura 42 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 22 demonstra os resultados encontrados das TRTs, TCTRTs e valores de correntes de curto-circuito para este arranjo do sistema elétrico.

Quadro 22 - Resultados extraídos nas simulações em regime T100.

| 2°<br>caso | Fonte de alimentação em 69 kV   |  |                        |  |                        |  |
|------------|---------------------------------|--|------------------------|--|------------------------|--|
|            | Capacitâncias mínimas           |  | Capacitâncias médias   |  | Capacitâncias máximas  |  |
|            | TRT                             | 102,2 kV                               | TRT                    | 100,1 kV                               | TRT                    | 100 kV                                 |
|            | TCTRT                           | 20,32 kV/ $\mu$ s                      | TCTRT                  | 14,3 kV/ $\mu$ s                       | TCTRT                  | 11,11 kV/ $\mu$ s                      |
|            | Superou pela tangente           |  | Superou pela tangente  |  | Superou pela tangente  |  |
|            | Correntes de curto-circuito (A) |  |                        |  |                        |  |
|            |                                 | Trifásica<br>assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica | Trifásica<br>assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica | Trifásica<br>assimétrica<br>0,5 ciclos |
| Fase A     | 29.264,37                       | 29.051,48                              | 29.262,17              | 29.048,64                              | 29.258,75              | 29.045,82                              |
| Fase B     | 29.959,31                       | 29.051,48                              | 29.959,16              | 29.048,64                              | 29.953,82              | 29.045,82                              |
| Fase C     | 29.298,40                       | 29.051,48                              | 29.296,31              | 29.048,64                              | 29.292,79              | 29.045,82                              |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.3.5 *Análise dos resultados*

Os valores obtidos nestes cenários de estudos utilizando valores de capacitâncias parasitas especificados pelo padrão (IEEE Std C37.011, 2011), foi extremamente importante. Pois assim, foi possível verificar as diferenças nos resultados das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito no sistema teste. No primeiro e o segundo cenário em regime T10, o disjuntor foi superado por TRT em função dos valores de capacitâncias mínimas, na qual foi configurado o sistema teste. Isso demonstra que valores das capacitâncias intrínsecas acoplado ao circuito,

influencia no comportamento da TRT imposta pelo sistema elétrico. Ainda em regime T10, os circuitos parametrizados com valores de capacitâncias médias e máximas, respectivamente, não houve superação por TRT, mesmo com as impedâncias equivalentes do sistema elétrico de teste sendo configuradas com valores iguais. A única diferença entre os circuitos de teste neste regime são os valores das capacitâncias. Além disso, ainda percebe-se que os valores extraídos das correntes curto-circuito são inferiores a 10% da capacidade de interrupção do disjuntor em estudo.

Os resultados encontrados para os regimes em T30, T60 e T100, mostram que o disjuntor em análise foi superado por TRT em todos os cenários. Isso ocorreu para os três circuitos simulados, mesmo configurando as capacitâncias com valores mínimos, médios e máximos. Vale salientar que para esses três regimes T30, T60 e T100, a impedância equivalente na fonte foi reduzida conforme especificado na Tabela 6. Estas reduções nas impedâncias equivalentes nas fontes também contribuem para o sinal da TRT superar o disjuntor. Por esses motivos, o disjuntor em análise ficou submetido a níveis de curto-circuito valores próximos a 30%, 60% e 100% da capacidade de interrupção.

E por fim, todos os cenários analisados em regimes T10, T30, T60 e T100, nota-se que quanto maior o valor da capacitância intrínseca acoplado no sistema teste, menor é a TCTRT. Isso demonstra que a inclusão de capacitâncias no sistema elétrico pode ser uma forma de compensar a superação em um disjuntor por TRT.

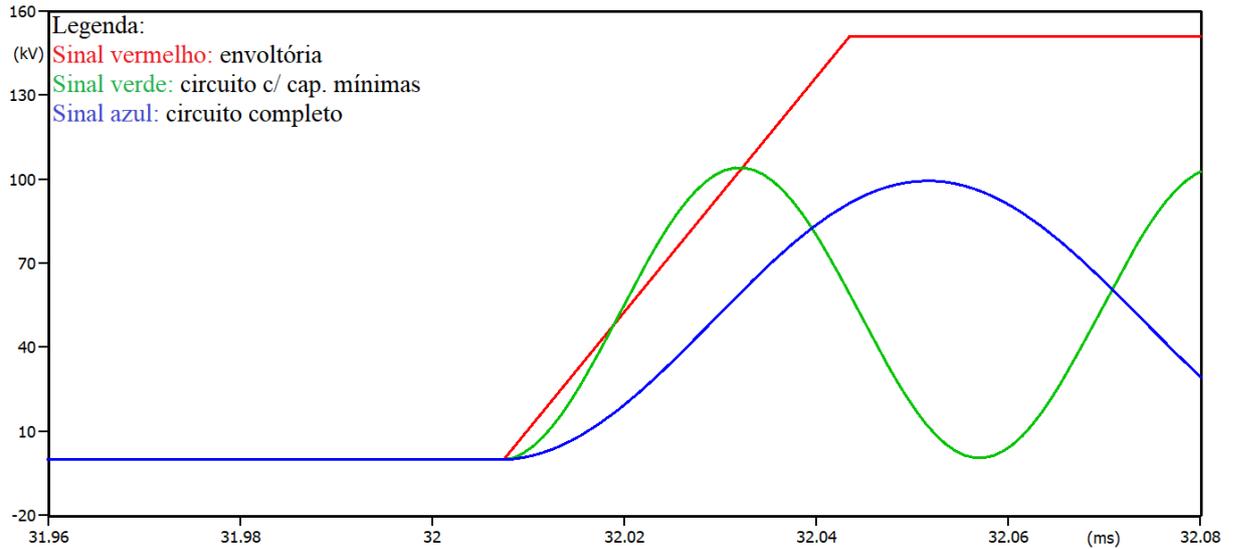
#### **4.2.4 Modelagem do circuito elétrico completo vs circuito elétrico simplificado com capacitâncias definidas em norma e distribuídas de acordo com modelo PI.**

O objetivo destes cenários de estudos a seguir é averiguar o comportamento das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito. Os cenários propostos são entre o circuito completo utilizando parâmetros reais do sistema elétrico e circuito elétrico simplificado utilizando valores de capacitâncias mínimas, conforme especificado pelo padrão (IEEE Std C37.011, 2011).

##### **4.2.4.1 *Cenário regime - T10***

Para os estudos em regime T10 a impedância equivalente na fonte foi respeitada conforme informada pela concessionária de energia elétrica. Isto, para o circuito completo e o circuito simplificado utilizando capacitâncias mínimas. Sendo assim, neste primeiro cenário de estudos as fontes de alimentação do sistema teste foram configuradas com nível de tensão em 72,5 kV. A Figura 43 ilustra os sinais das TRTs obtidos na simulação computacional.

Figura 43 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 23 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito trifásica para este arranjo do sistema teste.

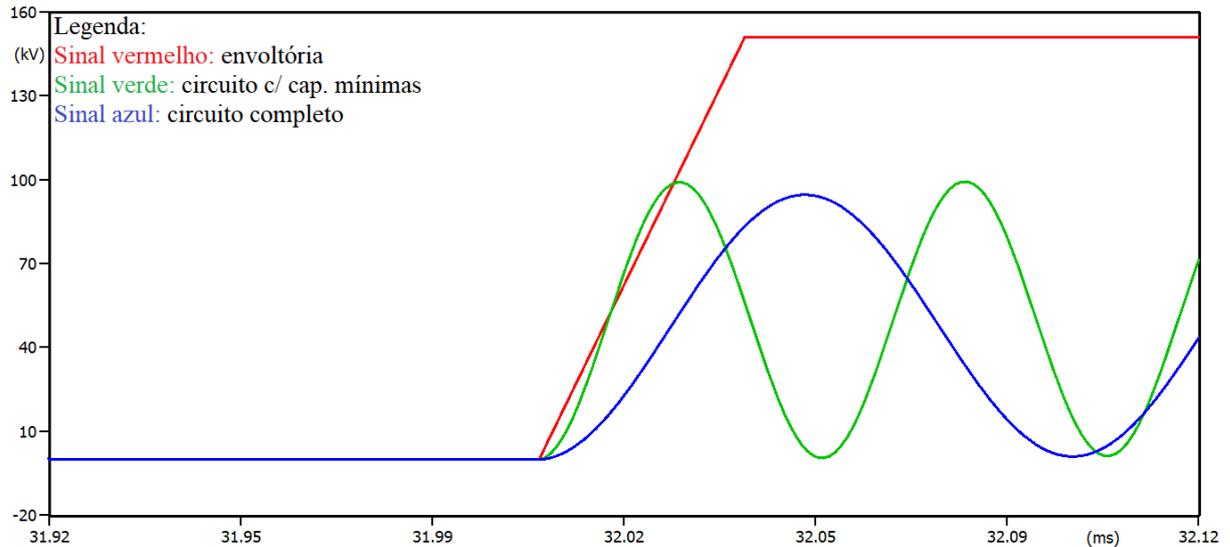
Quadro 23 - Valores obtidos nas simulações em regime T10.

| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV  |                     |                                  |                     |
|---------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
|         | Circuito completo                |                     | Circuito capacitâncias mínimas   |                     |
|         | TRT                              | 104,1 kV            | TRT                              | 104,1 kV            |
|         | TCTRT                            | 2,26 kV/μs          | TCTRT                            | 4,52 kV/μs          |
|         | Não superou                      |                     | Superou pela tangente            |                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A)  |                     |                                  |                     |
|         | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A  | 1.450,62                         | 1.444,68            | 1.426,78                         | 1.416,40            |
| Fase B  | 1.483,48                         | 1.444,68            | 1.460,68                         | 1.416,40            |
| Fase C  | 1.459,20                         | 1.444,68            | 1.428,44                         | 1.416,40            |

Fonte: Próprio Autor.

Ainda neste cenário em regime T10, as fontes de alimentação foram ajustadas em 69 kV. A Figura 44 apresenta o comportamento dos sinais das TRTs imposta pelo sistema elétrico de teste para esta configuração.

Figura 44 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T10.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 24 apresenta os resultados impostos pelo sistema elétrico frente a um curto-circuito na barra 105.

Quadro 24 - Resultados encontrados nas simulações em regime T10.

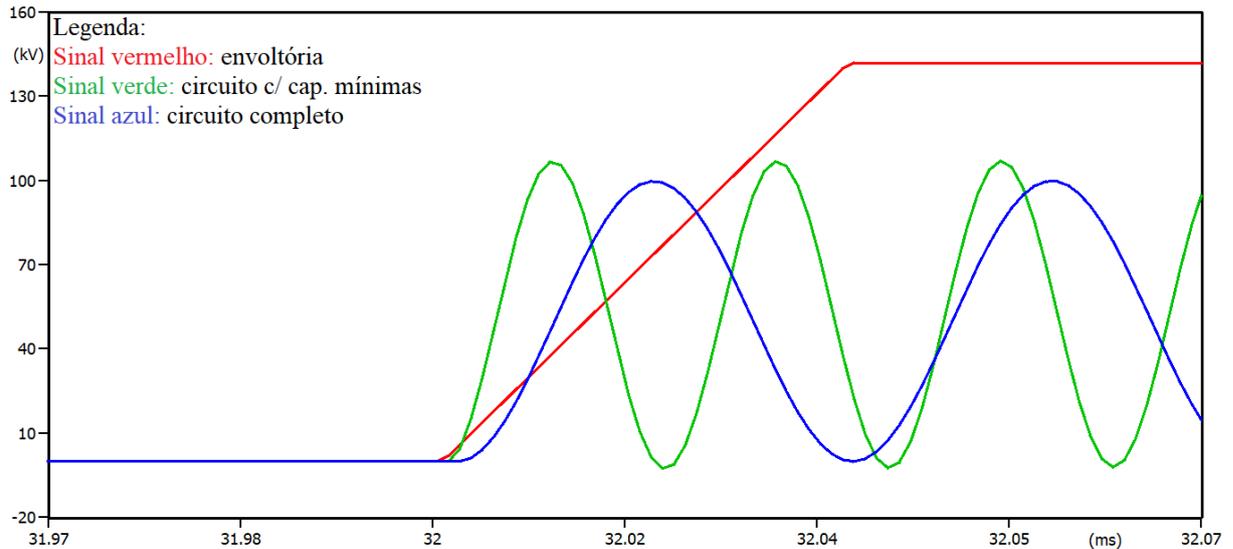
| Fonte de alimentação em 69 kV |                                     |                     |                                     |                     |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| 2°<br>caso                    | Circuito completo                   |                     | Circuito capacitâncias mínimas      |                     |
|                               | TRT                                 | 95 kV               | TRT                                 | 99,1 kV             |
|                               | TCTRT                               | 2,15 kV/μs          | TCTRT                               | 4,12 kV/μs          |
|                               | Não superou                         |                     | Superou pela tangente               |                     |
|                               | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|                               | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
|                               | Fase A                              | 1.380,59            | 1.374,89                            | 1.357,83            |
| Fase B                        | 1.411,81                            | 1.374,89            | 1.390,09                            | 1.347,95            |
| Fase C                        | 1.361,98                            | 1.374,89            | 1.359,29                            | 1.347,95            |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.4.2 Cenário regime - T30

Neste cenário garantiu-se o regime T30, ao reduzir a impedância equivalente das fontes de alimentação em 15,62% da nominal para ambos os circuitos de teste. A Figura 45 demonstra os sinais das TRTs para configuração da fonte em 72,5 kV.

Figura 45 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 25 ilustra os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito trifásica assimétrica e simétrica imposto por este arranjo do sistema teste.

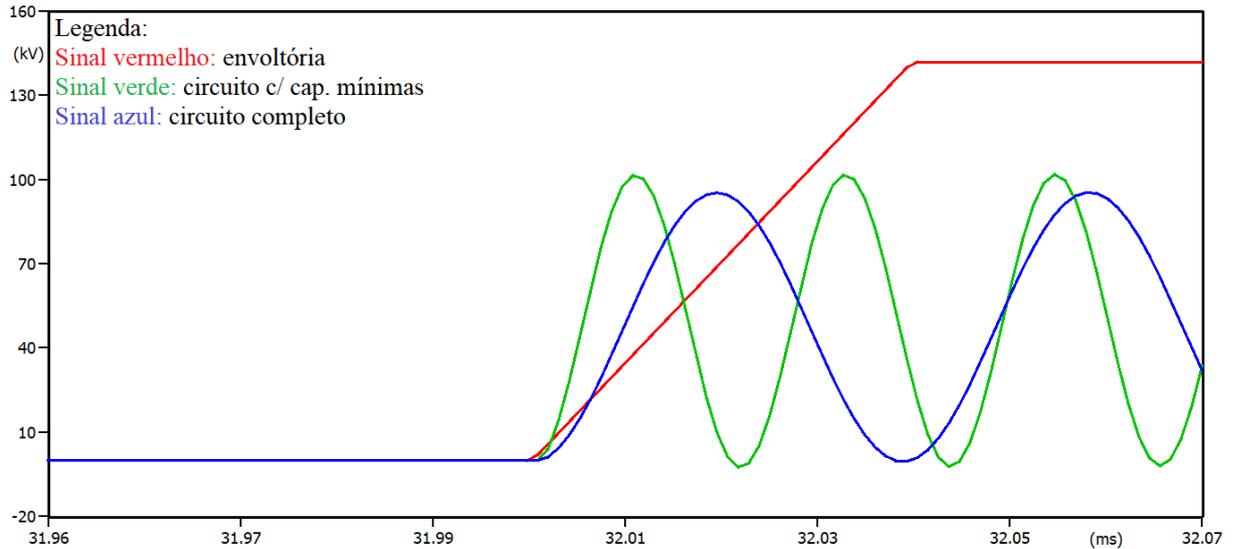
Quadro 25 - Valores extraídos nas simulações em regime T30.

| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                     |                                |                                     |
|---------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|         | Circuito completo               |                                     | Circuito capacitâncias mínimas |                                     |
|         | TRT                             | 99,7 kV                             | TRT                            | 106,6 kV                            |
|         | TCTRT                           | 5,86 kV/μs                          | TCTRT                          | 11,84 kV/μs                         |
|         | Superou pela tangente           |                                     | Superou pela tangente          |                                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A) |                                     |                                |                                     |
|         |                                 | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos |
| Fase A  | 9.139,50                        | 9.077,83                            | 9.139,23                       | 9.072,88                            |
| Fase B  | 9.356,18                        | 9.077,83                            | 9.355,34                       | 9.072,88                            |
| Fase C  | 9.157,48                        | 9.077,83                            | 9.149,57                       | 9.072,88                            |

Fonte: Próprio Autor.

Ainda neste cenário em regime T30 as fontes de alimentação dos circuitos de teste foram configuradas em 69 kV. Logo, a Figura 46 apresenta os sinais das TRTs impostos por esse arranjo do circuito elétrico.

Figura 46 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T30.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 26 ilustra os resultados atingidos pelas TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito conforme a configuração do sistema teste.

Quadro 26 - Resultados obtidos nas simulações em regime T30.

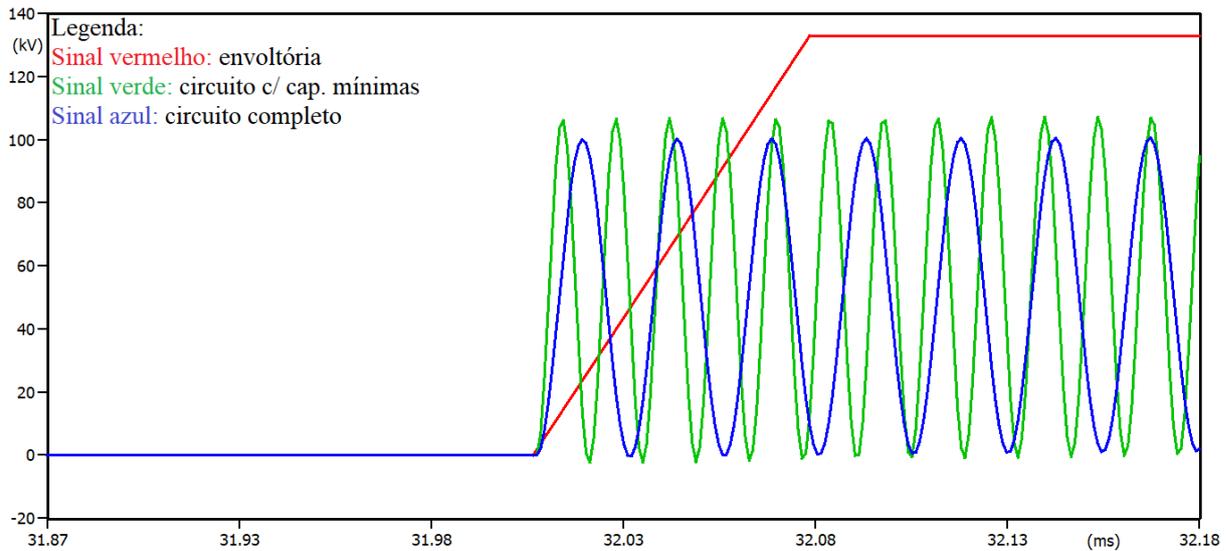
| 2º caso | Fonte de alimentação em 69 kV       |                        |                                     |                        |
|---------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
|         | Circuito completo                   |                        | Circuito capacitâncias mínimas      |                        |
|         | TRT                                 | 95,3 kV                | TRT                                 | 101,5 kV               |
|         | TCTRT                               | 5,6 kV/ $\mu$ s        | TCTRT                               | 11,27 kV/ $\mu$ s      |
|         | Superou pela tangente               |                        | Superou pela tangente               |                        |
|         | Correntes de curto-circuito (A)     |                        |                                     |                        |
|         | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica<br>simétrica |
| Fase A  | 8.706,97                            | 8.647,20               | 8.698,32                            | 8.635,18               |
| Fase B  | 8.913,86                            | 8.647,20               | 8.904,00                            | 8.635,18               |
| Fase C  | 8.722,74                            | 8.647,20               | 8.708,16                            | 8.635,18               |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.4.3 Cenário regime - T60

Este o cenário de estudos assegurou-se que o disjuntor em análise fosse submetido em regime T60. Isso foi possível reduzindo a impedância equivalente na fonte em 7,75% da nominal. Sendo assim, as fontes de alimentação dos circuitos de testes foram ajustadas em 72,5 kV. A Figura 47 mostra os sinais das TRTs de acordo com o arranjo do sistema elétrico.

Figura 47 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 27 ilustra os valores máximos das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito trifásica para este cenário.

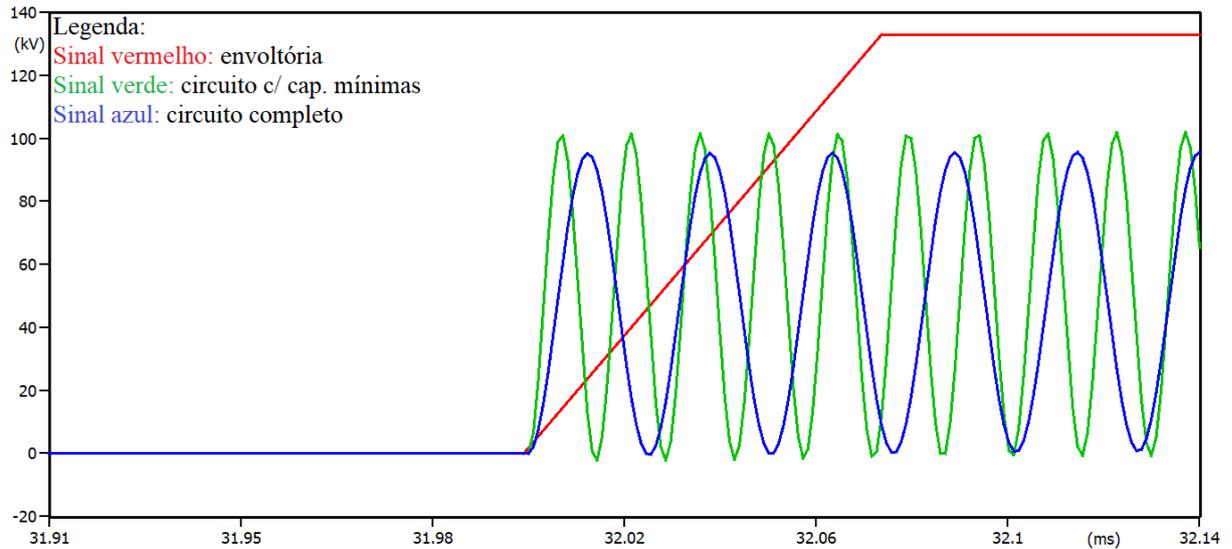
Quadro 27 - Valores encontrados nas simulações em regime T60.

| 1º caso | Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                     |                                |                                     |
|---------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|         | Circuito completo               |                                     | Circuito capacitâncias mínimas |                                     |
|         | TRT                             | 104,6 kV                            | TRT                            | 106,6 kV                            |
|         | TCTRT                           | 8,04 kV/ $\mu$ s                    | TCTRT                          | 11,84 kV/ $\mu$ s                   |
|         | Superou pela tangente           |                                     | Superou pela tangente          |                                     |
|         | Correntes de curto-circuito (A) |                                     |                                |                                     |
|         |                                 | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica            | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos |
| Fase A  | 18.389,64                       | 18.260,32                           | 18.406,41                      | 18.272,34                           |
| Fase B  | 18.827,44                       | 18.260,32                           | 18.844,02                      | 18.272,34                           |
| Fase C  | 18.418,52                       | 18.260,32                           | 18.427,80                      | 18.272,34                           |

Fonte: Próprio Autor.

Para o segundo cenário em T60 as fontes ainda foram alteradas para uma tensão nominal de 69 kV. E, através da Figura 48 é possível evidenciar os sinais das TRTs para esse arranjo do sistema elétrico.

Figura 48 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T60.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 28 apresenta os valores das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito trifásica provocada na barra 105.

Quadro 28 - Resultados extraídos nas simulações em regime T60.

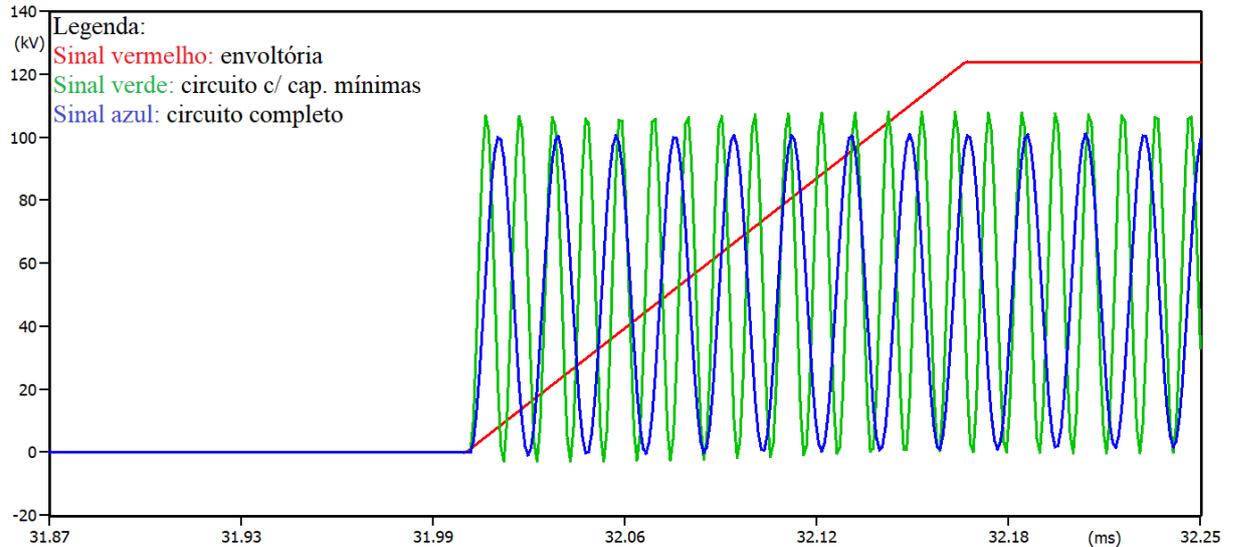
| Fonte de alimentação em 69 kV |                                  |                                |                                  |                     |           |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------|
| Circuito completo             |                                  | Circuito capacitâncias mínimas |                                  |                     |           |
| 2°<br>caso                    | TRT                              | 95,7 kV                        | TRT                              | 101 kV              |           |
|                               | TCTRT                            | 7,93 kV/ $\mu$ s               | TCTRT                            | 14,42 kV/ $\mu$ s   |           |
|                               | Superou pela tangente            |                                | Superou pela tangente            |                     |           |
|                               | Correntes de curto-circuito (A)  |                                |                                  |                     |           |
|                               | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica            | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica |           |
|                               | Fase A                           | 17.522,72                      | 17.399,77                        | 17.518,17           | 17.390,58 |
| Fase B                        | 17.938,88                        | 17.399,77                      | 17.934,65                        | 17.390,58           |           |
| Fase C                        | 17.550,15                        | 17.399,77                      | 17.588,55                        | 17.390,58           |           |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.4.4 Cenário regime - T100

Para esse cenário assegurou-se o regime T100 reduzindo a impedância equivalente na fonte em 4,63% da nominal. Com isso, os disjuntores dos circuitos de testes foram submetidos a valores de correntes de curto-circuito próximo a 100 % da capacidade de interrupção. Assim, as fontes de alimentação foram ajustadas em 72,5 kV. A Figura 49 apresenta os sinais das TRTs para esta configuração no circuito elétrico.

Figura 49 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 29 ilustra os valores máximos atingidos pelas TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito neste cenário.

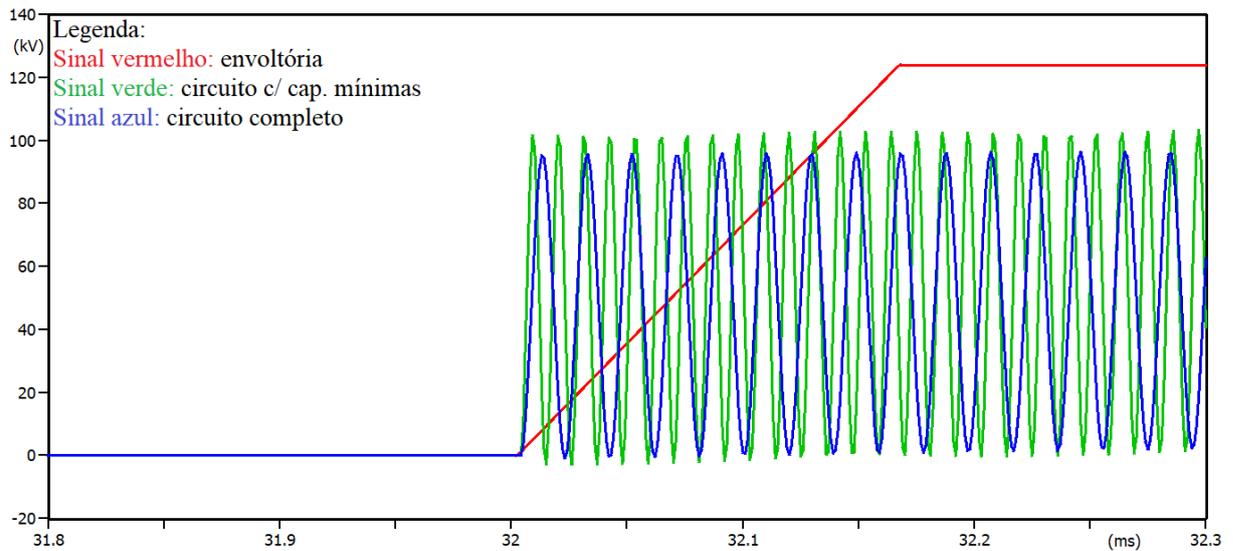
Quadro 29 - Valores obtidos nas simulações em regime T100.

| Fonte de alimentação em 72,5 kV |                                 |                                  |                                |                                  |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1º caso                         | Circuito completo               |                                  | Circuito capacitâncias mínimas |                                  |
|                                 | TRT                             | 104,8 kV                         | TRT                            | 106,7 kV                         |
|                                 | TCTRT                           | 10,48 kV/μs                      | TCTRT                          | 21,34 kV/μs                      |
|                                 | Superou pela tangente           |                                  | Superou pela tangente          |                                  |
|                                 | Correntes de curto-circuito (A) |                                  |                                |                                  |
|                                 |                                 | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos | Trifásica simétrica            | Trifásica assimétrica 0,5 ciclos |
| Fase A                          | 30.758,75                       | 30.530,04                        | 30.748,77                      | 30.525,09                        |
| Fase B                          | 31.488,67                       | 30.530,04                        | 31.478,95                      | 30.525,09                        |
| Fase C                          | 30.786,84                       | 30.530,04                        | 30.784,53                      | 30.525,09                        |

Fonte: Próprio Autor.

Ainda neste segundo cenário em regime T100 as fontes foram alteradas para um nível de tensão nominal em 69 kV. A Figura 50 evidencia os sinais das TRTs para esta configuração do sistema elétrico.

Figura 50 - Sinais das TRTs obtidos no ATPDraw com suprimento em 69 kV - T100.



Fonte: Próprio Autor.

O Quadro 30 ilustra os resultados alcançados pelas TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito conforme essa configuração do sistema teste.

Quadro 30 - Resultados encontrados nas simulações em regime T100.

| 2°<br>caso | Fonte de alimentação em 69 kV       |                     |                                     |                     |
|------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
|            | Circuito completo                   |                     | Circuito capacitâncias mínimas      |                     |
|            | TRT                                 | 96 kV               | TRT                                 | 102,2 kV            |
|            | TCTRT                               | 10,56 kV/μs         | TCTRT                               | 20,32 kV/μs         |
|            | Superou pela tangente               |                     | Superou pela tangente               |                     |
|            | Correntes de curto-circuito (A)     |                     |                                     |                     |
|            | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica | Trifásica assimétrica<br>0,5 ciclos | Trifásica simétrica |
| Fase A     | 29.272,69                           | 29.055,01           | 29.264,37                           | 29.051,48           |
| Fase B     | 29.968,14                           | 29.055,01           | 29.959,31                           | 29.051,48           |
| Fase C     | 29.299,63                           | 29.055,01           | 29.298,40                           | 29.051,48           |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.5 Análise dos resultados

Com base nas configurações dos circuitos completo e circuito simplificado utilizando capacitâncias mínimas, os resultados para estes cenários propostos chamam atenção pelas diferenças apresentadas nos sinais das TRTs, principalmente em regime T10. O circuito completo representa a instalação real dos equipamentos no interior da subestação elétrica e o circuito simplificado representa um circuito equivalente reduzido utilizando valores de capacitâncias mínimas especificado pelo padrão (IEEE Std C37.011, 2011).

Sendo assim, na primeira análise em regime T10, o circuito completo foi configurado utilizando parâmetros reais de capacitâncias intrínsecas, logo o disjuntor em estudo não foi superado por TRT. Ainda em regime T10, o circuito simplificado foi parametrizado com valores de capacitâncias mínimas especificadas pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011) e o disjuntor foi superado por TRT pela taxa de crescimento da envoltória. Ou seja, em uma possível investigação de TRT de um sistema elétrico, e em caso de não possuir estes dados reais de capacitâncias, e nesta ausência destes parâmetros e optar pelo uso de valores mínimos de capacitâncias definidos em norma, pode-se comprometer um disjuntor de alta tensão de forma errônea para este sistema teste. Os níveis de correntes de curto-circuito deste cenário respeitaram os limites estabelecidos em 10% da capacidade de interrupção do disjuntor, mesmo alterando os níveis de tensão na fonte de alimentação de 72,5 para 69 kV.

Para todos os cenários ilustrados nos regimes T10, T30, T60 e T100, os valores encontrados para as TRTs e TCTRTs para o circuito completo são resultados mais conservadores do que o circuito simplificado. Isso acontece, pois a modelagem do circuito completo foi considerada os parâmetros como resistências e reatâncias indutivas, tanto de sequência positiva, negativa e zero, enquanto que o circuito simplificado foi modelado considerando apenas resistências e reatâncias indutiva de sequência positiva. No entanto, as correntes de curto-circuito se mantiveram dentro dos limites estabelecidos para cada regime de análise.

#### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados todos os resultados obtidos nos cenários de estudos propostos, bem como, as análises dos resultados alcançados. Diversos cenários foram realizados para o circuito elétrico teste, com o objetivo em verificar o comportamento do sinal de TRT. Com estes cenários apresentados foi possível perceber que ao alterar na fonte a impedância equivalente ou nível de tensão, ambas modificam a resposta das TRTs, TCTRTs e correntes de curto-circuito. Bem como, ao alterar os valores das capacitâncias intrínsecas dos equipamentos do sistema. Ainda, estes resultados foram comparados com o foco em visualizar de forma fácil as diferenças dos sinais das TRTs.

## 5 MODELAGEM ANÁLITICA DE TRT

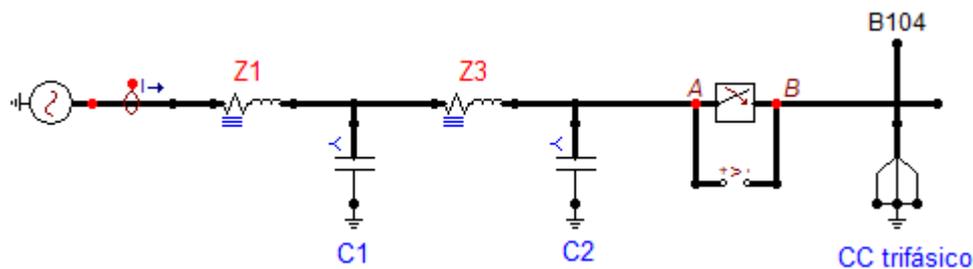
### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento de uma modelagem analítica do circuito elétrico simplificado. O objetivo é apresentar uma metodologia através de cálculos matemáticos que seja capaz de reproduzir um sinal de TRT em um disjuntor de proteção em alta tensão, frente a um curto-circuito. Além disso, foi realizada simulação computacional no ATPDraw para validar o sinal encontrado por meio do método da modelagem analítica. Sendo assim, foi possível identificar se o disjuntor está ou não dentro dos limites especificados pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011).

#### 5.1.1 Desenvolvimento da modelagem analítica

Para o desenvolvimento da modelagem analítica, foi utilizado o circuito elétrico simplificado, conforme demonstra a Figura 51. Além disso, a Figura 51 ilustra o local onde foi configurada a falta e os elementos que compõem o circuito, tais como fonte, impedâncias, capacitâncias e disjuntor.

Figura 51 - Circuito simplificado utilizado na modelagem analítica.



Fonte: Próprio Autor.

As características elétricas dos elementos utilizados no circuito elétrico simplificado para este estudo são:

- Resistências de sequência positiva;
- Reatâncias indutiva de sequência positiva;
- Capacitâncias intrínsecas dos equipamentos, tais como:
  - Contatos elétricos do disjuntor;
  - Transformador de potência;
  - Transformador de corrente;

- Trechos de cabos.

A Tabela 14 apresenta os valores de impedâncias equivalentes na fonte e dos trechos de cabos para esta configuração do circuito elétrico. Com estes dados, configurou-se o circuito ilustrado na Figura 51.

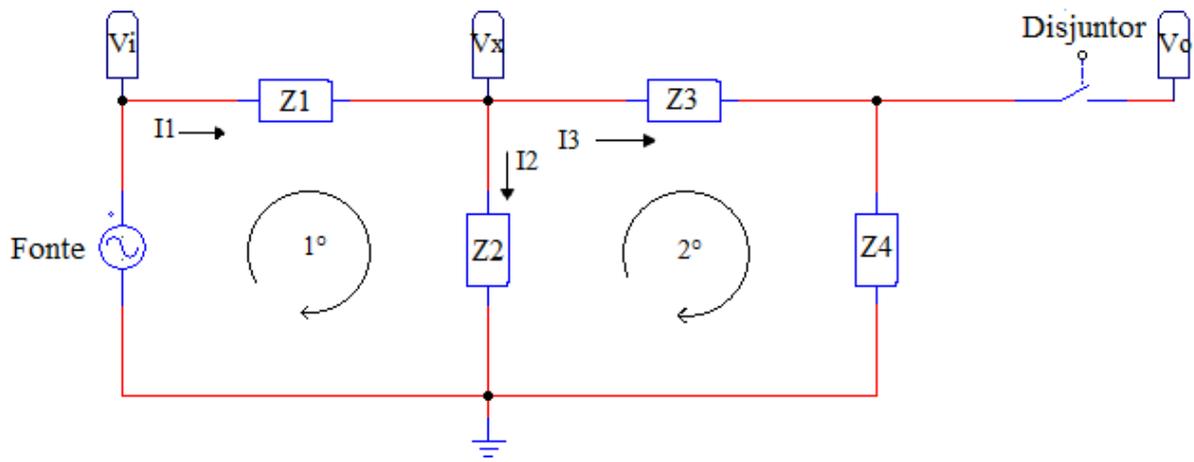
Tabela 14 - Parâmetros de impedâncias do circuito simplificado.

| Tensão alimentação | Impedâncias sequência (+)  | Capacitância C1= C2                  |
|--------------------|--|--------------------------------------|
| 69 kV              | Z1 fonte $14,2206 + j 25,9097 \Omega$<br>Z3 trecho cabo $2,304 \times 10^{-5} + j 3,258 \times 10^{-5} \Omega$ | $1.700,38 \times 10^{-12} \text{ F}$ |

Fonte: Próprio Autor.

Com o objetivo em simplificar a modelagem analítica alguns elementos que compõem o circuito elétrico foram agrupados em blocos e chamados de Z1, Z2, Z3 e Z4. Esta nomenclatura dos componentes pode ser visualizada na Figura 52.

Figura 52 - Nomenclatura dos elementos no circuito.



Fonte: Próprio Autor.

Inicialmente, aplicou-se no circuito elétrico a Lei de Kirchhoff para corrente (LKC). Assim, a soma algébrica das correntes em um nó é igual zero. Abaixo, segue as etapas da Lei de Kirchhoff, bem como a sequência da modelagem analítica que foram seguidas:

- Identificou-se os nós e malhas no circuito;
- Determinou-se o sentido da corrente para cada ramo;
- Definiu-se o sentido para percorrer para cada malha;
- Escreveu-se as equações para cada nó;
- Montou-se as equações e identificou-se os termos desconhecidos;

- Encontrou-se a equação com a Função de Transferência resultante;
- Aplicou-se a Transformada de Laplace na expressão resultante.

O intuito deste arranjo é encontrar uma equação que descreva a relação entre a tensão de saída ( $V_o$ ) e a tensão de entrada ( $V_i$ ). Para isso, tornou-se necessário atribuir uma variável de tensão auxiliar ( $V_x$ ), na junção do nó com as variáveis  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ . Assim, foi possível realizar o desenvolvimento matemático do circuito. Abaixo, destaca-se a nomenclatura dos elementos do circuito elétrico, conforme ilustrado na Figura 52.

Onde:

$V_i$ = Tensão de entrada;

$V_x$ = Tensão auxiliar para manipulação matemática;

$V_o$ = Tensão de saída;

$Z_1$ = Impedância formada por resistência e a indutância na fonte;

$Z_2$ = Impedância puramente capacitiva. Capacitâncias intrínsecas dos cabos, TP, TC e o contato do disjuntor entre fonte e próprio disjuntor;

$Z_3$ = Impedância formada por resistência e a indutância dos trechos de cabos;

$Z_4$ = Impedância puramente capacitiva. Capacitâncias parasitas dos cabos, TP, TC e o contato do disjuntor entre fonte e o próprio disjuntor.

Então, aplicando o método dos nós, obteve-se as Equações 1 e 2.

$$\frac{V_i - V_x}{Z_1} = \frac{V_x}{Z_2} + \frac{V_x - V_o}{Z_3} \quad (1)$$

$$\frac{V_x - V_o}{Z_3} = \frac{V_o}{Z_4} \quad (2)$$

Onde, a Equação 1 representa a soma algébrica das correntes no nó 1 e Equação 2 constitui a soma algébrica das correntes no nó 2. Analisando-se as Equações 1 e 2, verifica-se que as mesmas dependem das variáveis  $V_i$  e  $V_o$ , que são tensões de entrada e saída respectivamente, bem como da tensão  $V_x$ , que é a própria tensão no ponto  $V_x$ . Logo, o ponto  $V_x$  é utilizado apenas como um artifício matemático para cálculo da Função de Transferência desejada. Desta forma, as equações a seguir foram escritas e manipuladas a fim de fazer com que a dependência da variável  $V_x$  desapareça.

Rearranjando algebricamente a Equação 1, encontrou-se:

$$\frac{V_i}{Z_1} - \frac{V_x}{Z_1} = \frac{V_x}{Z_2} + \frac{V_x}{Z_3} - \frac{V_o}{Z_3} \quad (3)$$

Logo, manipulou-se a Equação 2 para que a esta variável  $V_x$  fique por convenção no lado esquerdo da Equação 4. Pois, posteriormente esta variável  $V_x$  irá desaparecer da modelagem analítica.

$$V_x \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) = \frac{V_i}{Z_1} + \frac{V_o}{Z_3} \quad (4)$$

Ao aplicar mínimo múltiplo comum na Equação 4, obteve-se:

$$V_x \left( \frac{Z_2Z_3 + Z_1Z_3 + Z_1Z_2}{Z_1Z_2Z_3} \right) = \frac{V_iZ_3 + V_oZ_1}{Z_1Z_3} \quad (5)$$

Logo,

$$V_x = \frac{Z_2(V_iZ_3 + V_oZ_1)}{Z_2Z_3 + Z_1Z_3 + Z_1Z_2} \quad (6)$$

Observa-se a equação resultante do primeiro nó foi descrita de forma em obter a contribuição da tensão  $V_i$  e  $V_o$  na tensão no nó  $V_x$ . Reescrevendo a Equação 6, alcançou-se:

$$V_x = V_i \frac{Z_2Z_3}{Z_2Z_3 + Z_1Z_3 + Z_1Z_2} + V_o \frac{Z_2Z_3}{Z_2Z_3 + Z_1Z_3 + Z_1Z_2} \quad (7)$$

Reescrevendo a Equação 2 encontrou-se:

$$V_xZ_4 - V_oZ_4 = V_oZ_3 \quad (8)$$

Logo, isolando-se  $V_x$  obteve-se:

$$V_x = \frac{V_o(Z_3 + Z_4)}{Z_4} \quad (9)$$

Assim, resultando na Equação 10 do segundo nó  $V_x$ .

$$V_x = \frac{V_oZ_3}{Z_4} + V_o \quad (10)$$

Igualando-se as Equações 6 e 10 encontrou-se a Equação 11. Desta forma, as expressões matemáticas a seguir não dependem mais da variável  $V_x$ .

$$\frac{V_oZ_3}{Z_4} + V_o = \frac{V_iZ_2Z_3}{Z_2Z_3 + Z_1Z_3 + Z_1Z_2} + \frac{V_oZ_1Z_2}{Z_2Z_3 + Z_1Z_3 + Z_1Z_2} \quad (11)$$

A seguir buscou-se isolar os termos  $V_o$  de  $V_i$ . Sendo assim, foi rearranjado a Equação 11 e, após as manipulações algébricas encontrou-se:

$$V_o \left( \frac{Z_3}{Z_4} + 1 - \frac{Z_1 Z_2}{Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2} \right) = V_i \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2} \quad (12)$$

Ao aplicar mínimo múltiplo comum na Equação 12, alcançou-se:

$$V_o \left( \frac{Z_3(Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2) + Z_4(Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2) - Z_4 Z_1 Z_2}{Z_4(Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2)} \right) = \frac{V_i Z_2 Z_3}{Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2} \quad (13)$$

Multiplicando os termos e rearranjando a Equação 13, obteve-se:

$$V_o(Z_3(Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2) + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4 - Z_4 Z_1 Z_2) = V_i Z_2 Z_3 Z_4 \quad (14)$$

Após, realizar possíveis multiplicações entre os termos da Equação 14, encontrou-se:

$$V_o(Z_3 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 Z_3 + Z_1 Z_3 Z_3 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4) = V_i Z_2 Z_3 Z_4 \quad (15)$$

Como todos os termos na Equação 15 dependem de  $Z_3$ , logo, dividiu-se a expressão por esta variável  $Z_3$ , obteve-se:

$$V_o(Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_4 + Z_1 Z_4) = V_i Z_2 Z_4 \quad (16)$$

Então, dividindo Equação 16 pelos termos  $Z_2$  e  $Z_4$ , assim, alcançou-se:

$$V_o \left( \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 Z_4} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_2 Z_4} + \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 Z_4} + \frac{Z_1 Z_4}{Z_2 Z_4} \right) = V_i \quad (17)$$

Ao realizar a divisão dos termos da Equação 17, encontrou-se:

$$V_o \left( \frac{Z_3}{Z_4} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} + \frac{Z_1}{Z_4} + 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) = V_i \quad (18)$$

Manipulando algebricamente a Equação 18, encontrou-se a Equação 19. Com isso, a Equação 19 é a Função de Transferência resultante do circuito elétrico deste estudo. Esta modelagem analítica descreve o comportamento de  $V_o$  em relação a  $V_i$ .

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\left( \frac{Z_3}{Z_4} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} + \frac{Z_1}{Z_4} + 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)} \quad (19)$$

Na sequência, foram substituídos os elementos  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$  da Equação 19, pelas respectivas Transformadas de Laplace dos componentes que formam o circuito elétrico, conforme evidenciado na Figura 51. A Tabela 15 ilustra os elementos, bem como as Transformadas de Laplace correspondentes. Ainda, vale salientar que o circuito contém indutor

e capacitor, desta forma, ao aplicar a Transformada de Laplace nestes elementos, as mesmas foram consideradas em instantes iniciais nulas.

Tabela 15 - Apresenta as impedâncias e Transformada de Laplace.

| Elementos | Transformada de Laplace |
|-----------|-------------------------|
| $Z_1$     | $R_1+sL_1$              |
| $Z_2$     | $1/sC_1$                |
| $Z_3$     | $R_2+sL_2$              |
| $Z_4$     | $1/sC_2$                |

Fonte: Próprio Autor.

Substituindo os elementos da Equação 19 pelas respectivas Transformada de Laplace, encontrou-se:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{\left( \frac{R_2 + sL_2}{\frac{1}{sC_2}} + \frac{(R_1 + sL_1)(R_2 + sL_2)}{\frac{1}{s^2C_1C_2}} + \frac{R_1 + sL_1}{\frac{1}{sC_2}} + 1 + \frac{R_1 + sL_1}{\frac{1}{sC_1}} \right)} \quad (20)$$

Ao resolver a operação matemática na Equação 20, obteve-se:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{sC_2(R_2 + sL_2) + s^2C_1C_2(s^2L_1L_2 + s(R_1L_2 + R_2L_1) + R_1R_2)} \dots \dots \frac{1}{+sC_2(R_1 + sL_1) + 1 + sC_1(R_1 + sL_1)} \quad (21)$$

Realizando multiplicação dos termos no denominador da Equação 21, encontrou-se:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^2LC_2 + sR_2C_2 + s^4L_1L_2C_1C_2 + s^3C_1C_2(R_1L_2 + R_2L_1)} \dots \dots \frac{1}{+s^2R_1R_2C_1C_2 + s^2L_1C_2 + sR_1C_2 + 1s^2L_1C_1 + sR_1C_1} \quad (22)$$

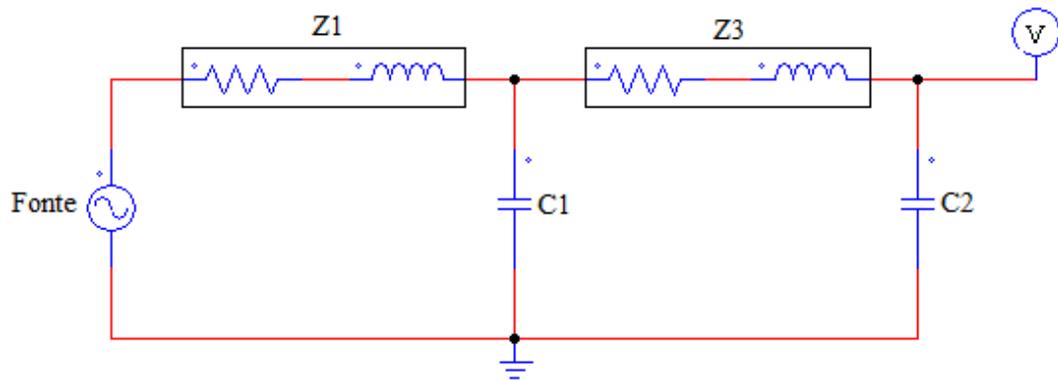
Então, após organizar as variáveis da Equação 22, obteve-se a Equação 23. Sendo assim, esta equação descreve a Função de Transferência do circuito simplificado no domínio da frequência, entre a relação da tensão  $V_o(s)$  e  $V_i(s)$ .

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^4(L_1L_2C_1C_2) + s^3(C_1C_2(R_1L_2 + R_2L_1))} \dots \dots \frac{1}{+s^2(C_2(L_2 + C_1R_1R_2) + L_1C_1) + s(R_1(C_1C_2) + R_2C_2) + 1} \quad (23)$$

### 5.1.2 Simulação computacional e Modelagem matemática

Além de encontrar a Expressão matemática 23, um outro objetivo deste estudo é obter um outro *software* capaz realizar a simulação do circuito elétrico simplificado e os resultados da equação resultante. Sendo assim, escolheu-se o programa PSIM que é uma ferramenta confiável e bastante difundida na área de engenharia elétrica. A Figura 53 evidencia o circuito elétrico simplificado com os respectivos elementos na qual foram modelados no *software* PSIM. A Tabela 16 apresenta os parâmetros usados para realizar a configuração do circuito elétrico no PSIM.

Figura 53 - Circuito elétrico simulado no PSIM.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 16 - Parâmetros usados na configuração do circuito.

| Tensão Pico (F-N) alimentação | Impedâncias sequência (+) |   | Capacitância C1= C2            |
|-------------------------------|---------------------------|---|--------------------------------|
| 56.55 kV                      | Z1 fonte                  | R=14,2206 $\Omega$<br>L= 0,06872 H                                      | 1.700,38 x 10 <sup>-12</sup> F |
|                               | Z3 trecho cabo            | R= 2,304 x 10 <sup>-5</sup> $\Omega$<br>L= 8,6419 x 10 <sup>-19</sup> H |                                |

Fonte: Próprio Autor.

Além disso, pelo PSIM ter disponível na própria biblioteca um bloco configurável, que permite parametrizar uma Função de Transferência. Logo, tornando-se possível investigar o comportamento da TRT, baseada nesta modelagem analítica. A Tabela 17 demonstra os parâmetros na qual foram utilizados para substituir as variáveis na Equação 23.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados na Equação 23.

| Parâmetros R e L   | Parâmetros C1= C2              |
|--|--------------------------------|
| R=14,2206 $\Omega$ e L= 0,06872 H                                      | 1.700,38 x 10 <sup>-12</sup> F |
| R= 2,304 x 10 <sup>-5</sup> $\Omega$ e L= 8,6419 x 10 <sup>-19</sup> H |                                |

Fonte: Próprio Autor.

Sendo assim, realizou-se a manipulação algébrica na Expressão matemática 23. A Tabela 18 apresenta os resultados, sendo estes valores usados como coeficientes para configurar o bloco da Função de Transferência. Ainda, a Tabela 18 ilustra tensão de pico na qual foi ajustada a fonte de alimentação.

O termo do numerador da Expressão matemática 23 é representada no bloco da Função de Transferência pelo coeficiente (Coeff. Bn..Bp) e o denominador pelo coeficiente (Coeff. Bn..A0).

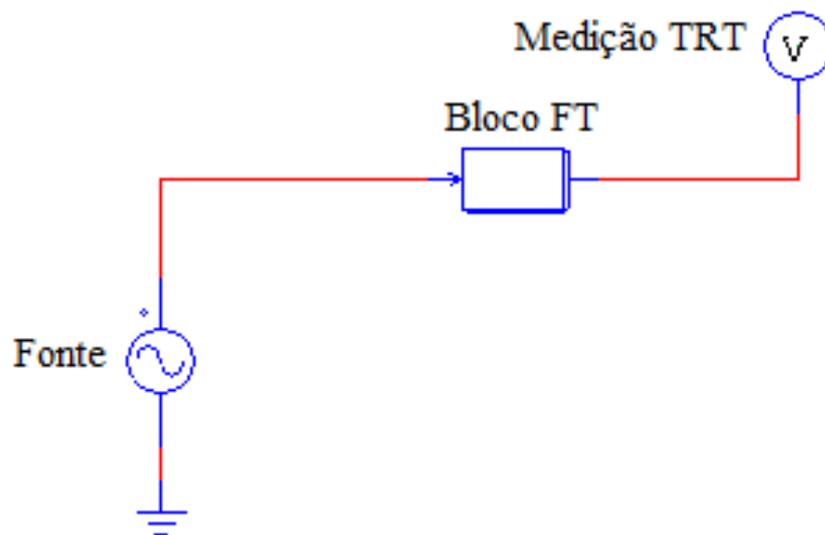
Tabela 18 - Parâmetros utilizados no circuito com a Função de Transferência.

| Tensão Pico (F-N) alimentação | Coeff. Bn..Bp       | Coeff. Bn..A0      |
|-------------------------------|---------------------|--------------------|
| 56.55 kV                      | 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 | $s^4 = 1.7170e-26$ |
|                               |                     | $s^3 = 8.1310e-24$ |
|                               |                     | $s^2 = 2.3370e-10$ |
|                               |                     | $s = 4.8360e-8$    |
|                               |                     | 1.0                |

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 54 evidencia o circuito elétrico composto pela fonte de alimentação, bloco da Função de Transferência (FT) e medição da TRT.

Figura 54 - Circuito no PSIM com a Função de Transferência.



Fonte: Próprio Autor.

Logo, tem-se a necessidade em comparar os sinais das TRTs em um único ambiente computacional. Sendo assim, desenvolveu-se um algoritmo no *software* MATLAB para integrar os sinais das TRTs encontrados pelo programa computacional ATP/EMTP e pela modelagem

analítica realizada através do PSIM. A seguir será detalhado esta análise técnica desta investigação.

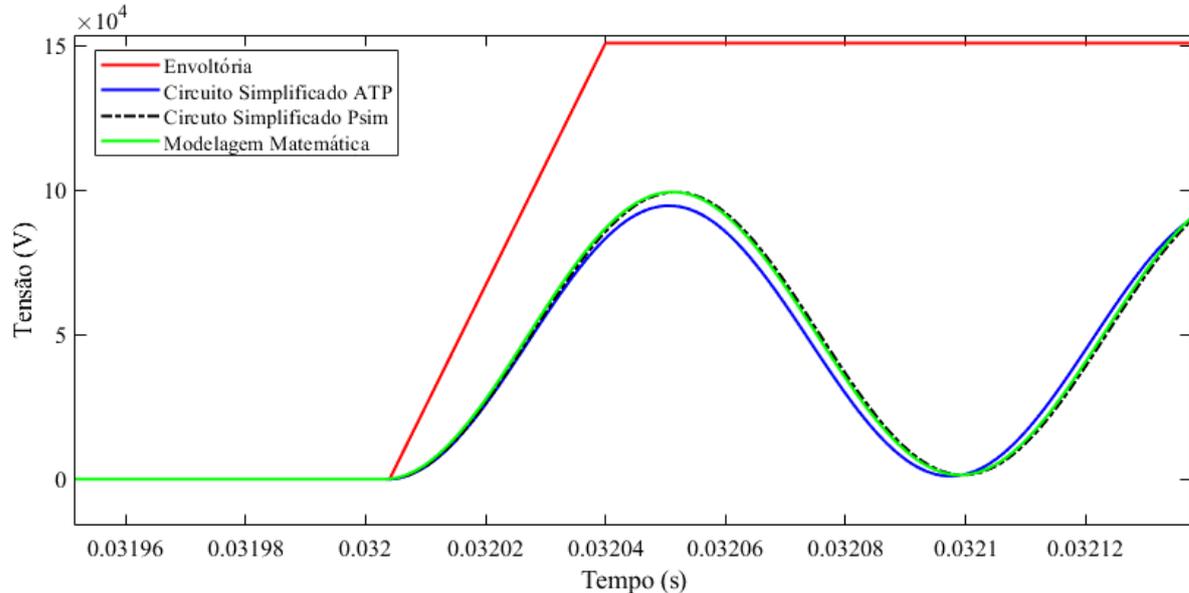
### 5.1.3 Análise comparativa entre modelo computacional e modelo matemático

Nesta subseção será apresentada apenas sinais das TRT obtidos por meio de simulação computacional e modelagem analítica. O objetivo principal desta verificação é identificar se o disjuntor objeto de estudo foi ou não superado por TRT nos primeiros ciclos. Sendo assim, a Figura 51 ilustra o circuito elétrico simplificado que foi modelado no ATP/EMTP. As Figura 53 e 63 apresentadas anteriormente demonstram os circuitos que foram modelados no *software* PSIM.

#### 5.1.3.1 Definição da análise

Esta análise técnica foi delimitada em regime T10. A Figura 55 demonstra os sinais das TRTs obtidos através de simulações computacionais.

Figura 55 - Sinais das TRTs obtidos através do *software* MATLAB - T10.



Fonte: Próprio Autor.

### 5.1.4 Análise dos resultados

Na Figura 55 ilustra os sinais das TRTs encontradas neste cenário de estudo. Logo, evidencia que o disjuntor não foi superado por TRT, pelos sinais do circuito elétrico simplificado no ATP/EMTP, PSIM e modelagem analítica. Pois, não há ultrapassagem dos

limites da envoltória superior e da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento definidos pela norma (IEEE STD C37.011, 2011). Assim, podemos assegurar que a resposta de TRT obtida por meio da modelagem analítica é precisa e fiel, conforme ilustrada a Figura 55.

## 5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada um método para desenvolvimento de uma modelagem matemática em função de um circuito elétrico simplificado. Logo, encontrou-se uma solução matemática que identificou que disjuntor em estudo não foi superado por TRT. Normalmente, este tipo de análise é realizado por meio de *software* computacional, mas às vezes estes programas de análises de transitórios eletromagnéticos são restritos a alguns usuários. Então, pode-se afirmar que o método desenvolvido por meio de modelagem analítica apresenta potencial para verificar sinais de TRT em disjuntor de proteção de sistemas elétricos, para este do estudo de caso.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou o tema de superação por TRT em disjuntores de média tensão em uma instalação elétrica industrial. O assunto é pouco explorado no setor industrial, e raramente é levado em consideração durante o desenvolvimento de projeto de uma subestação elétrica. Um dos principais motivos está associado à dificuldade em obter os dados reais do sistema elétrico, principalmente as capacitâncias parasitas.

Neste estudo em específico, diversos cenários foram realizados utilizando parâmetros reais no sistema teste. Além disso, também foram verificados os comportamentos das TRTs, usando valores de capacitâncias especificados pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011). As investigações foram realizadas por meio de simulações computacionais e método analítico.

Os resultados extraídos através das simulações computacionais por meio do *software* ATP/EMTP demonstraram claramente que os valores dos elementos que compõem o sistema elétrico influenciam na resposta da TRT. Elementos tais como resistências, reatâncias e capacitâncias. Além disso, o comportamento da TRT também é influenciado pelo nível de tensão na qual foi ajustada na fonte de alimentação.

Ainda, com base nas análises técnicas realizadas, conclui-se que ao utilizar valores de capacitâncias de acordo com a especificação da norma (IEEE STD C37.011, 2011) pode-se chegar a conclusões errôneas a respeito da superação ou não do disjuntor, pois em alguns cenários de estudos, mesmo os circuitos possuindo diferenças nas configurações de alguns componentes elétricos, existem diferenças relevantes nos sinais das TRTs impostas entre circuito simplificado com capacitâncias mínimas especificado pelo padrão (IEEE STD C37.011, 2011) e o circuito completo com capacitâncias reais do circuito de teste. Um exemplo foi ao configurar o circuito simplificado com valores mínimos de capacitâncias definido pela norma. O disjuntor em estudo foi superado por TRT, enquanto que o circuito completo utilizando parâmetros reais do sistema não houve ultrapassagem nos limites. Sendo assim, recomenda-se que seja investido tempo junto aos fabricantes dos equipamentos para obter estes dados técnicos reais, pois assim, o resultado final de uma investigação de TRT será mais fiel.

Além disso, este trabalho evidencia que é possível encontrar um equacionamento matemático para obter um sinal de TRT de um circuito elétrico simplificado. Com base nesta expressão matemática, foi obtida um sinal de TRT condizente com o resultado encontrado através de uma simulação computacional utilizando o *software* ATP/EMTP. Ou seja, este método proposto também serviu como uma outra ferramenta para confirmar o resultado encontrado através de simulação computacional.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes trabalhos futuros permitirão o seguimento da pesquisa que foi apresentada nesta Dissertação de Mestrado:

- Fazer uma análise técnica das diferenças encontradas entre as respostas dos sinais das TRTs obtidas pelos softwares ATPDraw e PSIM;
- Realizar simulações computacionais para os circuitos propostos e analisar o comportamento das TRTs para outros intervalos de tempos.

## REFERÊNCIAS

ALVES, F. R. **Características do Disjuntor Para abertura de Linha de Transmissão em Vazio - Metodologia de Estudo**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, 2006.

ATPDRAW. ATPDraw. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net/help7/index.html>> Acesso em: 08 maio 2021.

AZEVÊDO, W. V. S. et al. Device to limit transient recovery voltage. **Conference: Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES**, n. November, 2011.

BONGIOLO, G. G. **Análise de sobretensões transitórias causadas por manobras de disjuntores a vácuo**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CIGRÉ WORKING GROUP A3.11. Guide for application of IEC 62271-100 and IEC 62271-1. In: **Cigré Brochure**. [s.l: s.n.].

DUFOURNET, D. AND; HU, J. Revision of IEEE C37.011 Guide for the Application of Transient Recovery Voltages for AC High-Voltage Circuit Breakers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2012.

FERREIRA, C. S.; BORGES, C. L. T. Solução do problema de superação de disjuntores pela alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito utilizando algoritmos genéticos. **Controle & Automação**, v. 18, n. 4, p. 501–512, 2007.

FRONTIN, S. DE O. **Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília, 2013.

IEEE STD C37.011. **IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage For AC High-Voltage Circuit Breakers**. New York, IEEE Power & Energy Society, 2011.

IEEE STD C37.04 (REVISION OF IEEE STD C37.04-1999). **IEEE Standard for Ratings and Requirements for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage Above 1000 V**. IEEE Std C ed. New York: IEEE Power & Energy Society, 2018.

IEEE STD C37.04B. **Amendment 2: To Change the Description of Transient Recovery Voltage for Harmonization with IEC 62271-100**. New York, IEEE Power & Energy Society, 2008.

IEEE STD C37.06. **IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis-Preferred ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V**. New York, 2009.

JANAINA MIRSES DE S. C. COSTA et al. GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÃO E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

JÚNIOR, F.; SOUZA, B. A. Redução de tensão de restabelecimento transitória: discussão de Santa Maria, RS 2021

medidas e avanços. n. 1.

MALEKPOUR, M. et al. Monitoring and measurement of highfrequency oscillatory transient recovery voltage of circuit breakers. **IET Science, Measurement and Technology**, v. 12, n. 6, p. 764–769, 2018.

MAMEDE FILHO, J.; RIBEIRO MAMEDE, D. **Proteções de Sistemas Elétricos de Potência**. [s.l.] Proteções de Sistemas Elétricos de Potência. Rio de Janeiro, 2013.

MARCHESAN, A. C. **Desenvolvimento de um software Pré-processador gráfico para análise de transitórios em subestações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

MELLO, G. D. DE. **Metodologia de Priorização de Investimento em Modernização de Equipamentos de Proteção e Manobra de Subestações de Distribuição**. **Journal of Materials Processing Technology**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

NOBRE, D. M. **Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV as Solicitações de TRT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

ONS. **Nota Técnica N° 48/2014: Critérios para Análise de Superação de Equipamentos e Instalações de Alta Tensão**, 2014.

PEDRAL, A. L. S. **Consolidação De Material Didático Para a Disciplina De Equipamentos Elétricos – Disjuntores**. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PENKOV, D. et al. IEC standard high voltage circuit-breakers: Practical guidelines for overvoltage protection in generator applications. **Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings, PCIC EUROPE**, 2012.

PRAMANA, P. A. A. et al. Simulation Study of Circuit Breaker Failure on Extra High Voltage Reactor. **2019 1st International Conference on Cybernetics and Intelligent System, ICORIS 2019**, v. 1, n. August, p. 142–145, 2019.

PRETO, P. DE O. **Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória Analisis pendapatan dan tingkat kesejahteraan rumah tangga petani** Dissertação (Mestre em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

RAHIMOV, J. B. et al. **Effect of additional capacities on transients recovery voltage in the short - Line - Fault regime**. Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. **Anais IEEE**, 2019a.

RAHIMOV, J. B. et al. Transient Recovery Voltages on Contact of SF6 Circuit Breakers in the Short Line Fault Regime. **Proceedings of the 1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2019**, n. 1, p. 1–4, 2019b.

RIFAAT, R.; LALLY, T. S. AND; HONG, J. Circuit Breaker Transient Recovery Voltage

Requirements for Medium-Voltage Systems With NRG. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 5, p. 2989–2995, 2014.

SALGE, G. S. et al. **Investigação das Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT) Experimentadas por Disjuntores de Alta Tensão e Estudo de Métodos Mitigadores**. (Cigre, Ed.)XVII Eriac. **Anais...Foz do Iguaçu: 2019<sup>a</sup>**.

SALGE, G. S. et al. **Investigação das Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT) Experimentadas por Disjuntores de Alta Tensão e Estudo de Métodos Mitigadores**. XVIII ERIAC. **Anais...Foz do Iguaçu, Brasil: CIGRE, 2019b**.

SINDER, D. **Métodos de Cálculo aa Tensão De Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão**.Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, , 2013.

SWINDLER, D. L.; SCHWARTZ, P.; HAMER, P. S. Transient recovery voltage considerations in the application of medium-voltage circuit breakers. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 2, p. 383–388, 1997.

SZEWCZYK, M.; KULAS, S. **INVESTIGATION ON CIRCUIT BREAKER INFLUENCE ON TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE**. UPEC. **Anais, 2007**.