

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FERNANDO HENRIQUE GUEDES AGUIRRE**

**ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS PARA A REDUÇÃO DA TENSÃO DE  
RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO:  
UM ESTUDO DE CASO**

**Alegrete - RS  
2022**

**FERNANDO HENRIQUE GUEDES AGUIRRE**

**ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS PARA A REDUÇÃO DA TENSÃO DE  
RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO:  
UM ESTUDO DE CASO**

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

Orientador: Chrystian Dalla Lana da Silva.

**Alegrete - RS  
2022**

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

A284a Aguirre, Fernando Henrique Guedes

Análise de Medidas Mitigadoras para a Redução da Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores de Alta Tensão: Um Estudo de Caso. / Fernando Henrique Guedes Aguirre.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2022.

"Orientação: Chrystian Dalla Lana Da Silva".

1. Disjuntores de alta tensão. 2. tensão de restabelecimento transitória (TRT). 3. medidas mitigadoras. 4. transitório eletromagnético. I. Título.

**FERNANDO HENRIQUE GUEDES AGUIRRE**

**ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS PARA A REDUÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO  
TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO: UM ESTUDO DE CASO**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11 de março de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Eduardo Machado Dos Santos

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Alessandro Botti Benevides

UNIPAMPA

---

Assinado eletronicamente por **CHRYSYTIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2022, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as



normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2022, às 12:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALESSANDRO BOTTI BENEVIDES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2022, às 12:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0621733** e o código CRC **CFD79C96**.

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

## DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Vilson e Marister, que sempre me apoiaram, não medindo esforços para me fazer alcançar meus objetivos.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço aos meus pais, Vilson e Marister, pelo amor, carinho, incentivo e por todo o apoio incondicional que me deram durante toda minha vida.*

*Às minhas irmãs, Fernanda e Julia, pela motivação, incentivo e por estarem sempre ao meu lado.*

*Aos meus amigos e colegas pela amizade e parceria durante toda a minha jornada acadêmica.*

*Ao meu orientador, professor Chrystian, por ter me dado a oportunidade de realizar este trabalho e acima de tudo por ter me orientado e apoiado.*

*À Unipampa e aos professores, pela estrutura de ensino e excelente aprendizado.*

*“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez”.*

*Jean Cocteau.*



## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento da tensão de restabelecimento transitória (TRT) em disjuntores de alta tensão e os aspectos relevantes que devem ser avaliados para a aplicação de medidas mitigadoras para o ajuste das solicitações acima dos limites admissíveis. A TRT é caracterizada por ser um transitório eletromagnético que surge entre os pólos dos terminais de um disjuntor, no momento em que os terminais são abertos, por razão de uma falta no sistema. Neste instante, surge um arco elétrico entre os terminais do equipamento, que só será interrompido quando o valor instantâneo da corrente elétrica ser igual a zero. Neste momento acontece o fenômeno denominado de TRT. O disjuntor é considerado superado por meio da TRT quando os seus respectivos valores térmicos e dielétricos são ultrapassados, tanto pelo valor de pico da TRT, como por sua taxa de crescimento (TCTRT), de acordo com critérios estabelecidos em normas. Os resultados das análises de superação da TRT e da TCTRT deste trabalho foram obtidos por meio de simulações no *software* ATP, através de rotinas específicas para a extração destes valores, as quais foram baseadas na norma IEEE C37.06-2009, para capacidades nominais de interrupção (*Test Duty*) de 100 e 30 por cento, para curtos-circuitos trifásicos não aterrados e fase-terra. Os resultados obtidos constataram que a inserção de resistores de abertura em paralelo com a câmara principal do disjuntor resulta na redução do valor de pico da TRT. Por fim, observou-se, também, que a introdução de células de surto capacitivas reduz significativamente a taxa de crescimento da TRT.

**Palavras-Chave:** Disjuntores de alta tensão, tensão de restabelecimento transitória (TRT), medidas mitigadoras, transitório eletromagnético.

## ABSTRACT

This work presents a study of the behavior of the Transient Recovery Voltage (TRV) in high voltage circuit breakers and the relevant aspects that must be evaluated for the application of mitigating measures to adjust the requests above the admissible limits. TRV is characterized by being an electromagnetic transient that arises between the poles of the terminals of a circuit breaker, when the terminals are opened, due to a fault in the system. At this moment, an electric arc appears between the equipment terminals, which will only be interrupted when the instantaneous value of the electric current tends to zero. At this point, the phenomenon called TRV occurs. The circuit breaker is considered to have been overcome by means of the TRV as soon as its respective thermal and dielectric values are extrapolated, either by the peak value of the TRV, or by its growth rate (RRRV), in accordance with regulations established by technical standards. The results of the analysis of overcoming TRV and RRRV of this work were obtained through simulations in the ATP software, through specific routines for the extraction of these values, which were based on the IEEE C37.06-2009 standard, for nominal capacities of 100 and 30 percent test duty for ungrounded three-phase and phase-to-ground short circuits. The results obtained showed that the insertion of opening resistors in parallel with the main chamber of the circuit breaker resulted in the reduction of the peak value of the TRV, and it was also observed that the introduction of capacitive surge cells significantly reduced the growth rate of the TRV.

**Keywords:** High voltage circuit breaker, transient recovery voltage (TRV), mitigating measures, electromagnetic transient.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de interrupção de Corrente Alternada.....	23
Figura 2 - TRT exponencial.....	24
Figura 3 - TRT oscilatória.....	25
Figura 4 - TRT triangular.....	25
Figura 5 - Exemplo de envoltória de um disjuntor não superado.....	27
Figura 6 - Exemplo de envoltória de um disjuntor superado.....	27
Figura 7 - Envoltória de dois parâmetros.....	30
Figura 8 - Envoltória de quatro parâmetros.....	30
Figura 9 - Circuito simplificado do resistor de abertura.....	31
Figura 10 - Localização das células de surto capacitivas para a redução da TCTRT.....	32
Figura 11 – Sistema teste IEEE 30-barras.....	34
Figura 12 – Envoltórias da norma para faltas aterradas para Test Duties T100 e T30.....	35
Figura 13 – Envoltórias da norma para faltas não aterradas para Test Duties T100 e T30.....	36
Figura 14 – Formas de onda da TRT nas três fases do disjuntor 2 da linha 2-6 para o caso 1.....	39
Figura 15 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 2-6 para o caso 1.....	39
Figura 16 – Formas de onda da TRT nas três fases do disjuntor 4 da linha 4-6 para o caso 1.....	42
Figura 17 – Análise de superação do disjuntor 4 da linha 4-6 para o caso 1.....	42
Figura 18 – Análise da TRT do disjuntor 4 da linha 4-6 com uma resistência de abertura de 100Ω para o caso 1.....	45
Figura 19 – TRT sobre um disjuntor com nível de tensão de 170 kV com a envoltória definida por norma.....	47
Figura 20 – Formas de onda da TRT nas três fases do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1.....	48
Figura 21 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1.....	49
Figura 22 – Análise da TRT do disjuntor 8 da linha 8-28 com uma resistência de abertura de 50Ω para o caso 1.....	51

Figura 23 – TRT sobre um disjuntor com nível de tensão de 245 kV com a envoltória definida por norma .....	53
Figura 24 – Análise de superação do disjuntor 4 da linha 2-4 para o caso 2 .....	55
Figura 25 – Análise de superação do disjuntor 3 da linha 1-3 para o caso 2 .....	58
Figura 26 – Análise da TRT do disjuntor 3 da linha 1-3 após a adição das células de surto capacitivas no valor de 2 $\mu$ F para o caso 2 .....	60
Figura 27 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-7 para o caso 2 .....	62
Figura 28 – Análise da TRT do disjuntor 6 da linha 6-7 após a adição das células de surto capacitivas no valor de 5 $\mu$ F para o caso 2 .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificações preferenciais de TRT para disjuntores classificados Acima de 100kV para faltas aterradas com $K_{pp} = 1,3$ .....	28
Tabela 2 – Classificações preferenciais de TRT para disjuntores classificados Acima de 100kV para faltas não aterradas com $K_{pp} = 1,5$ .....	28
Tabela 3 – Parâmetros da norma para faltas aterradas .....	37
Tabela 4 – Parâmetros da norma para faltas não aterradas .....	37
Tabela 5 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 2 da linha 2-6 para o caso 1.....	41
Tabela 6 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 4 da linha 4-6 para o caso 1.....	44
Tabela 7 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 4 da linha 4-6 com uma resistência de abertura de $100\Omega$ para o caso 1.....	46
Tabela 8 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1.....	51
Tabela 9 – Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 8 da linha 8-28 com uma resistência de abertura de $50\Omega$ para o caso 1.....	53
Tabela 10 - Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 4 da linha 2-4 para o caso 2.....	57
Tabela 11 - Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 3 da linha 1-3 após a adição das células de surto capacitivas no valor de $2\ \mu\text{F}$ para o caso 2.....	61
Tabela 12 - Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 6 da linha 6-7 após a adição das células de surto capacitivas no valor de $5\ \mu\text{F}$ para o caso 2.....	66
Tabela A.1 – Dados de Barra.....	71
Tabela A.2 – Dados de Linha em pu .....	72
Tabela A.3 – Dados do Transformador em pu .....	73
Tabela A.4 – Dados das cargas .....	74
Tabela A.5 – Dados dos compensadores síncronos .....	74
Tabela A.6 – Dados dos geradores.....	75
Tabela B.1 – Parâmetros da Tabela 12 - IEEE C37.06-2009.....	76
Tabela C.1 – Parâmetros da Tabela 13 - IEEE C37.06-2009 .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	Alternative Transient Program
CA	Corrente Alternada
CNI	Corrente Nominal de Interrupção
I <sub>cc</sub>	Corrente de Curto-Circuito
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	Quilovolt
RRRV	Rate of Rise of Recovery Voltage
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TD	Test Duty
TCTRT	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
TRV	Transient Recovery Voltage

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Considerações Gerais.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>20</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Considerações Gerais.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Disjuntores.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1 Definição .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2 Acionamento de um Disjuntor .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.1 Definição .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.2 Tipos de TRT.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4 Superação de Disjuntores .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1 Superação de Disjuntores por TRT.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2 Caracterização das Envolórias da Norma.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Medidas Mitigadoras .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.1 Resistores de Abertura .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2 Células de Surto Capacitivas .....</b>	<b>31</b>
<b>2.6 Considerações Finais .....</b>	<b>32</b>
<b>3 SIMULAÇÕES E ANÁLISES DE RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Considerações Gerais.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Sistema Teste e Envolórias da Norma IEEE C37.06-2009.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 Casos Analisados .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4 Caso 1: Curto-Circuito Trifásico Não Aterrado próximo a um Disjuntor.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.1 Linha 2-6.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.2 Linha 4-6.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.3 Linha 8-28.....</b>	<b>48</b>
<b>3.5 Caso 2: Curto-Circuito Fase-Terra em 50% da Linha.....</b>	<b>55</b>
<b>3.5.1 Linha 2-4.....</b>	<b>55</b>

3.5.2 Linha 1-3.....	57
3.5.3 Linha 6-7.....	62
3.6 Considerações Finais .....	66
4 CONCLUSÃO .....	67
4.1 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	67
REFERÊNCIAS.....	68
ANEXOS .....	71



# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Considerações Gerais**

Com a crescente expansão e interligação dos sistemas elétricos, a partir do surgimento de dispositivos cada vez mais sensíveis às perturbações, torna-se essencial a avaliação de desempenho de grandezas elétricas em relação a diversos aspectos, tais como: desequilíbrios, picos e oscilações de tensão, entre outros fatores que são capazes de ocasionar danos aos componentes do sistema (RODRIGUES, 2018, p.14).

Para manter o sistema em operação, tem-se os disjuntores como um dos principais equipamentos de proteção, os quais são dispositivos eletromecânicos responsáveis pelo isolamento de curtos-circuitos e manobras de chaveamento, minimizando os efeitos sobre o restante do sistema elétrico para possíveis falhas que possam ocorrer. Quando a corrente elétrica ultrapassa as especificações nominais definidas, ocorre a superação do dispositivo.

Em sistemas elétricos, quando um disjuntor interrompe uma corrente elétrica proveniente de um curto-circuito ou sobrecarga, surge entre os seus terminais, uma diferença de potencial, a qual caracteriza um fenômeno chamado de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT). Dessa forma, a TRT é caracterizada por ser um transitório eletromagnético, que ocorre no momento em que a corrente elétrica tende a zero.

Diversos estudos no que se refere aos transitórios eletromagnéticos originados por operações de manobra vêm sendo desenvolvidos ao passar dos anos, com o propósito de compreender de uma forma mais precisa o comportamento das grandezas elétricas, de maneira a mitigar os efeitos nos equipamentos do sistema.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um estudo sobre medidas mitigadoras para a redução da tensão de restabelecimento transitória em disjuntores de alta tensão, utilizando o sistema teste IEEE 30-barras, os resultados obtidos foram

comparados com as envoltórias da norma IEEE C37.06-2009, para capacidades nominais de interrupção de 100% e 30% por meio de simulações digitais realizadas através do *software* ATP (*Alternative Transients Program*), para curtos-circuitos trifásicos não aterrados e curtos-circuitos fase-terra.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, citam-se:

- Abordagem das bibliografias referentes ao tema proposto;
- Simulação do sistema teste no *software* ATP;
- Elaboração das envoltórias da norma IEEE C37.06-2009 a partir do *software* Matlab®, de acordo com os parâmetros definidos;
- Comparação das formas de onda com a norma aplicada, para a determinação de superação por TRT, e;
- Análise de meios para mitigar a tensão de pico e a taxa de crescimento da TRT em disjuntores de alta tensão.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Nesta Seção, pode-se conferir uma síntese sobre artigos, teses e normas sobre o tema proposto, o que foi de grande importância para a concretização deste trabalho.

Nesse contexto, Colclaser et al (1971) demonstraram, a partir de estudos com base na teoria de ondas viajantes, a influência da inserção de células capacitivas nos terminais de um disjuntor, perante a componente transitória da tensão na qual o dispositivo está submetido, frente à solicitação de faltas quilométricas. Os autores constataram que a instalação das células capacitivas resultou em uma medida eficiente para a redução da taxa de crescimento da TRT.

Nobre (1999) desenvolveu um estudo relacionado a um limitador de tensão a base de varistores de óxido de zinco (ZnO) para redução do pico da TRT em

disjuntores da classe 15 kV. Além disso, exibiu uma análise dos parâmetros da TRT por meio do *software* ATP, comparando-os com normas técnicas. Também evidenciou que a inserção de células capacitivas nos terminais de um disjuntor tende a reduzir as taxas de crescimento da TRT (TCTRT).

Além disso, Sinder (2007) realizou uma metodologia de cálculo da TRT em disjuntores de alta tensão em sistemas rigorosamente malhados, nos domínios do tempo e da frequência, com o propósito de analisar a superação destes equipamentos. O método foi elaborado a partir das transformadas de Fourier. Além disso, demonstrou os tipos de TRT's e descreveu os tipos de superação de disjuntores.

Ainda, Azevêdo (2010) exibiu uma técnica para estimação paramétrica de equivalentes dependentes da frequência para aplicação em estudos relacionados a TRT. Foram propostas medidas mitigadoras com foco no dimensionamento de um dispositivo mitigador do pico da TRT, além de demonstrar que o local de inserção das células capacitivas para cada tipo de falta é primordial para a redução da taxa de crescimento da TRT.

Alves (2012) abordou, em sua dissertação de mestrado, uma metodologia de estudo para a determinação dos requisitos de suportabilidade do disjuntor. Também, descreve as TRT's, as sobretensões dos sistemas elétricos e o impacto negativo causado nos equipamentos elétricos.

Já, Rodrigues (2018) propôs um estudo sobre a tensão de restabelecimento transitória (TRT), analisando o comportamento da superação de disjuntores de acordo com o tipo de falta a que o sistema se encontra submetido, o nível de tensão do sistema e a distância da falta em relação aos terminais do disjuntor. Além disso, apresentou métodos mitigadores para a redução dos efeitos da TRT em disjuntores de alta tensão. Baseado em simulações via *software*, constatou-se que os resistores de abertura instalados em paralelo com a câmara principal de um disjuntor, são eficazes para mitigar o valor de pico da TRT e que a instalação de células de surto capacitivas nos terminais do dispositivo, dependendo do local e tipo de falta, tendem a diminuir a taxa de crescimento da TRT.

Também, Lima (2021) apresentou um estudo de caso da superação de disjuntores de alta tensão por tensão de restabelecimento transitória (TRT),

verificando a superação dos disjuntores através dos valores de pico e da taxa de crescimento da TRT, fazendo o uso do *Software* ATP.

Destaca-se que a norma IEEE C37.011-2005 (2005) disponibiliza um guia de utilização, definição e critérios para aplicação de parâmetros de TRT exibidos em outras normas, como a IEEE C37.06-2009.

Por fim, ressalta-se que a norma IEEE C37.06-2009 (2009) menciona as classes de disjuntores de alta tensão internos e externos acima de 1000 V para uso em instalações comerciais, industriais e de serviços públicos.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em quatro Capítulos, com seus respectivos subtítulos, conforme abaixo.

- No Capítulo 2, é abordada a fundamentação teórica sobre o tema, com uma consideração geral sobre a TRT, superação de disjuntores por TRT, os tipos e definições das envoltórias da norma IEEE C37.06-2009, bem como as medidas mitigadoras utilizadas.
- No Capítulo 3, apresentam-se as simulações e os resultados, relatando os tipos de casos avaliados no sistema teste, as especificações da norma, bem como seus respectivos resultados e conclusões.
- No Capítulo 4, são apresentadas as conclusões, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Considerações Gerais**

A análise a respeito da tensão de restabelecimento transitória é fundamental para definir se um disjuntor se encontra adequado para suportar a corrente elétrica e atuar no sistema. É de suma importância o conhecimento em relação ao funcionamento do disjuntor, o processo de análise de superação da TRT, do mesmo modo que as curvas envoltórias pré-estabelecidas por normas técnicas.

Neste Capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos em relação aos disjuntores, assim como a TRT e como ela surge entre os terminais de um disjuntor, as envoltórias relacionadas as normas técnicas e seus parâmetros de definição. Por fim, é abordada a superação de disjuntores e também análises com relação a aspectos como a redução da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TCTRT) e a mitigação de valor de pico da TRT.

### **2.2 Disjuntores**

#### **2.2.1 Definição**

Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos de manobra com a função de conduzir, estabelecer, suportar e interromper correntes elétricas perante sua tensão máxima de rede nas circunstâncias normais de atuação e nas circunstâncias anormais especificadas, isto é, situações conhecidas que influenciam o sistema, tais como, curtos-circuitos e descargas atmosféricas (SAMPAIO, 2012, p.10).

A princípio, o disjuntor necessita ser apto a interromper uma situação de falta no sistema. Nos disjuntores de baixa tensão, normalmente esta ação é efetuada no interior da capa protetora do disjuntor. No caso dos disjuntores de média e alta tensão, eles são empregados juntos a dispositivos de alta sensibilidade para detectar se existe algum evento de falta e a partir disto atuar o mecanismo de abertura do equipamento.

Os disjuntores para média e alta tensão devem ser em geral instalados em associação com relés específicos, que são responsáveis pelo seu acionamento nas circunstâncias dos eventos citados anteriormente. Após a detecção da falta, realizada

pelo relé, os contatos devem ser abertos, por meio de energias eletromagnéticas ou mecânicas.

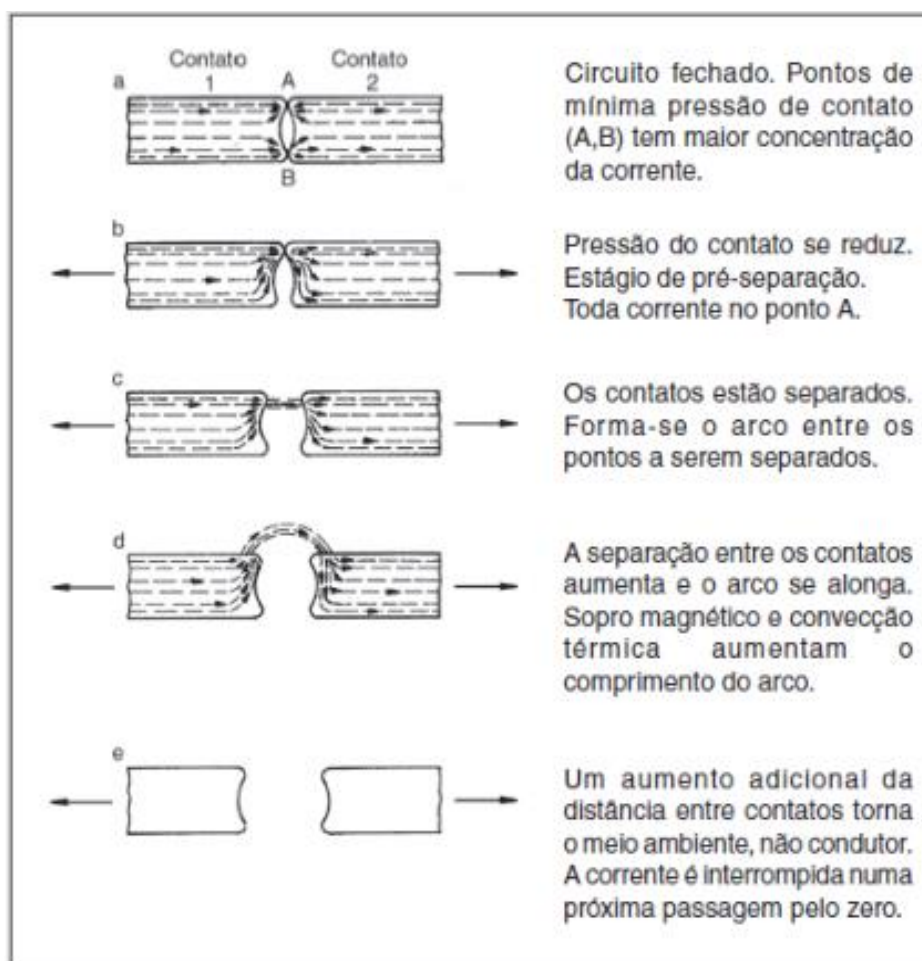
### **2.2.2 Acionamento de um Disjuntor**

Em um sistema elétrico de potência, a partir de uma ocorrência de falta no sistema, um relé de proteção é acionado, detectando e emitindo um sinal de comando, partindo do circuito de controle do disjuntor encarregado pela abertura dos contatos, e, dessa forma, protegendo os equipamentos do sistema. O disjuntor, todavia, também pode ser aberto sem condições de falta, através de comandos manuais pelo operador, como, por exemplo, para manutenções pré-programadas (W.Service, 2006).

Para uma melhor compreensão do funcionamento deste equipamento, é necessário conhecer o procedimento de interrupção do arco elétrico. O disjuntor recebe um comando para que seus contatos sejam abertos, com a finalidade de extinguir a falta e proteger o restante dos equipamentos do sistema. Então, é iniciada a abertura do dispositivo. Ao começar o processo de abertura, a pressão diminui e a resistência aumenta. A partir da separação dos contatos permanentes, a corrente começa a circular por meio dos contatos principais, os quais são mais robustos para suportar os efeitos do arco elétrico. O procedimento continua até que esses contatos estejam separados. Neste momento da separação dos contatos a pressão é muito próxima de ser nula e a resistência é proporcionalmente alta. Esse procedimento pode ser melhor compreendido por meio da Figura 1.

Para extinguir este arco elétrico, o disjuntor é fabricado com os seus contatos imersos em um meio isolante, como ar, óleo, vácuo e o gás SF<sub>6</sub>, por exemplo. Portanto, o objetivo é alongar o arco dentro de um espaço reduzido no interior da câmara de extinção com o intuito de intensificar seu resfriamento e, conseqüentemente, promover a sua extinção (ARANTES, 2015, p.20).

Figura 1 – Processo de interrupção de Corrente Alternada.



Fonte: (W Service, 2006).

## 2.3 Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)

### 2.3.1 Definição

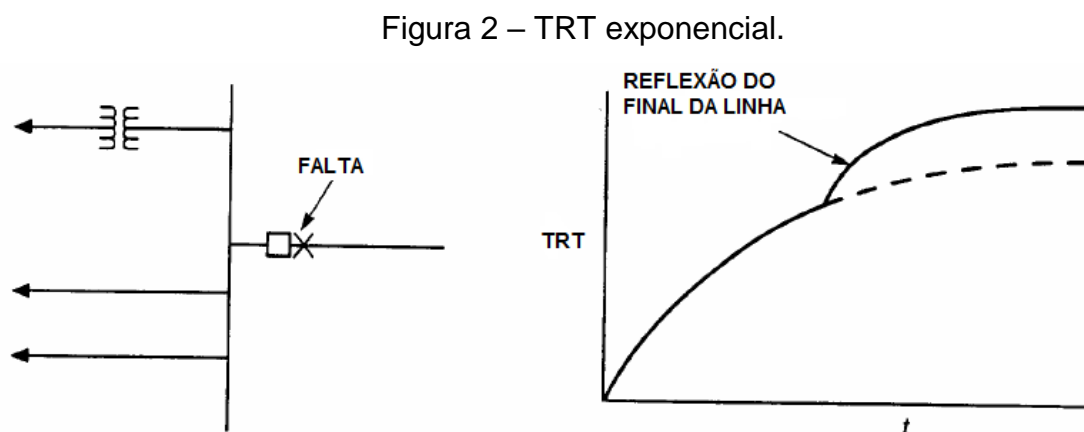
Segundo Azevêdo (2010), a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é o termo utilizado para denominar a componente transitória da tensão que surge entre os pólos dos terminais de um disjuntor a partir de sua abertura perante eliminação de uma falta no sistema elétrico. Este fenômeno é caracterizado por ser do tipo oscilatório e de alta frequência, na qual pode alcançar altas magnitudes, podendo gerar efeitos indesejados como a ruptura do dielétrico do disjuntor, e em situações críticas, ocasionar a falha da interrupção da corrente elétrica.

### 2.3.2 Tipos de TRT

A Tensão de Restabelecimento Transitória pode ser do tipo oscilatória, triangular ou exponencial, até mesmo, podendo ocorrer uma mescla entre elas. Geralmente, o que define o tipo de resposta da TRT é o local onde ela acontece.

As TRT's exponenciais e oscilatórias tendem a ocorrer por meio do primeiro terminal do disjuntor, interrompendo uma falta simétrica trifásica em seu terminal, no instante em que a tensão é máxima. As TRT's triangulares são referentes às faltas que ocorrem na linha, em geral a partir do momento em que há um curto na linha de transmissão, na qual as tensões aumentam à medida que a falta se aproxima do disjuntor (IEEE C37.011-2005, p.5).

Uma TRT Exponencial típica ocorre, em geral, quando há uma linha de transmissão e um transformador no lado oposto do disjuntor em que está localizada a falta (IEEE C37.011-2005, p.5). A Figura 2 mostra uma TRT exponencial.

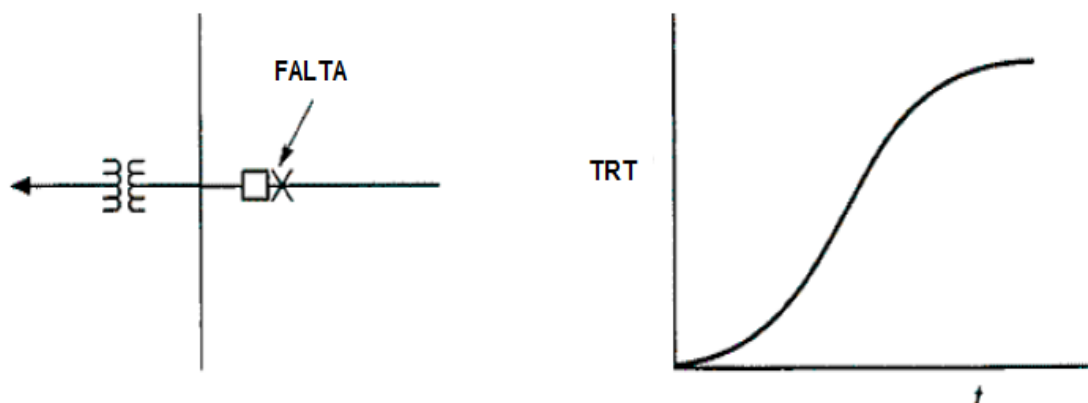


Fonte: Adaptação (IEEE C37.011-2005, 2005, p. 5).

Já uma TRT Oscilatória ocorre quando existe somente um transformador ou reator no lado oposto do disjuntor, no qual se encontra a falta. Este tipo de TRT é mais comum de ocorrer devido às propriedades capacitivas e indutivas do sistema contribuírem na geração do aspecto oscilatório (IEEE C37.011-2005, p.5). A Figura 3 mostra uma TRT oscilatória.



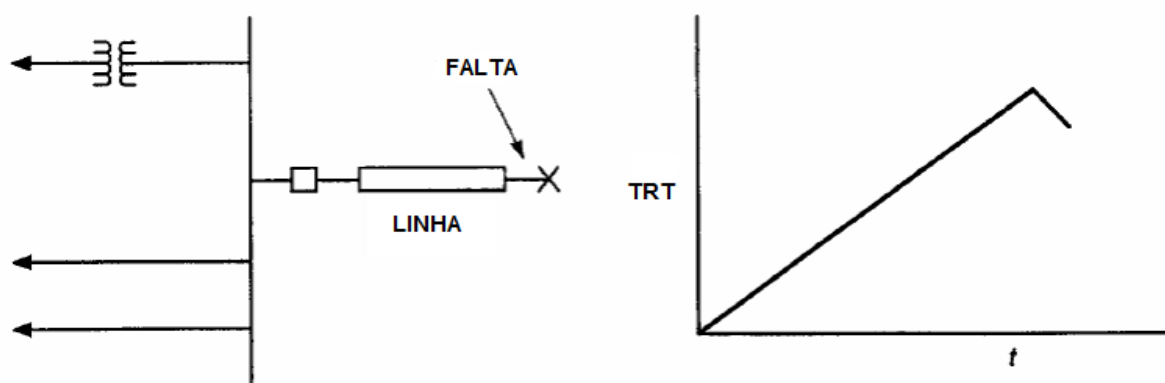
Figura 3 – TRT oscilatória.



Fonte: Adaptação (IEEE C37.011-2005, 2005, p. 5).

Por fim, a TRT triangular ocorre quando a falta está localizada na linha de transmissão. A impedância de surto da linha define a natureza da TRT e, geralmente, a taxa de aumento da curva é maior do que as taxas das curvas oscilatórias e exponenciais (IEEE C37.011-2005, p.6). A Figura 4 mostra uma TRT triangular.

Figura 4 – TRT triangular.



Fonte: Adaptação (IEEE C37.011-2005, 2005, p. 6).

## 2.4 Superação de Disjuntores

### 2.4.1 Superação de Disjuntores por TRT

Segundo Sinder (2007), a superação de disjuntores é analisada por meio de duas etapas. Na primeira, é efetuada a verificação sobre os estudos relacionados ao curto-circuito, na qual são selecionados os disjuntores propícios a superação. A

segunda, mediante um estudo mais abrangente relacionado aos disjuntores selecionados na primeira etapa, define-se qual tipo de superação será utilizado.

Os tipos de superação de disjuntores de alta tensão são os seguintes: através de corrente de carga, corrente de curto-circuito simétrica, corrente de curto-circuito assimétrica, crista da corrente de curto-circuito e superação por tensão de restabelecimento transitória (SINDER, 2007, p.7).

Conforme Sinder (2007), a superação por TRT ocorre quando o disjuntor está sendo superado por um valor de pico da TRT ou pela sua taxa de crescimento (TCTRT). Um disjuntor é dito superado por TRT quando os seus valores de suportabilidade dielétrica do meio de extinção do arco elétrico são ultrapassados.

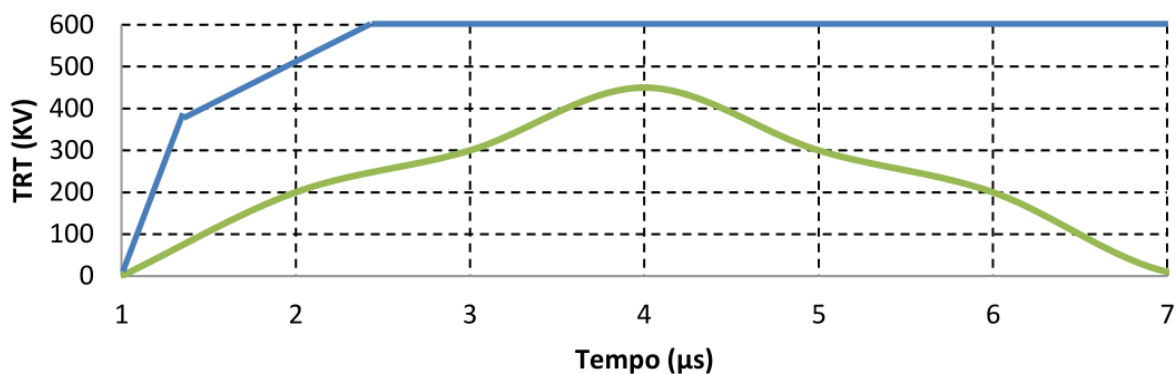
Além disso, o disjuntor é considerado superado no momento em que a sua curva da TRT extrapola qualquer ponto da envoltória. Valores de pico e da taxa de crescimento da TRT não devem ultrapassar a envoltória da TRT em que o disjuntor foi categorizado.

Para constatar se o disjuntor se encontra adequado, são utilizadas as envoltórias definidas por normas técnicas. Estas envoltórias são baseadas em três principais grandezas, as quais são mencionadas abaixo:

- **Corrente a ser interrompida pelo disjuntor:** é o percentual da corrente de curto-circuito em relação à capacidade de interrupção do disjuntor analisado, seu valor é dado em quiloampère (kA).
- **Valor de pico da TRT:** valor de maior amplitude da TRT, geralmente dada em quilovolt (kV).
- **Taxa de crescimento da TRT (TCTRT):** usualmente é dada em quilovolt por microssegundos (kV/ $\mu$ s) e, é relacionada a taxa de acordo com o crescimento da TRT.

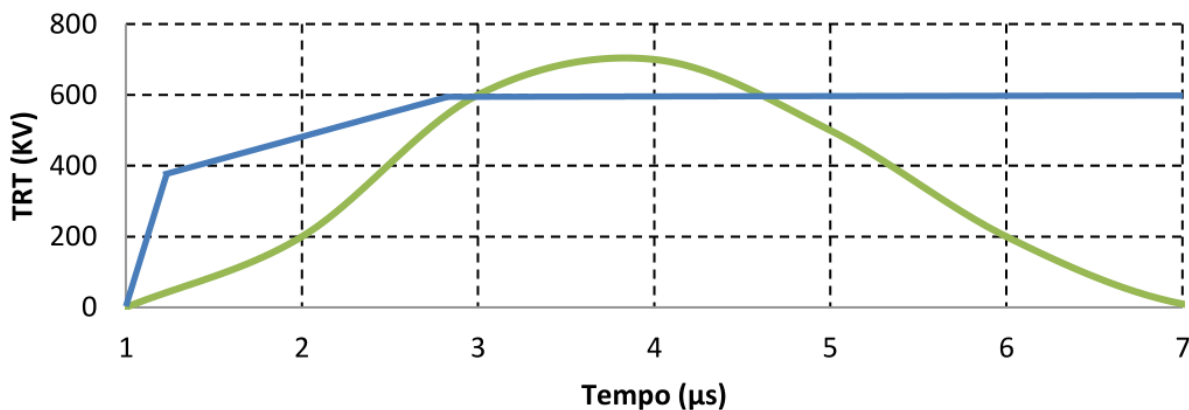
As Figuras 5 e 6 exemplificam de que modo ocorre o procedimento de superação de disjuntores através da TRT em comparação com as suas envoltórias. A Figura 5 exhibe um disjuntor que não foi superado e na Figura 6 é exibido um disjuntor superado por valor de pico da TRT.

Figura 5 – Exemplo de envoltória de um disjuntor não superado.



Fonte: (ALVES, 2012).

Figura 6 – Exemplo de envoltória de um disjuntor superado.



Fonte: (ALVES, 2012).

#### 2.4.2 Caracterização das Envoltórias da Norma

A aplicação de envoltórias definidas por normas é uma etapa primordial na análise de superação de dispositivos através da TRT. Neste Trabalho foi usada a norma IEEE C37.06-2009 para as análises de curtos-circuitos trifásicos não aterrados e curtos-circuitos fase-terra em sistemas efetivamente aterrados. Os respectivos parâmetros podem ser observados a seguir, através das Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Classificações preferenciais de TRT para disjuntores classificados Acima de 100kV para faltas aterradas em sistema efetivamente aterrado com

$$Kpp = 1,3.$$

Standard values of TRV represented by four parameters (test duties T100, T60) and two parameters (test duties T30, T10).								
Rated maximum voltage (1) $U_r$ kV, rms	Test duty	First reference voltage $u_1$ kV	Time $t_1$ $\mu$ s	TRV peak value (4) (8) $u_c$ kV	Time (2) $t_2$ $\mu$ s	Time $t_3$ $\mu$ s	Time delay (5) $t_d$ $\mu$ s	RRRV $u_1/t_1$ or $u_c/t_3$ kV/ $\mu$ s
145	T100	115	58	215	232	-	2	2
145	T60	115	38	231	114	-	2	3
145	T30	-	-	237	-	47	7	5
145	T10	-	-	272	-	39	6	7

Fonte: Adaptação (IEEE C37.06-2009, 2009, p. 23).

Tabela 2 – Classificações preferenciais de TRT para disjuntores classificados Acima de 100kV para faltas não aterradas em sistema efetivamente aterrado com

$$Kpp = 1,5.$$

Standard values of TRV represented by four parameters (test duties T100, T60) and two parameters (test duties T30, T10).								
Rated maximum voltage (1) $U_r$ kV, rms	Test duty	First reference voltage $u_1$ kV	Time $t_1$ $\mu$ s	TRV peak value (4) (8) $u_c$ kV	Time (2) $t_2$ $\mu$ s	Time $t_3$ $\mu$ s	Time delay (5) $t_d$ $\mu$ s	RRRV $u_1/t_1$ or $u_c/t_3$ kV/ $\mu$ s
145	T100	133	<b>67</b>	249	268	-	2	2
145	T60	133	44	266	132	-	2	3
145	T30	-	-	281	-	56	8	5
145	T10	-	-	291	-	42	6	7

Fonte: Adaptação (IEEE C37.06-2009, 2009, p. 26).

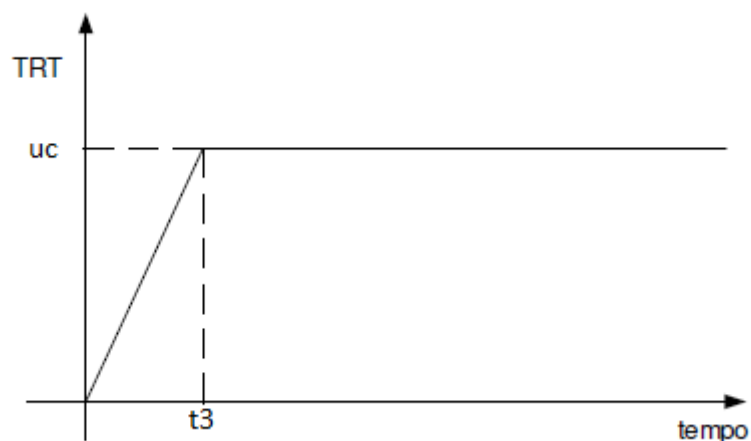
A partir das tabelas apresentadas, são estabelecidos os parâmetros a seguir:

- $U_r$ : tensão máxima nominal;
- *Test Duty*: Capacidade de interrupção da  $I_{cc}$  (%CNI). Quanto menor a relação entre a corrente de curto-circuito e a capacidade nominal de interrupção do equipamento, maiores as chances de sucesso na abertura. (AZEVEDO, 2010, p. 16);
- $U_1$ : primeira tensão de referência para envoltória de quatro parâmetros;

- $U_c$ : valor de pico máximo para a TRT;
- $t_1$ : primeiro tempo de referência para envoltória de quatro parâmetros;
- $t_2$ : tempo necessário para alcançar o valor de pico máximo para envoltória de quatro parâmetros;
- $t_3$ : tempo necessário para alcançar o valor de pico máximo para envoltória de dois parâmetros;
- $t_d$ : segmento de reta que define um retardo nominal;
- $RRRV$ : *rate of rise of recovery voltage*, é a taxa de crescimento da TRT (TCTRT), é a parcela crescente da envoltória, dada em  $kV/\mu s$ ;
- $K_{pp}$ : Fator de primeiro pólo, é definido como sendo a razão entre a componente fundamental da tensão do primeiro pólo do disjuntor a extinguir a corrente de curto-circuito, (antes que os outros pólos atuem eliminando a falta). Seu valor correspondente em regime após a supressão total da falta por todos os pólos do disjuntor (MELO, 2010, p. 8). Conforme a norma IEEE C37.011-2009 (2009), a escolha desse fator depende do arranjo de aterramento do sistema e pode ser padronizado no valor de 1,3 para faltas aterradas e 1,5 para faltas não aterradas em sistemas efetivamente aterrados.

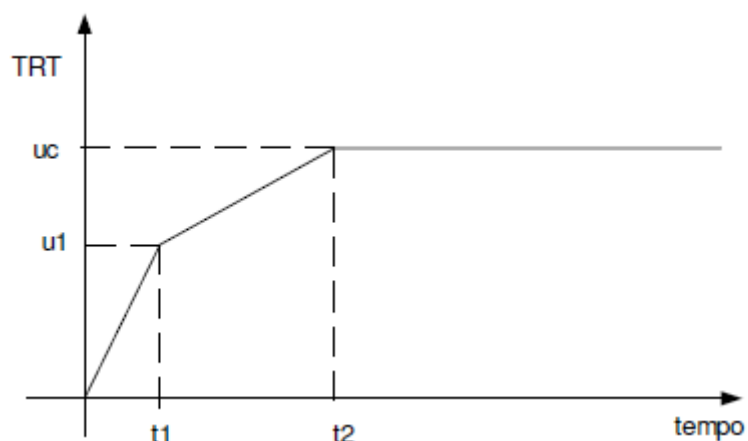
A norma IEEE C37.06-2009 (2009) define as envoltórias a partir de dois e quatro parâmetros. A determinação do tipo de envoltória a ser utilizada é definida por meio da classe de tensão do dispositivo a ser analisado e também por meio da escolha do regime de teste (*Test Duty*) correspondentes a 10%, 30%, 60% e 100% da capacidade de interrupção nominal do curto (%CNI). Para as classes de tensão inferiores a 100 kV, a envoltória é constituída por dois parâmetros. E no caso de classes de tensão superiores a 100 kV, a envoltória é composta por quatro parâmetros. A seguir, as Figuras 7 e 8 apresentam as envoltórias descritas.

Figura 7 – Envoltória de dois parâmetros.



Fonte: adaptação (SINDER, 2007, p.35).

Figura 8 – Envoltória de quatro parâmetros.



Fonte: (SINDER, 2007, p.36).

## 2.5 Medidas Mitigadoras

A aplicação de limitadores de tensão em um sistema de potência possui a finalidade de impedir que níveis de tensão superiores a um valor especificado sejam capazes de atingir o sistema, danificando o dispositivo designado a proteção. A sua utilização tende a reduzir os recursos financeiros destinados a estes meios, tendo em vista que não seria necessária a troca dos equipamentos por outros de classe superior.

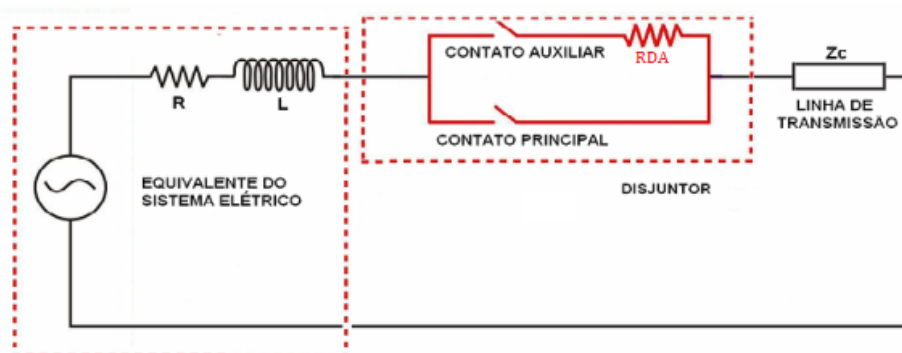
Para a mitigação de disjuntores superados por valor de pico da TRT ou por meio da taxa de crescimento da TRT, são apresentadas medidas mitigadoras com o

intuito de reduzir esses valores a fim de deixá-los em conformidade com os parâmetros estabelecidos em norma.

### 2.5.1 Resistores de Abertura

Segundo Alves (2006), em disjuntores de alta e extra-alta tensão é possível utilizar resistores de abertura para reduzir os efeitos da TRT. Os resistores são instalados em câmaras auxiliares, em paralelo com as câmaras principais do disjuntor. Nos dispositivos equipados com esse elemento, quando ocorre a interrupção de uma falta, fecham-se os contatos da câmara auxiliar, introduzindo no circuito o resistor. Após alguns milissegundos, abrem-se os contatos da câmara principal e, posteriormente, os contatos da câmara auxiliar de forma definitiva, dessa forma, interrompendo a falta. O resistor de abertura é bastante efetivo para a redução de sobretensões da TRT a valores inferiores à suportabilidade do disjuntor, assim como para a diminuição da taxa de crescimento da TRT. O arranjo de atuação do resistor de abertura é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Circuito simplificado do resistor de abertura.



Fonte: adaptação (VALERO, 2007, p.41).

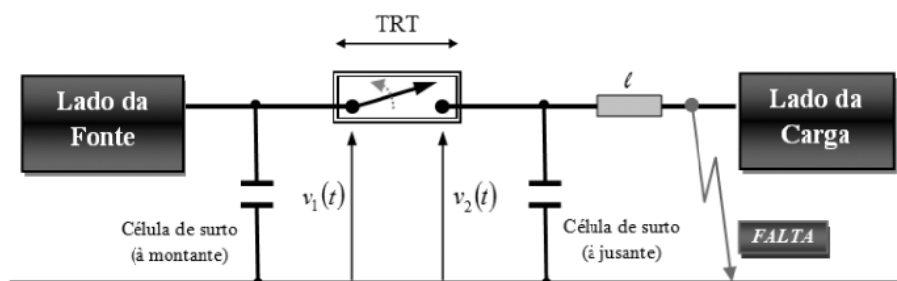
### 2.5.2 Células de Surto Capacitivas

Tendo em vista às diretrizes para a mitigação quando a taxa de crescimento (TCTRT) ultrapassa o limite definido em norma, geralmente, recomenda-se a inserção de células de surto capacitivas, com o propósito de reduzir a frequência de oscilação transitória da tensão de restabelecimento (COLCLASER et al, 1971). Embora não proporcione alterações consideráveis no valor de pico da TRT, para a redução da

TCTRT, o local de inserção das células capacitivas deve ser avaliado tecnicamente, buscando uma maior eficácia no efeito de sua utilização.

Como dito anteriormente, a correta localização das células de surto capacitivas a montante ou a jusante do disjuntor, demonstrada na Figura 10, é de exímia importância em relação ao cenário de superação analisado. Na superação por meio da TCTRT sob condições de falta trifásica não aterrada, é recomendada a instalação das células capacitivas nos pólos do disjuntor localizados a montante, desse modo ocasionando a redução da frequência de oscilação da tensão  $v_1(t)$  do lado da fonte. Já no cenário de superação através da TCTRT por meio de falta monofásica quilométrica, é recomendada a instalação das células capacitivas nos pólos do dispositivo localizados a jusante, isto é, no lado da carga, desta forma minimizando as oscilações da alta frequência da tensão  $v_2(t)$  características deste tipo de falta (AZEVEDO, 2010. p.17).

Figura 10 – Localização das células de surto capacitivas para a redução da TCTRT.



Fonte: (AZEVEDO, 2010, p.17.).

Por fim, não sendo possível a redução dos valores das solicitações de TRT através de meios economicamente viáveis, a solução plausível será a substituição desses disjuntores analisados por outros de tensão nominal superior ou de mesma tensão, no entanto, com características dielétricas especiais condizentes com o fenômeno (Alves, 2006. p.47).

## 2.6 Considerações Finais

Este Capítulo apresentou a fundamentação teórica sobre a definição e os princípios de funcionamento de um disjuntor. Além disso, foi realizada uma abordagem sobre as TRT's, na qual foi evidenciado o surgimento deste fenômeno



através dos terminais de um disjuntor, juntamente com os tipos deste transitório eletromagnético, que podem ocorrer no sistema.

Com relação à superação dos disjuntores, foram introduzidos os tipos de superação que o disjuntor pode ter frente a TRT, que acontece a partir que a onda da TRT supera as curvas envoltórias determinadas por normas técnicas. Essa superação do disjuntor por meio da TRT, pode ocorrer tanto pelo valor de pico quanto pela taxa de crescimento. Por fim, foram apresentados métodos mitigadores, como alternativa para a redução do efeito da TRT, com o intuito de reduzir os valores superados e deixá-los de acordo com os parâmetros definidos em norma.

### 3 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1 Considerações Gerais

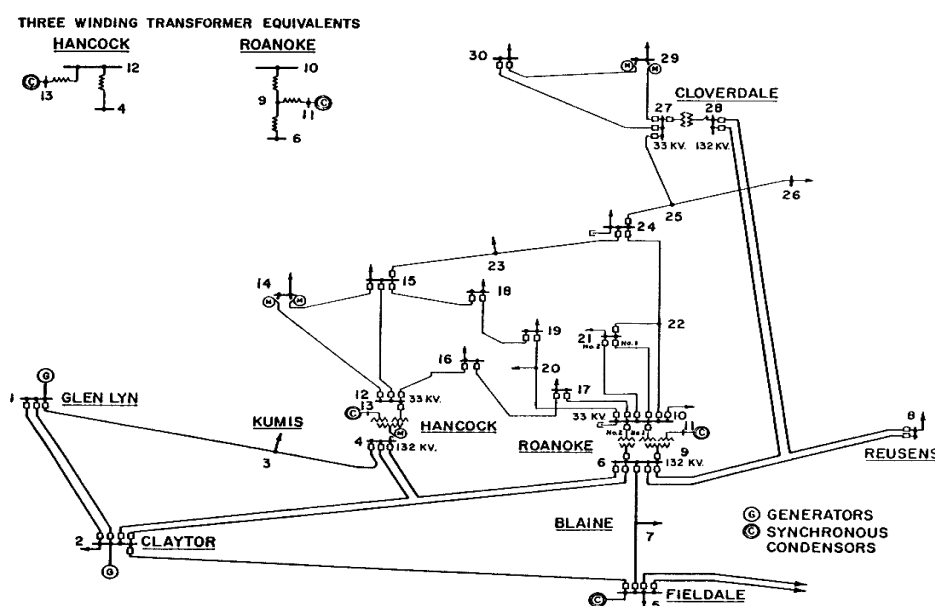
Neste Capítulo, são exibidos os dados do sistema teste empregado neste Trabalho, as definições da norma, os casos analisados e as medidas mitigadoras aplicadas.

As análises e resultados para o estudo de caso da superação por TRT e técnicas de mitigação para curtos-circuitos trifásicos não aterrados e fase-terra em distintos pontos do sistema são abordadas, tal como a relação quanto aos distintos regimes de *Test Duty* para um disjuntor da mesma categoria de tensão.

#### 3.2 Sistema Teste e Envoltórias da Norma IEEE C37.06-2009

Para a análise do comportamento de disjuntores frente a TRT, o sistema teste IEEE 30-barras apresentado na Figura 11 foi modelado e simulado por meio da interface gráfica do *software ATPDraw*. Os dados referentes ao sistema estão disponíveis nas Tabelas do Anexo A.

Figura 11 – Sistema teste IEEE 30-barras.

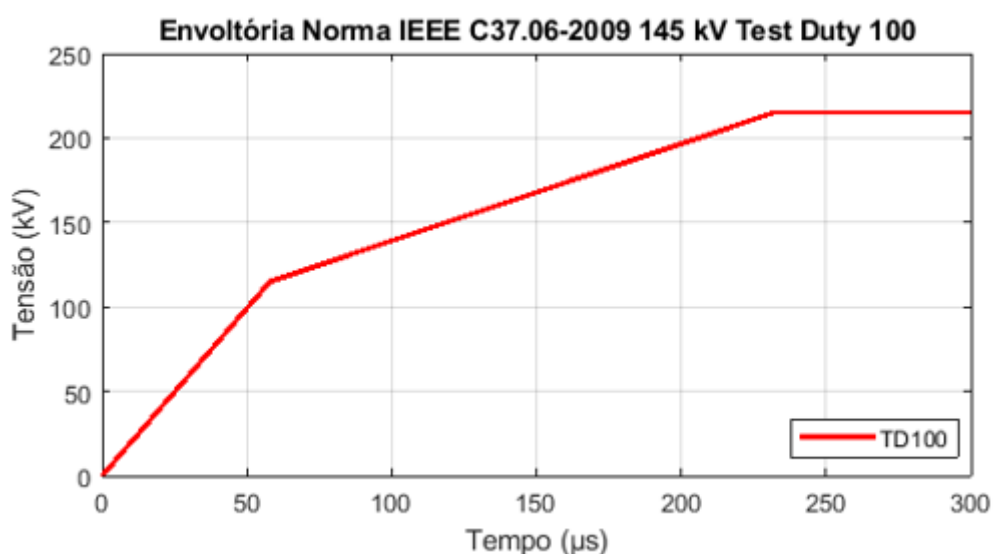


Fonte: (Ali R. Al-Roomi, 2015).

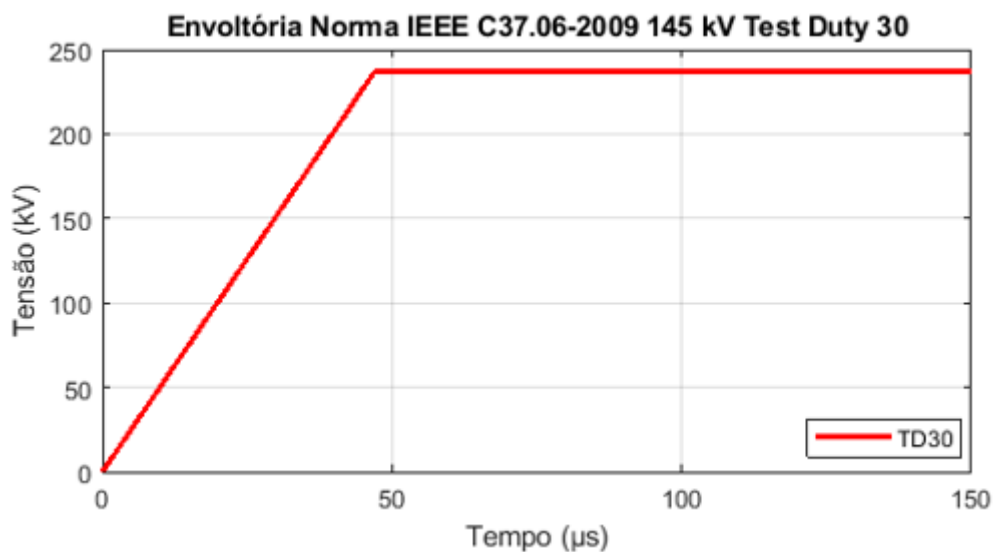
As especificações da norma IEEE C37.06-2009 foram aplicadas para elaborar as envoltórias, nas quais seus respectivos dados podem ser observados através dos Anexos B e C. As Figuras 12 e 13 a seguir exibem as envoltórias para as categorias de tensão de 145 kV e também os *Test Duties* T100 e T30, para análise de faltas aterradas e não aterradas em sistemas efetivamente aterrados, respectivamente.

Figura 12 – Envoltórias da norma para faltas aterradas para *Test Duties* T100 e T30.

(a) envoltória TD100



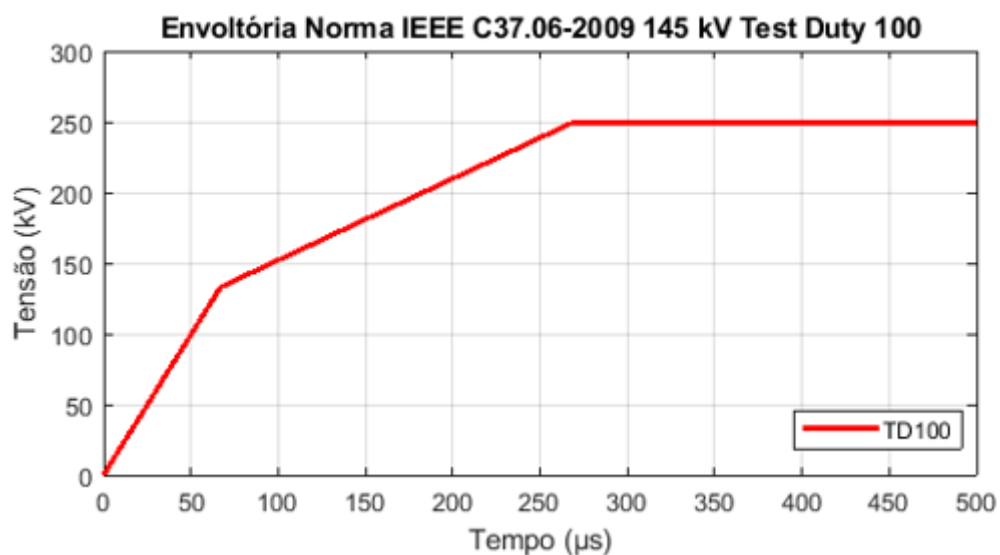
(b) envoltória TD30



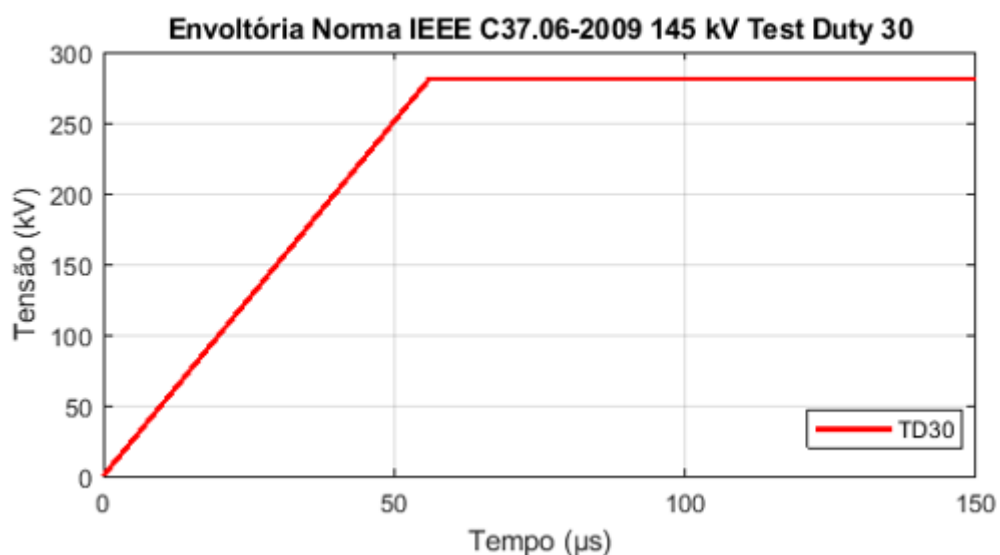
Fonte: Autor.

Figura 13 – Envoltórias da norma para faltas não aterradas para *Test Duties* T100 e T30.

(a) envoltória TD100



(b) envoltória TD30



Fonte: Autor.

Foi utilizado o software *Matlab*® para elaborar as envoltórias citadas na norma. Para o *Test Duty* T100 é utilizada a envoltória de quatro parâmetros e, para o *Test Duty* T30, é utilizada a envoltória de dois parâmetros. Os valores da tensão são dados em Quilovolt (kV) e o tempo é dado em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ). A Tabela 3 apresenta

os parâmetros da norma IEEE C37.06-2009 utilizados para análises de faltas aterradas e a Tabela 4 apresenta os parâmetros para faltas não aterradas.

Tabela 3 – Parâmetros da norma para faltas aterradas.

$U_r$ kV, rms	Test duty	$u_1$ kV	$t_1$ $\mu$ s	$u_c$ kV	$t_2$ $\mu$ s	$t_3$ $\mu$ s	$t_d$ $\mu$ s	RRRV kV/ $\mu$ s
145	T100	115	58	215	232	-	2	2
145	T60	115	38	231	114	-	2	3
145	T30	-	-	237	-	47	7	5
145	T10	-	-	272	-	39	6	7

Fonte: Adaptação (IEEE C37.06-2009, 2009, p. 23).

Tabela 4 – Parâmetros da norma para faltas não aterradas.

$U_r$ kV, rms	Test duty	$u_1$ kV	$t_1$ $\mu$ s	$u_c$ kV	$t_2$ $\mu$ s	$t_3$ $\mu$ s	$t_d$ $\mu$ s	RRRV kV/ $\mu$ s
145	T100	133	67	249	268	-	2	2
145	T60	133	44	266	132	-	2	3
145	T30	-	-	281	-	56	8	5
145	T10	-	-	291	-	42	6	7

Fonte: Adaptação (IEEE C37.06-2009, 2009, p. 26).

### 3.3 Casos Analisados

Para as análises dos disjuntores frente à superação da TRT, foram consideradas as condições a seguir:

- Curto-circuito trifásico não aterrado próximo a um disjuntor da linha;
- Curto-circuito fase-terra em 50% da linha.

Os casos analisados foram todos padronizados na classe de tensão de 145 kV, com as capacidades nominais de interrupção (%CNI) do disjuntor em 100% e 30%. As linhas escolhidas do sistema para as análises de curto-circuito trifásico não aterrado foram as seguintes: 2-6, 4-6 e 8-28. Para a análise do curto-circuito fase-terra, foram escolhidas as linhas a seguir: 1-3, 2-4 e 6-7.

Os dados de tensão da TRT foram obtidos por meio do sistema teste IEEE 30-barras modelado no software *ATPdraw*. Durante a simulação, foi utilizado um *loop* com o intuito de realizar múltiplos cenários com valores referentes aos curtos, tais cenários relacionados aos valores das células capacitivas e das resistências de abertura dos disjuntores analisados. Deste modo, foi possível identificar de maneira prática no sistema a condição mais viável para se obter menores sobretensões e taxas de crescimento da TRT, e que ambas fiquem condizentes com as normas vigentes.

A representação dos resultados foi feita através das formas de onda da TRT envoltas pelos valores mencionados na norma, sendo os sinais de tensão das fases apresentadas referentes ao primeiro polo a abrir. As fases foram então exportadas para o *software Matlab®* e posteriormente sincronizadas com as envoltórias da norma, desta forma gerando os gráficos de análise.

A superação por Pico da TRT para os casos estudados é realizada a partir que a TRT ultrapassa a envoltória da norma em sua parte constante. A análise da TCTRT para cada caso é feita através do detalhamento dos ciclos iniciais da TRT. A porção crescente da reta inclinada da envoltória contempla a taxa de crescimento que a TRT deve respeitar, podendo ser calculada pelo valor da tensão máxima do primeiro pico pelo tempo gasto até ele ser atingido. Quando essa reta inclinada da envoltória é violada, a superação por TCTRT acontece.

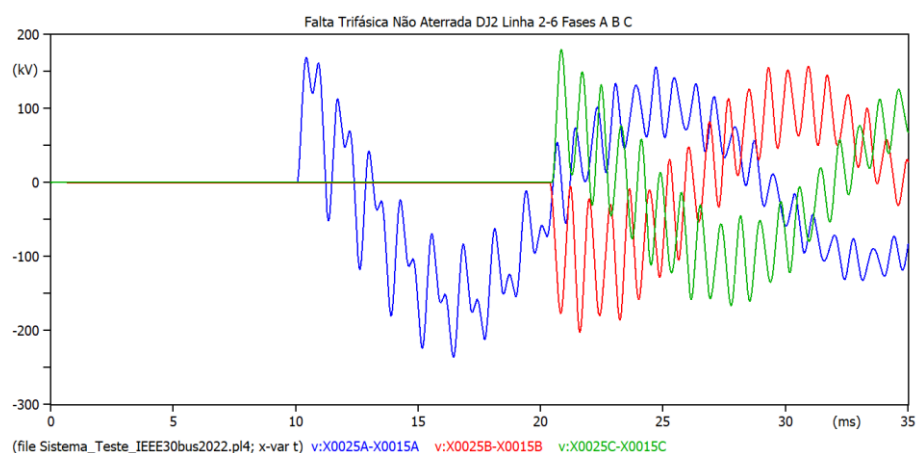
### **3.4 Caso 1: Curto-Circuito Trifásico Não Aterrado próximo a um Disjuntor**

Neste caso, a simulação foi realizada a partir de um curto-circuito trifásico não aterrado próximo a um dos disjuntores da linha examinada. Para o disjuntor escolhido, foi analisada a TRT para as capacidades de interrupção T100 e T30 mencionadas na norma. Os resultados de cada linha podem ser observados a seguir.

#### **3.4.1 Linha 2-6**

O disjuntor 2 na extremidade da linha 2-6 foi analisado para um curto-circuito trifásico não aterrado próximo aos seus terminais. A TRT apresentou o seu comportamento mais crítico na fase A, conforme a Figura 14, portanto, esta fase será utilizada como referência na análise dos resultados.

Figura 14 – Formas de onda da TRT nas três fases do disjuntor 2 da linha 2-6 para o caso 1.

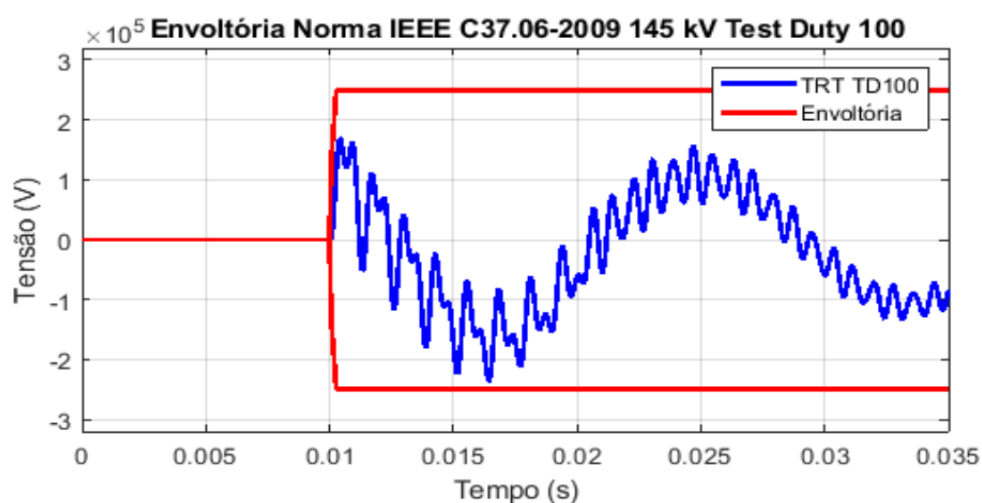


Fonte: Autor.

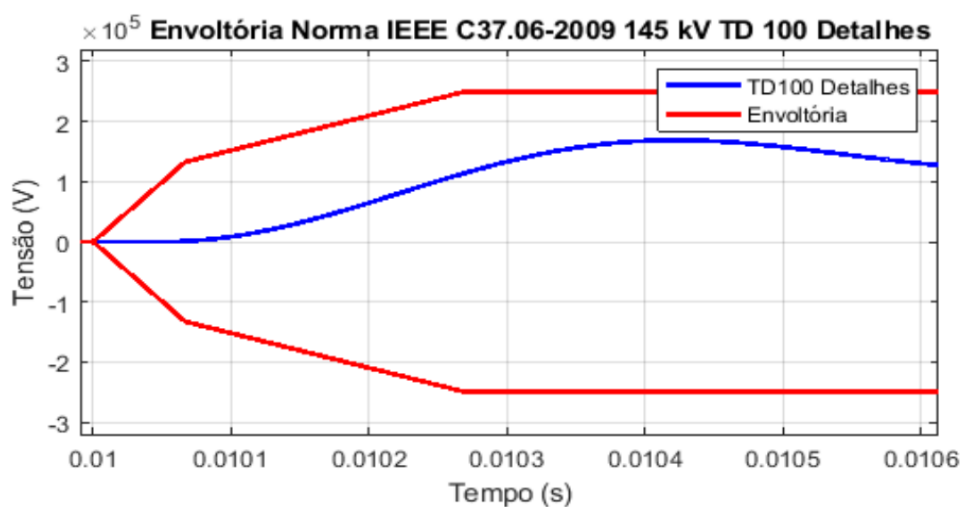
Então foi realizada a comparação da TRT com a norma que relaciona os sistemas efetivamente aterrados à tensão de 145 kV para um curto-circuito trifásico não aterrado com *Test Duty* 100 e *Test Duty* 30. A seguir, a Figura 15 apresenta a TRT envolta pela norma para os regimes de teste T100 e T30 para o disjuntor 2.

Figura 15 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 2-6 para o caso 1.

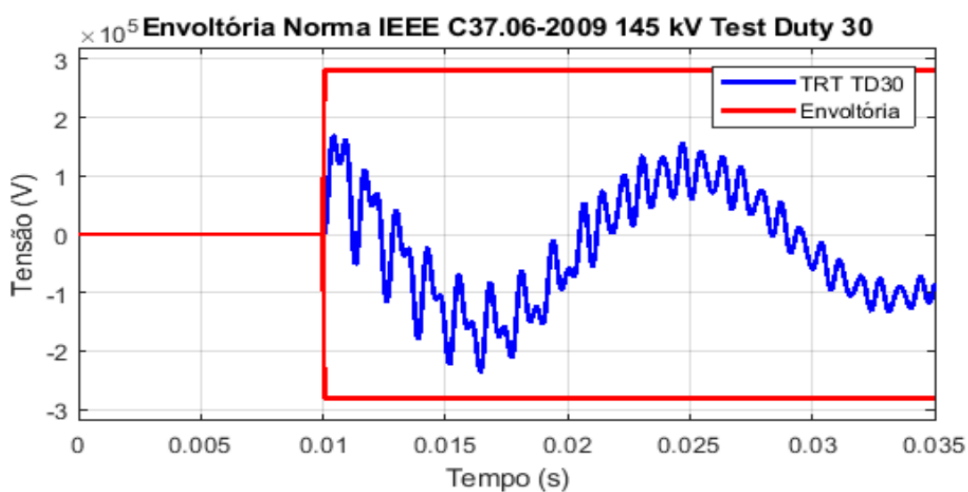
(a) Análise da TRT para o TD100.



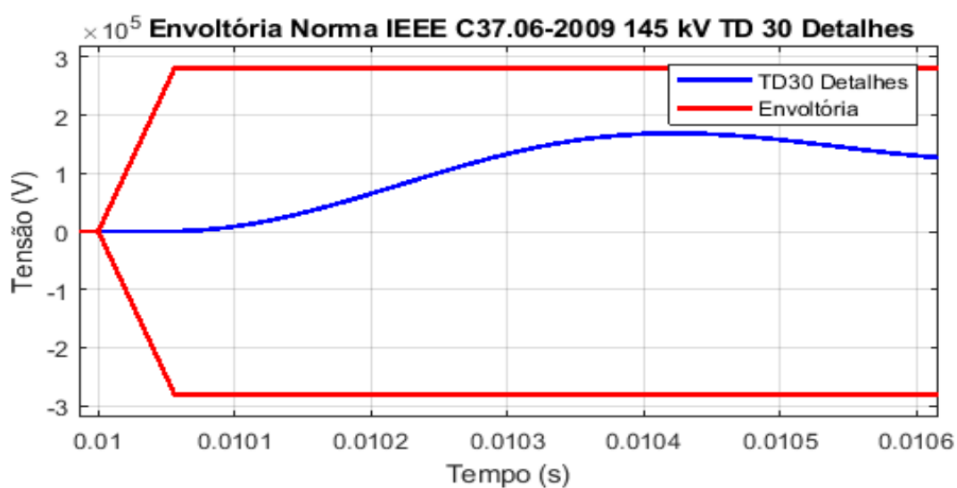
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.



Fonte: Autor.



A simulação demonstrou que a TRT não ultrapassou os limites definidos em norma para o valor de pico da TRT e também, nota-se, no detalhe dos ciclos iniciais que não houve superação do disjuntor por meio da TCTRT.

Os valores de pico da TRT e da TCTRT correspondentes à onda e à envoltória são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 2 da linha 2-6 para o caso 1.

Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)
Disjuntor 2 Linha 2-6	-235,86	0,457	249	2	281	5

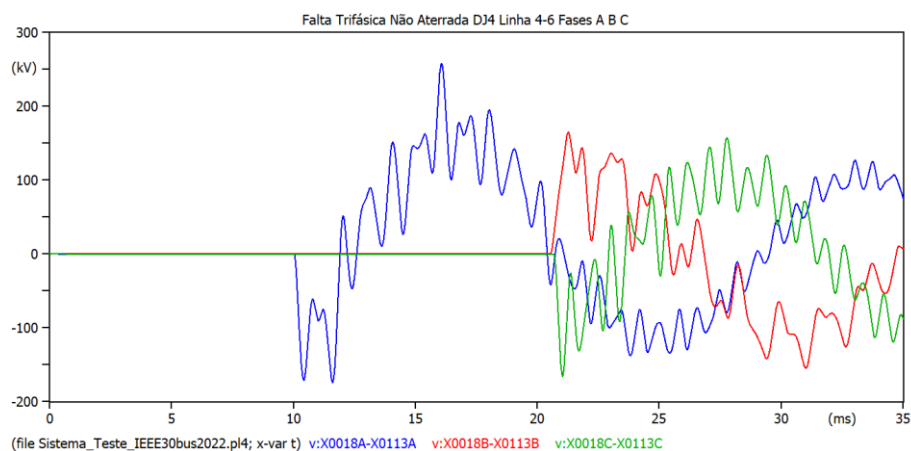
Fonte: Autor.

Neste caso, como apresentado na Tabela 5, a TRT não excedeu os limites definidos por norma para o disjuntor 2. Portanto, nenhuma alteração foi proposta ao sistema.

### 3.4.2 Linha 4-6

Para a análise da TRT no disjuntor 4 localizado na linha 4-6, foi aplicado novamente um curto-circuito trifásico não aterrado próximo aos terminais do disjuntor. A TRT apresentou o seu comportamento mais crítico na fase A, de acordo com a Figura 16. Logo, esta fase será utilizada para a análise dos resultados.

Figura 16 – Formas de onda da TRT nas três fases do disjuntor 4 da linha 4-6 para o caso 1.

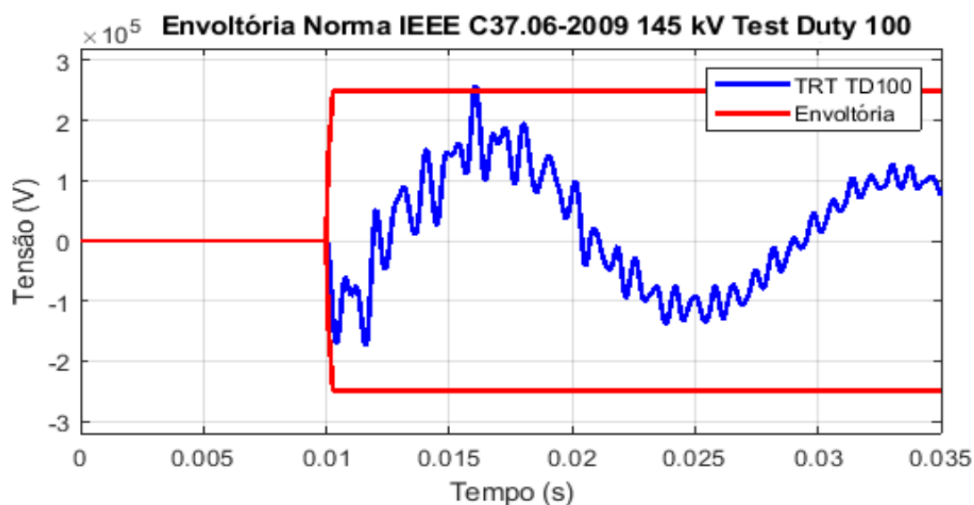


Fonte: Autor.

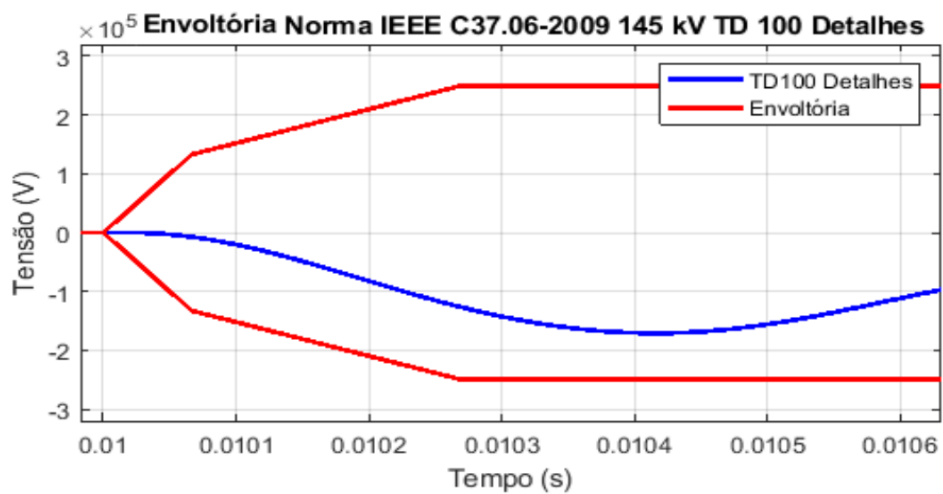
Com isso, foi empregue a comparação da TRT com a norma que relaciona os sistemas efetivamente aterrados com a tensão de 145 kV para um curto-circuito trifásico não aterrado com regime de operação T100 e T30. A seguir, a Figura 17 apresenta a TRT envolta pela norma para os *Test Duties* T100 e T30 para o disjuntor 4.

Figura 17 – Análise de superação do disjuntor 4 da linha 4-6 para o caso 1.

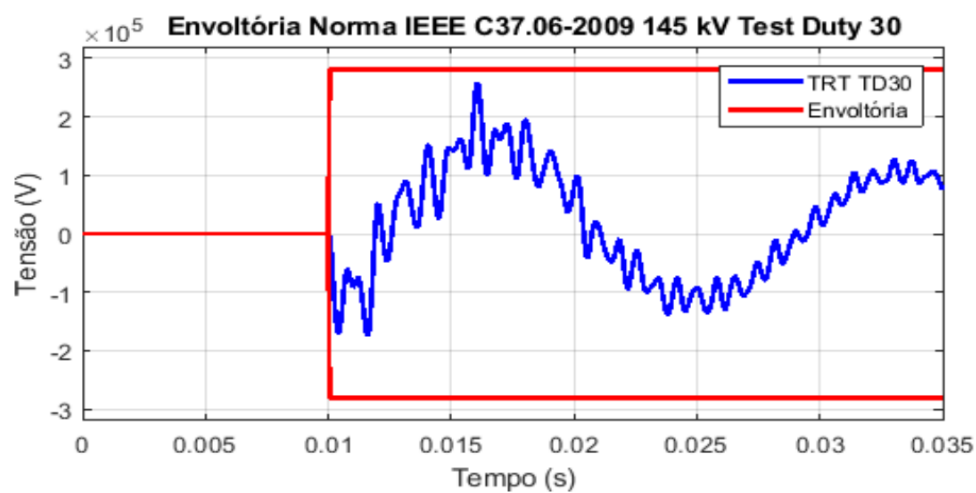
(a) Análise da TRT para o TD100.



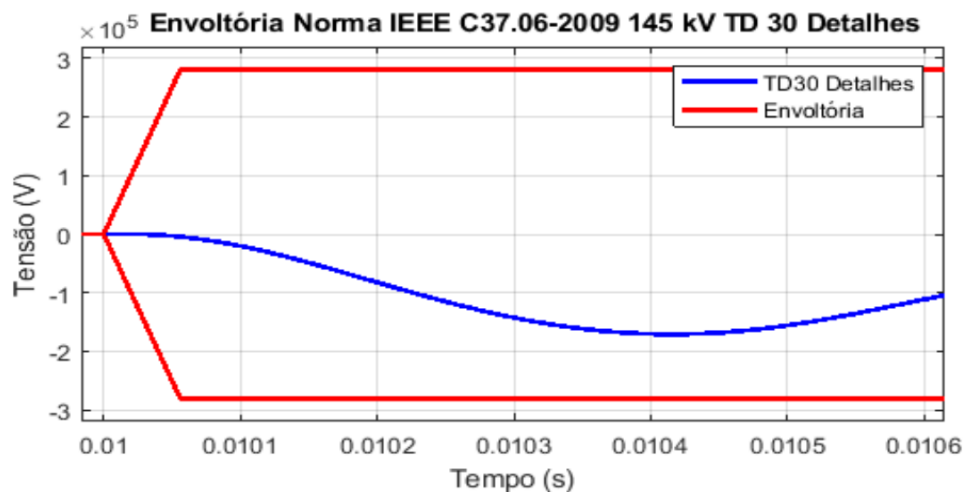
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.



Fonte: Autor.

A simulação demonstrou que a TRT ultrapassou o limite do *Test Duty* T100 definido em norma para o valor de pico da TRT e, observa-se, no detalhe dos ciclos iniciais que não houve a superação do disjuntor através da TCTRT para nenhum dos dois regimes de teste. Os valores de pico da TRT e da TCTRT correspondentes à onda e à envoltória do disjuntor 4 são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 4 da linha 4-6 para o caso 1.

Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)
Disjuntor 4 Linha 4-6	257,61	-0,434	249	2	281	5

Fonte: Autor.

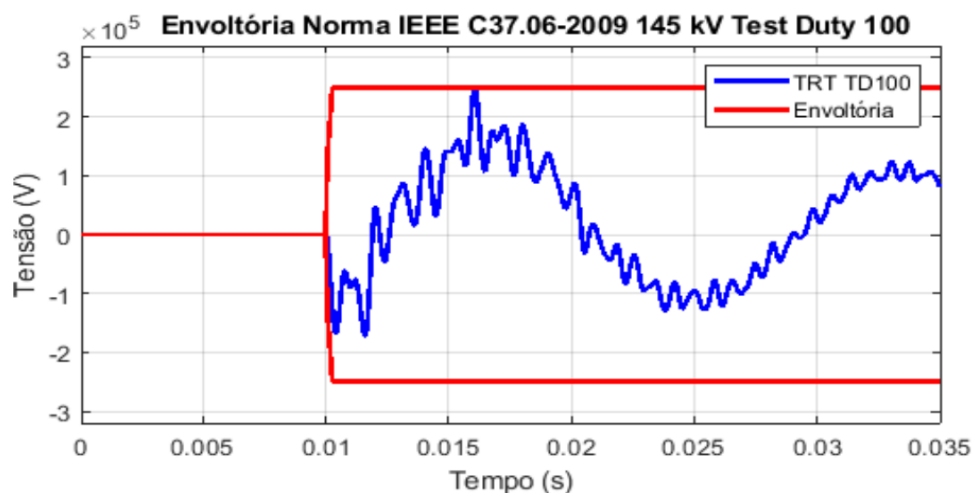
O problema relacionado a superação do disjuntor 4 por meio do valor de pico da TRT para o regime de teste T100 pode ser solucionado através de uma modificação no disjuntor de tal forma a inserir um valor de resistência durante a abertura da falta.

Como foi citado neste Trabalho, a resistência de abertura possui a finalidade de diminuir o valor de pico da onda da tensão. Para a definição de um valor da resistência para o qual a tensão torne-se adequada as curvas normalizadas, foram estipulados múltiplos cenários para essa resistência de abertura iniciando em 500 $\Omega$  até 50 $\Omega$  com um passo de 50 $\Omega$  e com um tempo de inserção de 8 ms. Conforme os resultados obtidos, a partir de 100 $\Omega$  a TRT se enquadrar nos limites referentes a norma.

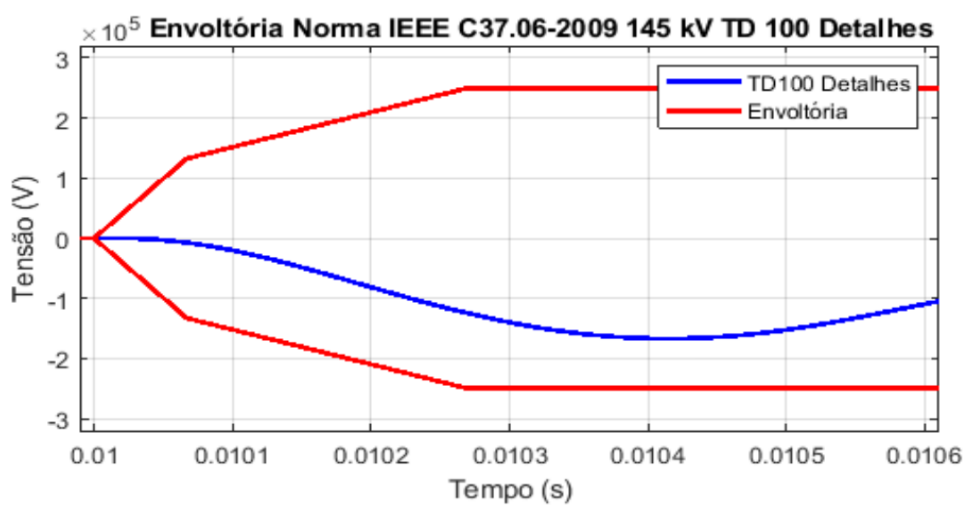
Os resultados relacionados a simulação da mitigação do valor de pico da TRT do disjuntor 4 podem ser observados a seguir na Figura 18 e Tabela 7.

Figura 18 – Análise da TRT do disjuntor 4 da linha 4-6 com uma resistência de abertura de  $100\Omega$  para o caso 1.

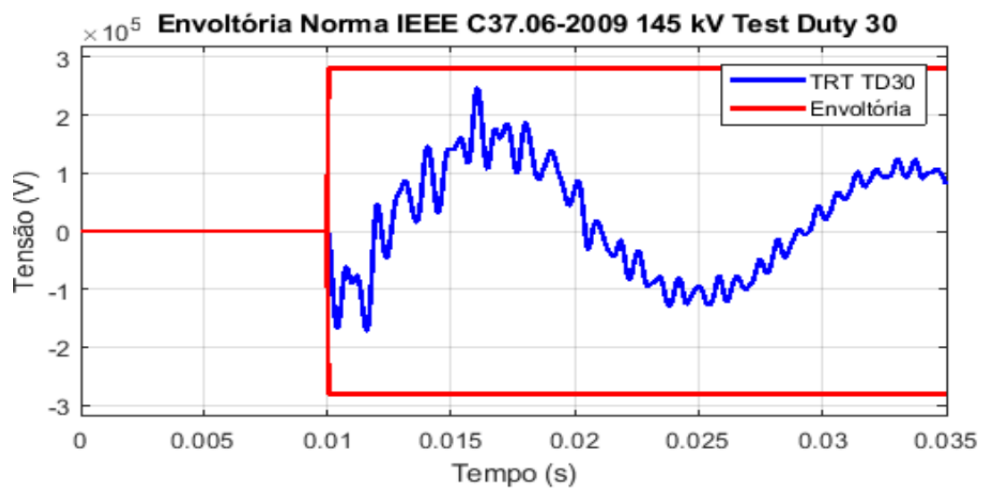
(a) Análise da TRT para o TD100 após a resistência de abertura de  $100\Omega$ .



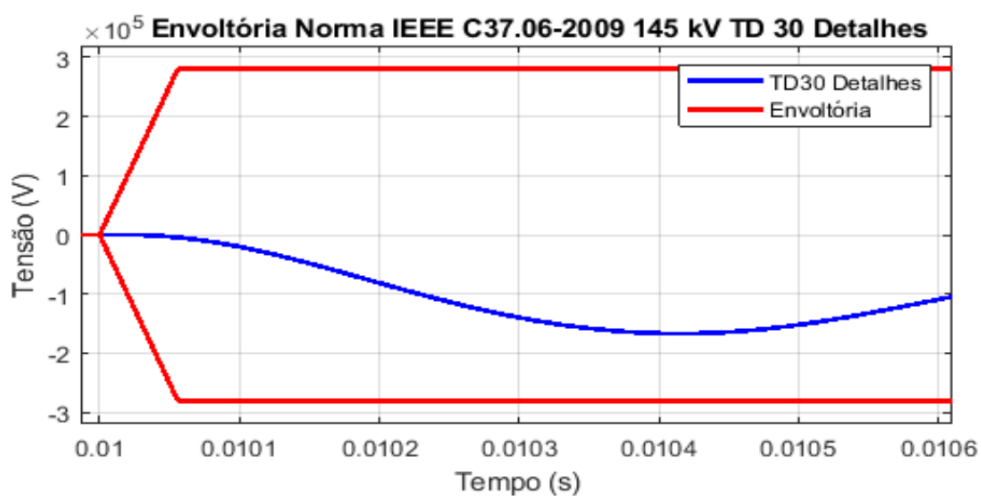
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100 após a resistência de abertura de  $100\Omega$ .



(c) Análise da TRT para o TD30 após a resistência de abertura de  $100\Omega$ .



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30 após a resistência de abertura de 100Ω.



Fonte: Autor.

Tabela 7 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 4 da linha 4-6 com uma resistência de abertura de 100Ω para o caso 1.

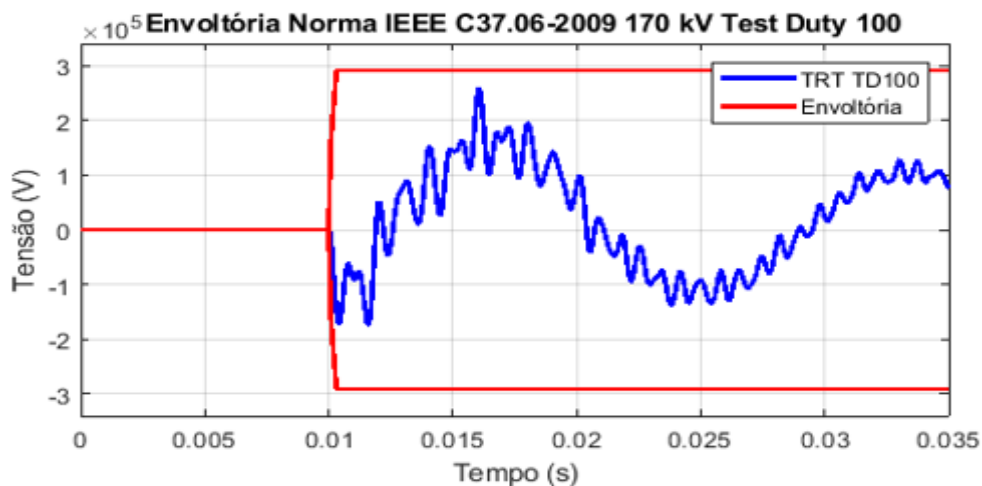
Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)
Disjuntor 4 Linha 4-6	247,07	-0,426	249	2	281	5

Fonte: Autor.

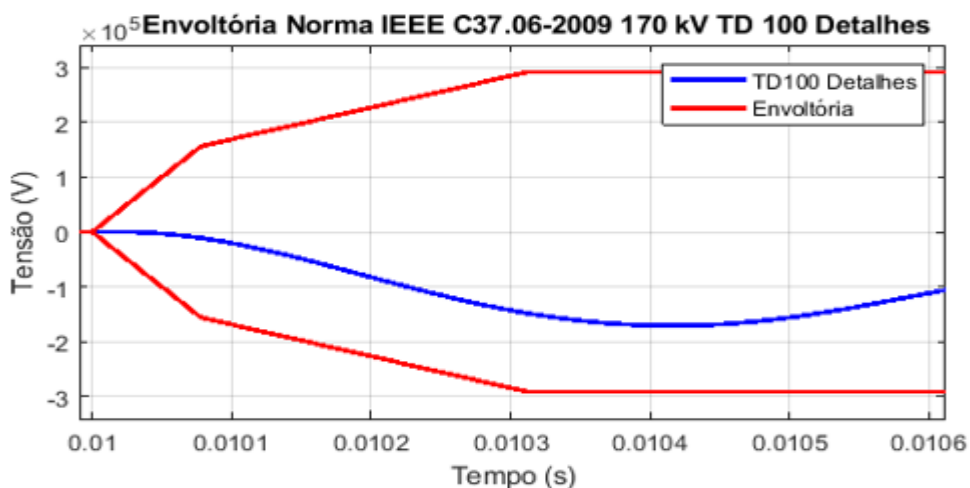
Uma outra alternativa seria utilizar um disjuntor com classe de tensão superior a 145 kV, ou seja, um disjuntor de 170 kV. Porém, isto acarretaria em um aumento de custo significativo. A Figura 19 a seguir demonstra a TRT sobre um disjuntor com nível de tensão de 170 kV com a envoltória definida por norma.

Figura 19 – TRT sobre um disjuntor com nível de tensão de 170 kV com a envoltória definida por norma.

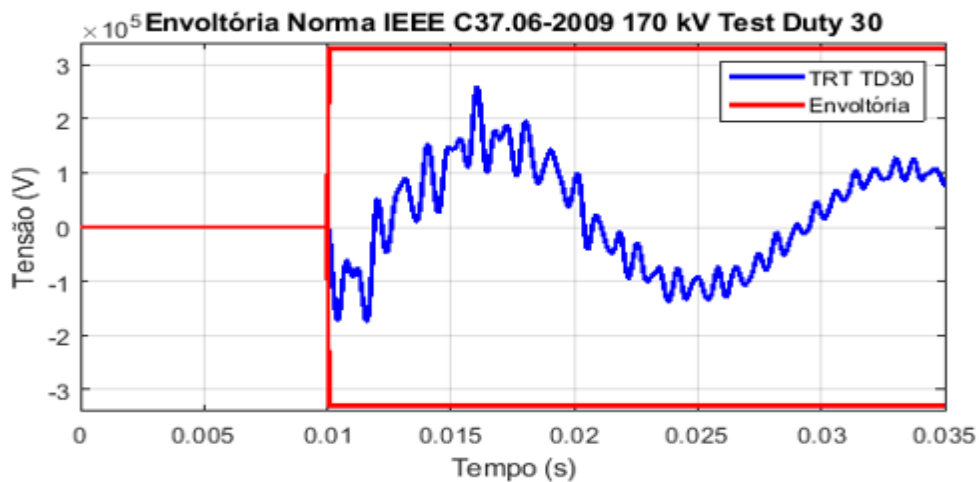
(a) Análise da TRT para o TD100.



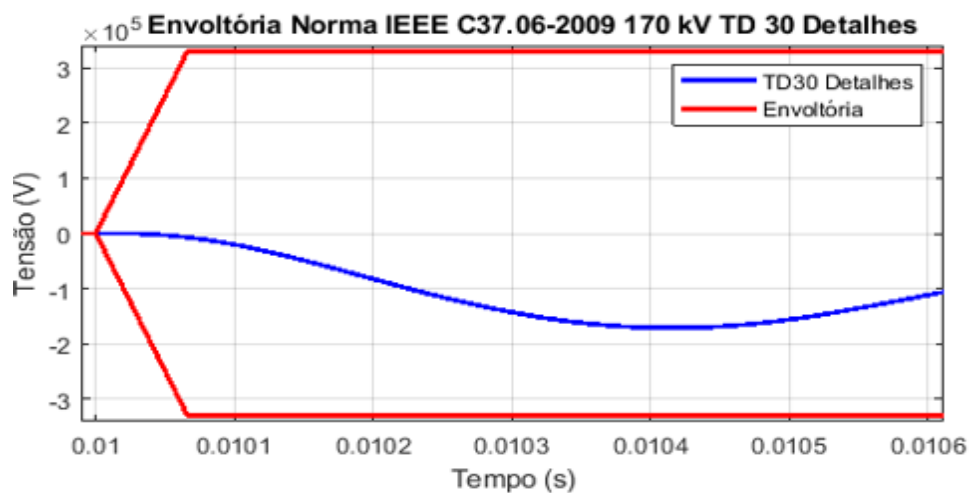
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.

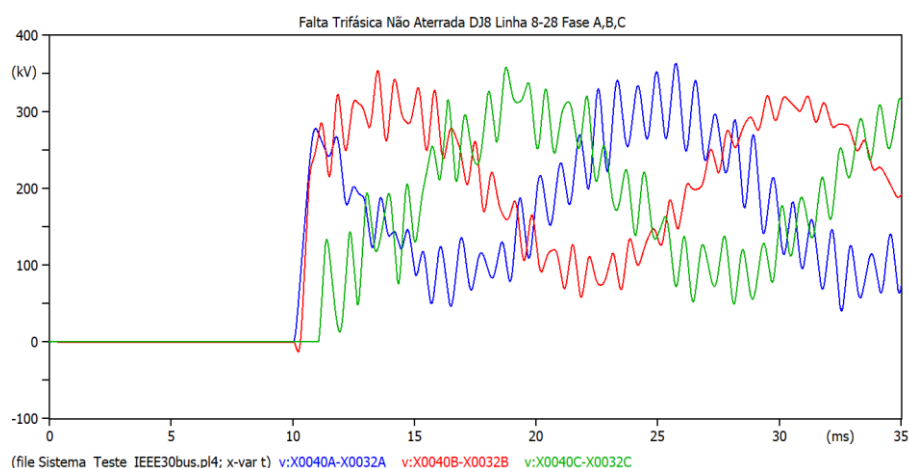


Fonte: Autor.

### 3.4.3 Linha 8-28

Nesta análise, o disjuntor 8 foi avaliado para um curto-circuito trifásico não aterrado próximo aos seus terminais. A TRT demonstrou o seu comportamento mais crítico na fase A, de acordo com a Figura 20. Portanto, esta fase será utilizada para a análise dos resultados.

Figura 20 – Formas de onda da TRT nas três fases do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1.



Fonte: Autor.

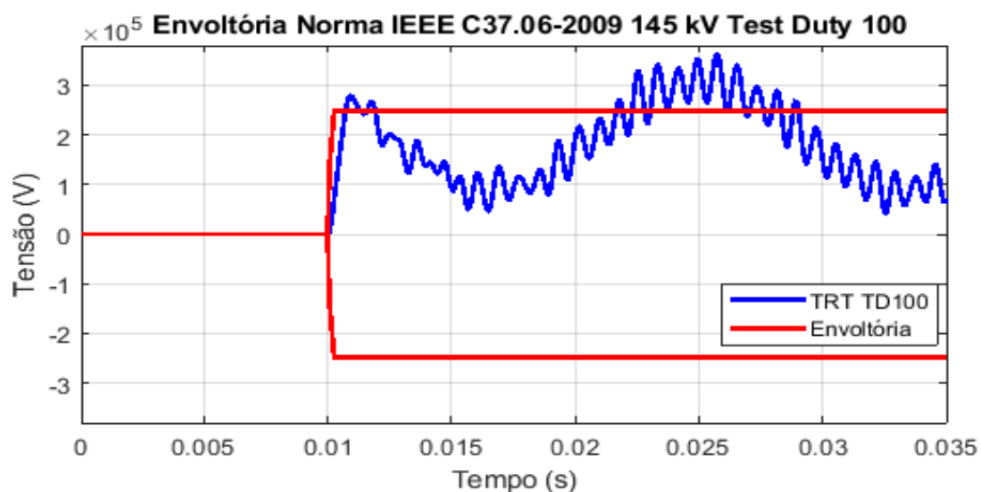
Desse modo, foi realizada a comparação da TRT com a norma que relaciona os sistemas efetivamente aterrados com a tensão de 145 kV para um curto-circuito



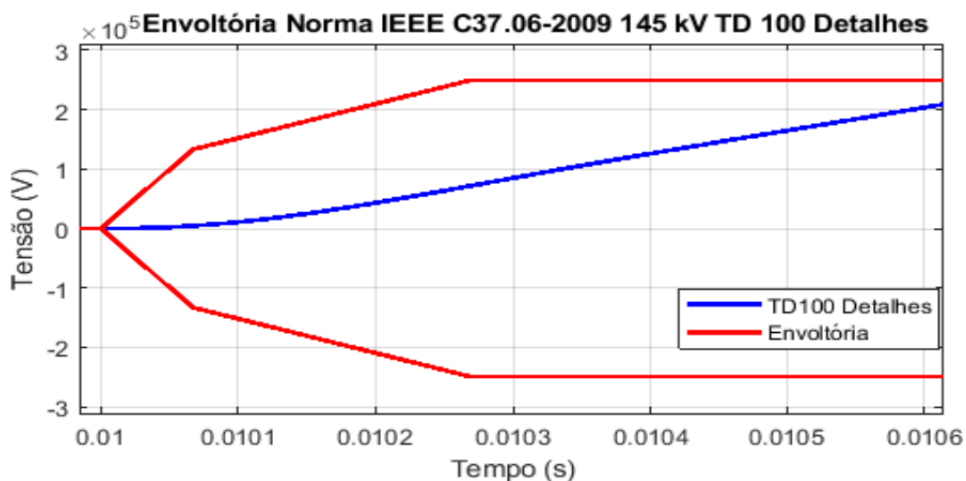
trifásico não aterrado com o regime de operação T100 e T30. A Figura 21 demonstra a TRT envolta pela norma para os *Test Duties* T100 e T30 para o disjuntor 8.

Figura 21 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1.

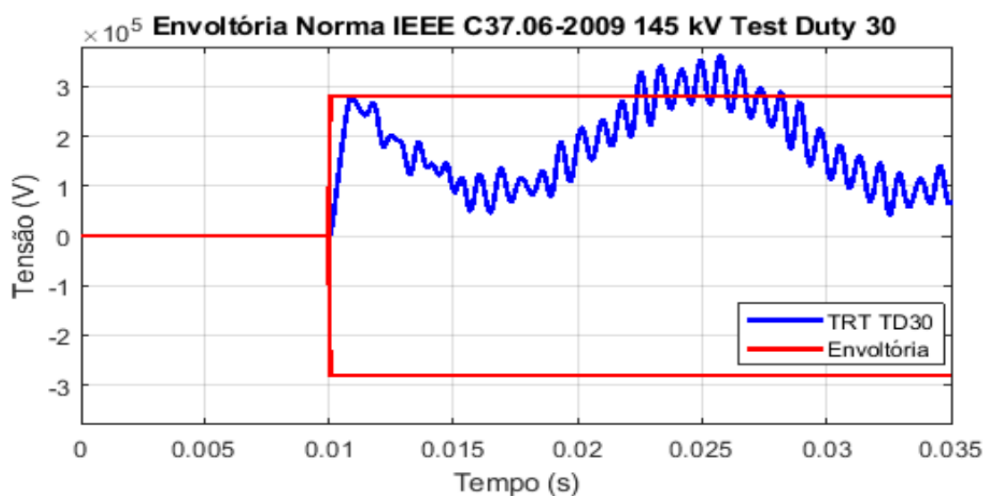
(a) Análise da TRT para o TD100.



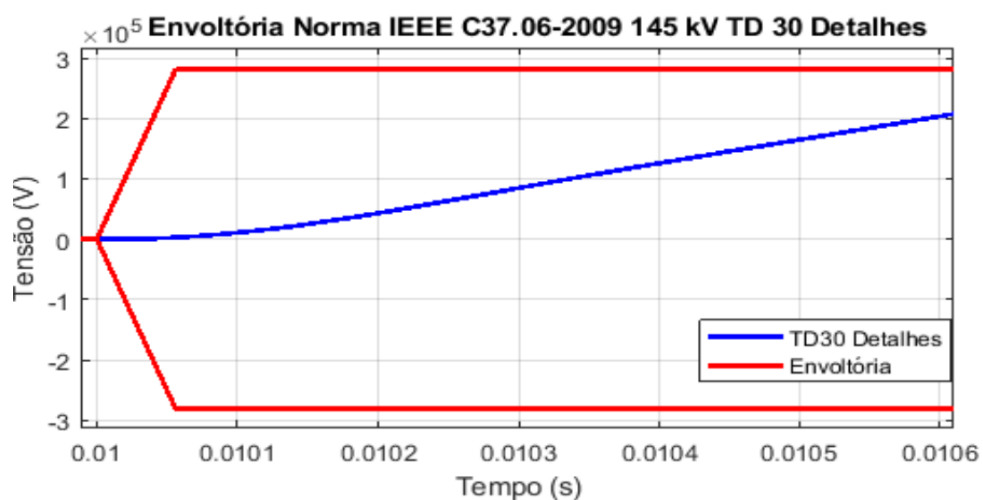
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.



Fonte: Autor.

A partir dos resultados da simulação, foi constatado que a TRT ultrapassou os limites estipulados em norma para o valor de pico da TRT para o *Test Duty* T100 e T30 e, nota-se, no detalhe dos ciclos iniciais, que não houve superação do disjuntor através da TCTRT para nenhum dos dois regimes de teste analisados. Os valores de pico da TRT e da TCTRT correspondentes à onda e à envoltória do disjuntor 8 são mostrados a seguir na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de pico da TRT e da TCTRT para o disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1.

Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)
Disjuntor 8 Linha 8-28	363,04	0,306	249	2	281	5

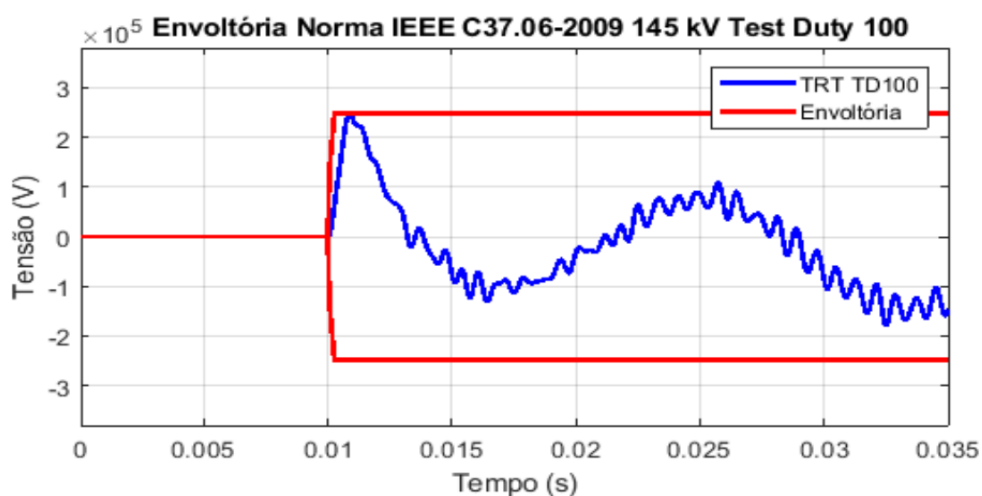
Fonte: Autor.

Para a definição de um valor da resistência de abertura referente ao disjuntor 8 de modo que a tensão se torne adequada nas curvas normalizadas, respeitando o regime de teste T100 e T30, novamente foram estipulados múltiplos cenários para essa resistência de abertura iniciando em  $500\Omega$  até  $50\Omega$  com um passo de  $50\Omega$  e com um tempo de inserção de 8 ms. De acordo com os resultados obtidos, a partir de  $50\Omega$  a TRT se enquadrou nos limites relacionados a norma.

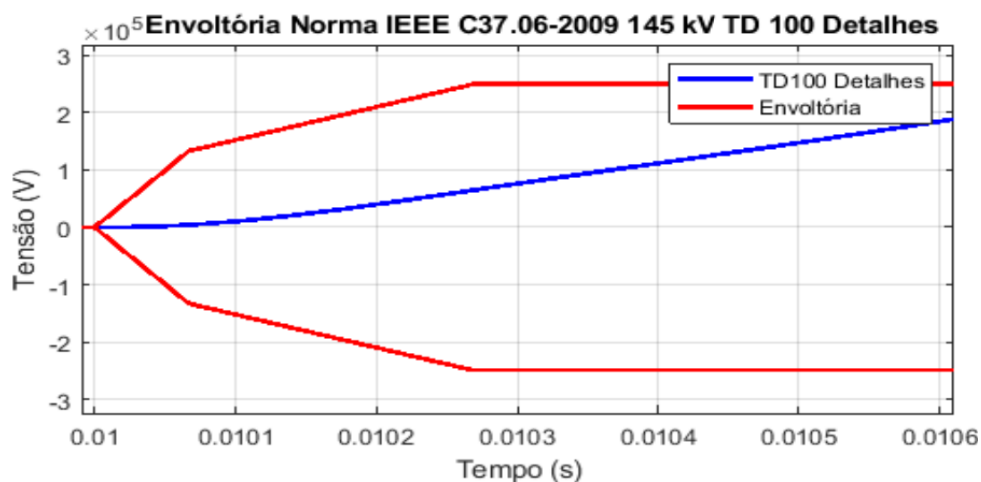
Os resultados referentes a simulação da mitigação do valor de pico da TRT do disjuntor 8 podem ser observados a seguir na Figura 22 e Tabela 9.

Figura 22 – Análise da TRT do disjuntor 8 da linha 8-28 com uma resistência de abertura de  $50\Omega$  para o caso 1.

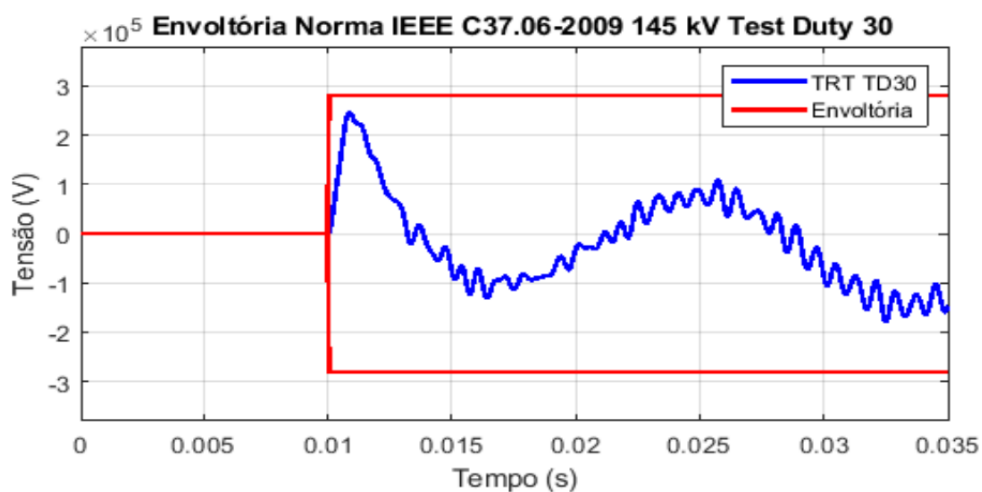
(a) Análise da TRT para o TD100 após a resistência de abertura de  $50\Omega$ .



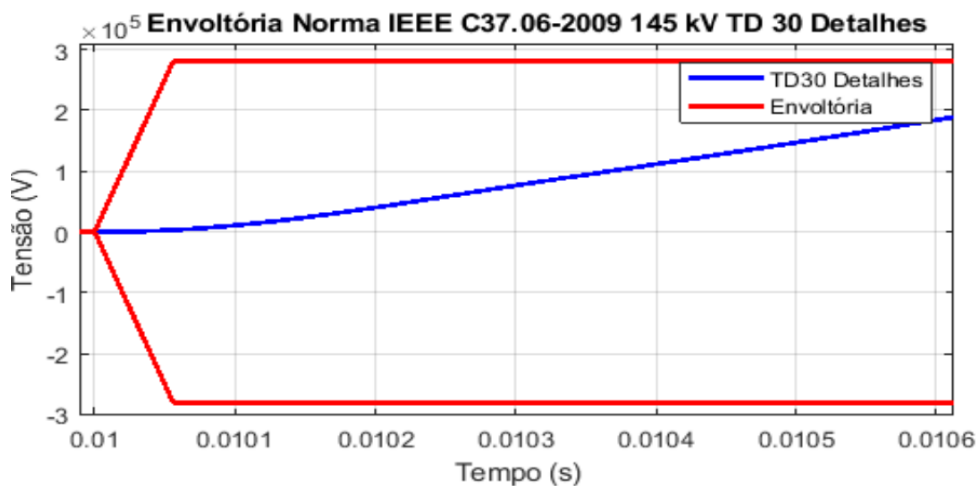
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100 após a resistência de abertura de 50Ω.



(c) Análise da TRT para o TD30 após a resistência de abertura de 50Ω.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30 após a resistência de abertura de 50Ω.



Fonte: Autor.

Tabela 9 – Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 8 da linha 8-28 com uma resistência de abertura de  $50\Omega$  para o caso 1.

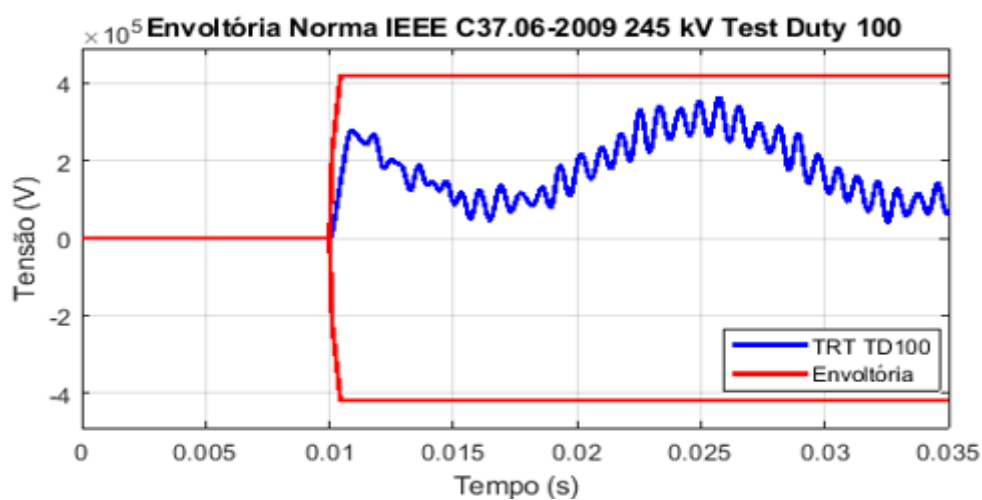
Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)
Disjuntor 8 Linha 8-28	245,34	0,284	249	2	281	5

Fonte: Autor.

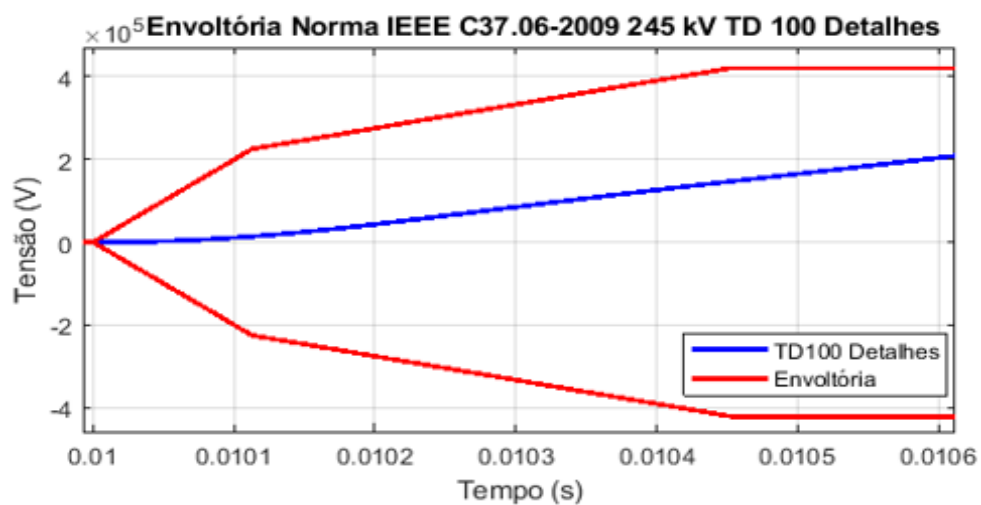
Uma outra opção seria utilizar um disjuntor com classe de tensão superior a 145 kV, neste caso, um disjuntor de 245 kV. Entretanto, isto implicaria em um aumento de custo considerável. A Figura 23 a seguir demonstra a TRT analisada sobre um disjuntor com nível de tensão de 245 kV com a envoltória estipulada por norma.

Figura 23 – TRT sobre um disjuntor com nível de tensão de 245 kV com a envoltória definida por norma.

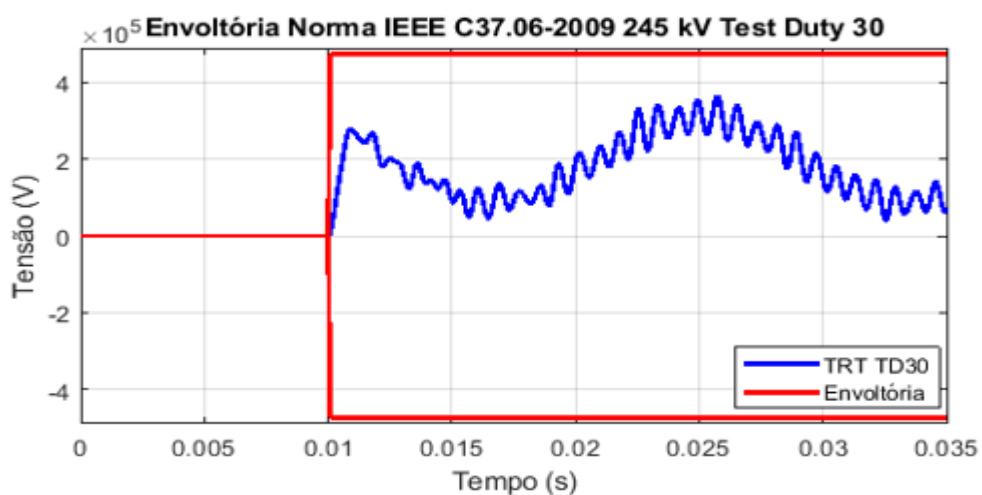
(a) Análise da TRT para o TD100.



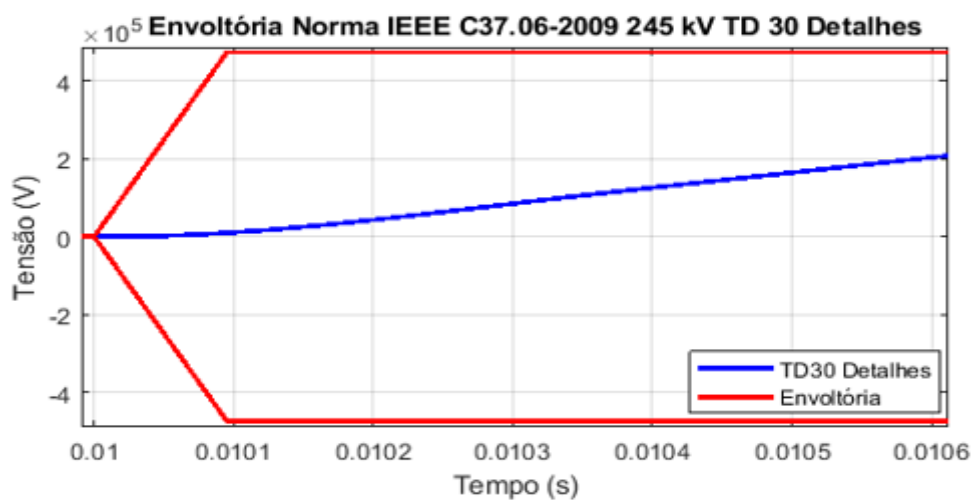
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.



Fonte: Autor.

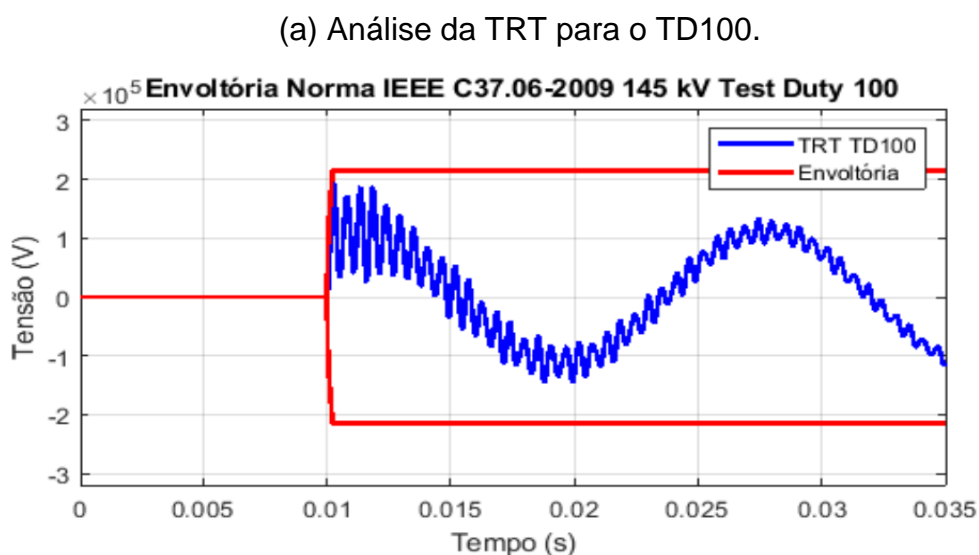
### 3.5 Caso 2: Curto-Circuito Fase-Terra em 50% da Linha

Nesse caso, a simulação foi realizada a partir de um curto-circuito fase-terra na metade da linha, avaliando um dos disjuntores localizados na extremidade da linha. Para o disjuntor escolhido, foi analisada a TRT para as capacidades de interrupção T100 e T30 mencionadas na norma. Os resultados de cada linha podem ser observados a seguir.

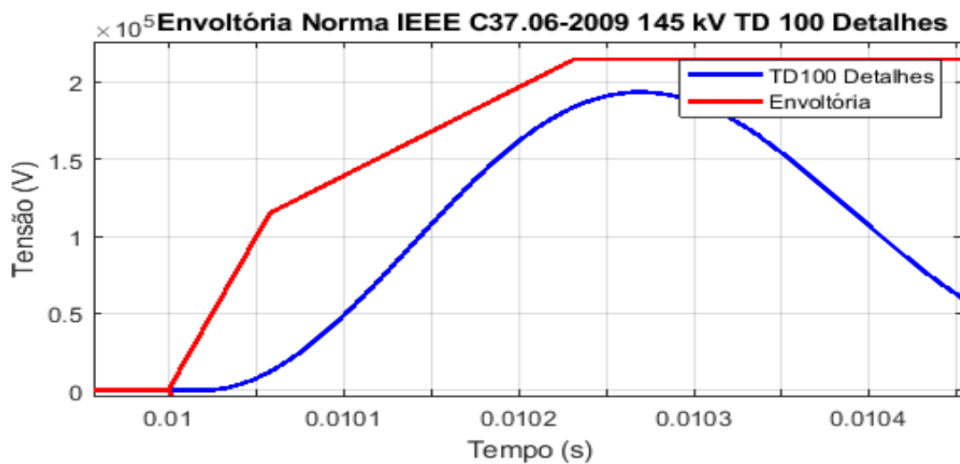
#### 3.5.1 Linha 2-4

O disjuntor 4 localizado na extremidade da linha 4 foi analisado para um curto-circuito fase-terra na metade da linha. Foi realizada a comparação da TRT com a norma que relaciona os sistemas efetivamente aterrados à tensão de 145 kV para um curto-circuito fase-terra com *Test Duty* 100 e *Test Duty* 30. A Figura 24 apresenta a TRT envolva pela norma para os *Test Duties* T100 e T30 para o disjuntor 4.

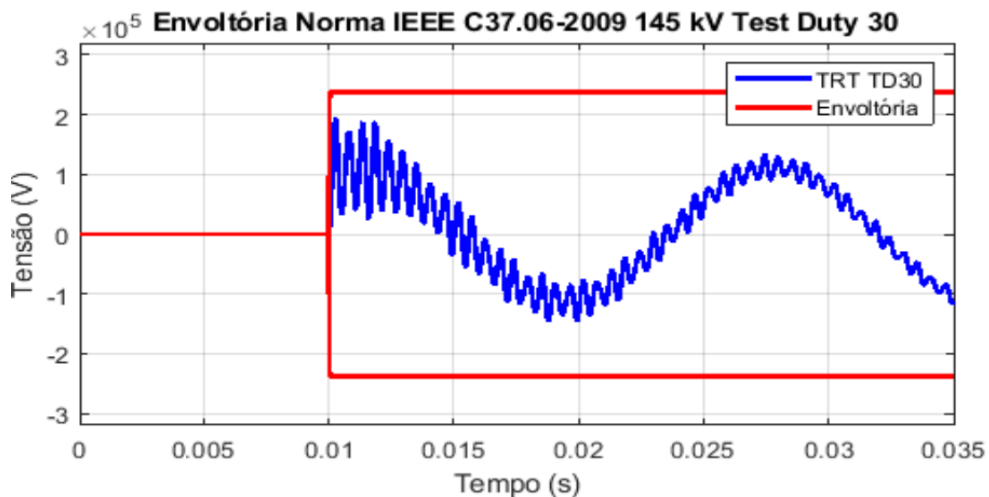
Figura 24 – Análise de superação do disjuntor 4 da linha 2-4 para o caso 2.



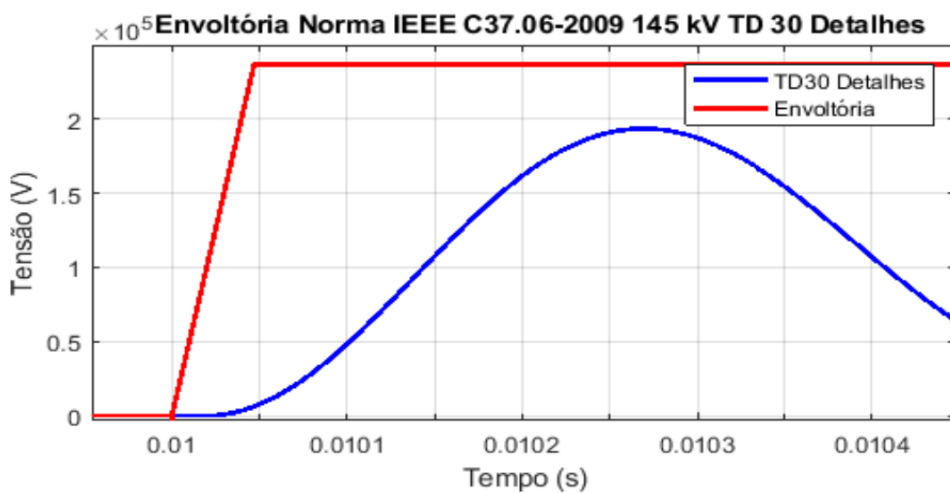
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.



Fonte: Autor.



A simulação demonstrou que a TRT não ultrapassou os limites definidos em norma para o valor de pico da TRT para nenhum dos dois regimes de teste e também, nota-se, no detalhe dos ciclos iniciais, que não houve superação do disjuntor por meio da TCTRT.

Os valores de pico da TRT e da TCTRT correspondentes à onda e à envoltória do disjuntor 4 são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 4 da linha 2-4 para o caso 2.

Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)
Disjuntor 4 Linha 2-4	193,45	0,78	215	2	237	5

Fonte: Autor.

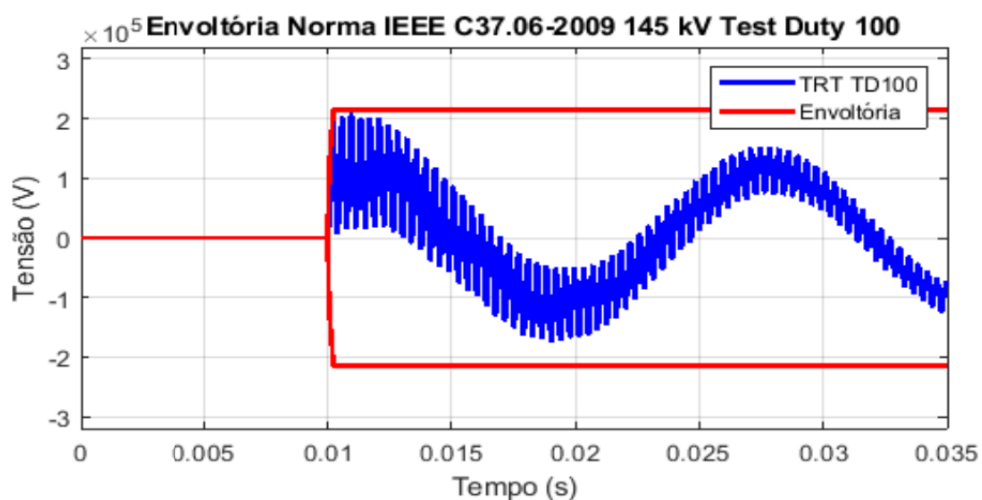
Neste caso, como apresentado na Tabela 10, a TRT não excedeu os limites definidos por norma para o disjuntor 4. Portanto, nenhuma alteração foi proposta ao sistema.

### 3.5.2 Linha 1-3

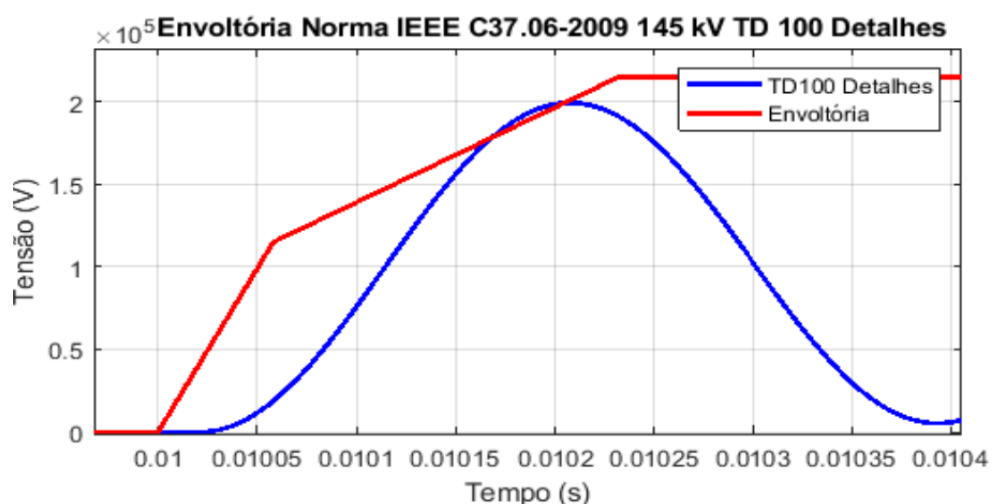
Para a análise da TRT no disjuntor 3, novamente, foi aplicado um curto-circuito fase-terra na metade da linha avaliada. Então, foi empregue a comparação da TRT com a norma que relaciona os sistemas efetivamente aterrados à tensão de 145 kV para um curto-circuito fase-terra com os regimes de teste T100 e T30. A seguir, a Figura 25 apresenta a TRT envolta pela norma para os *Test Duties* T100 e T30 para o disjuntor 3.

Figura 25 – Análise de superação do disjuntor 3 da linha 1-3 para o caso 2.

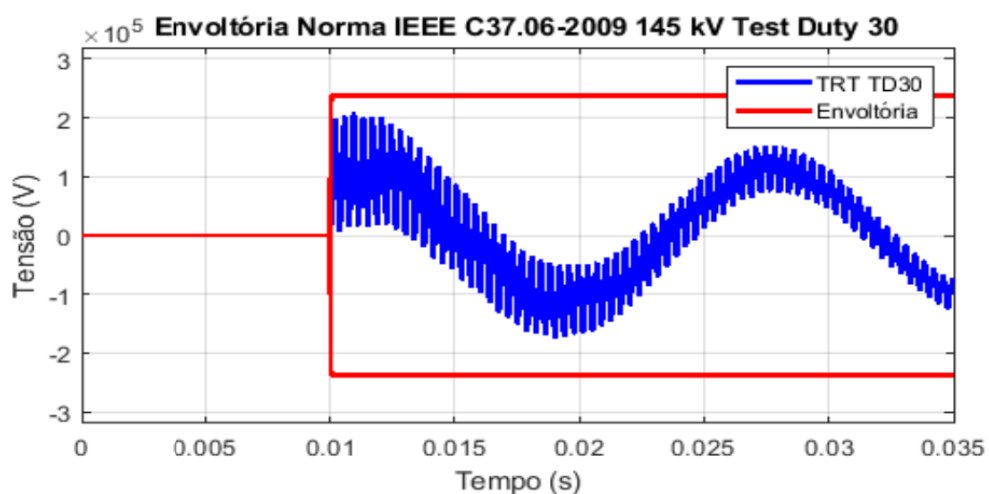
(a) Análise da TRT para o TD100.



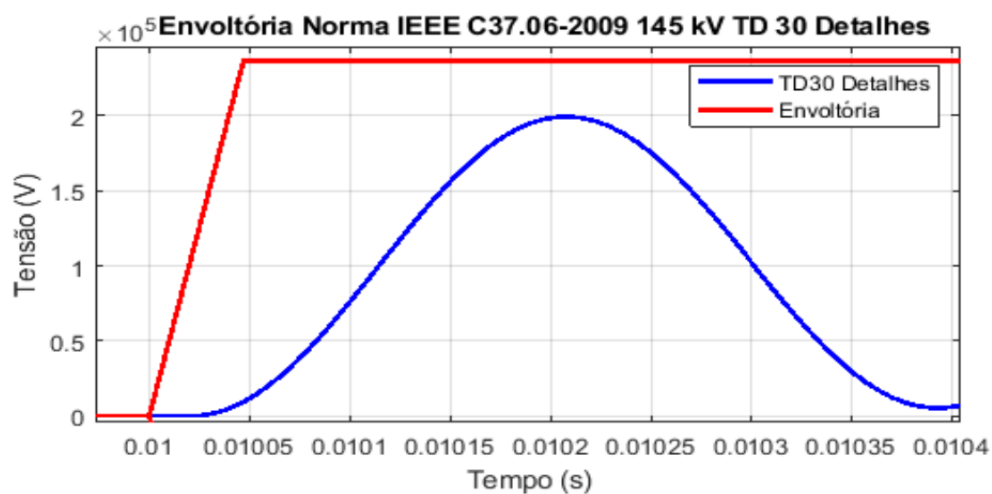
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.



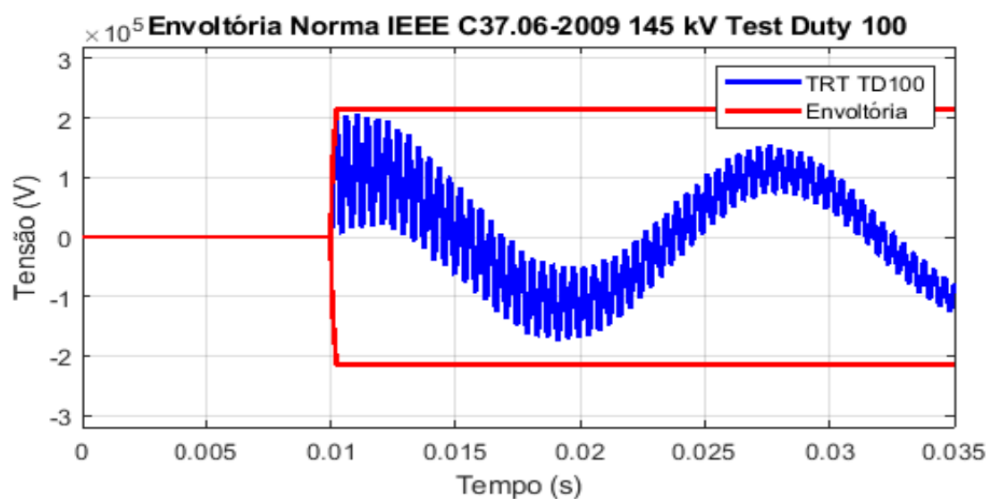
Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Figura 25, a simulação demonstrou que a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória ultrapassou os limites definidos em norma para o *Test Duty* T100. Nota-se também que o valor de pico da TRT não superou os valores estipulados em norma.

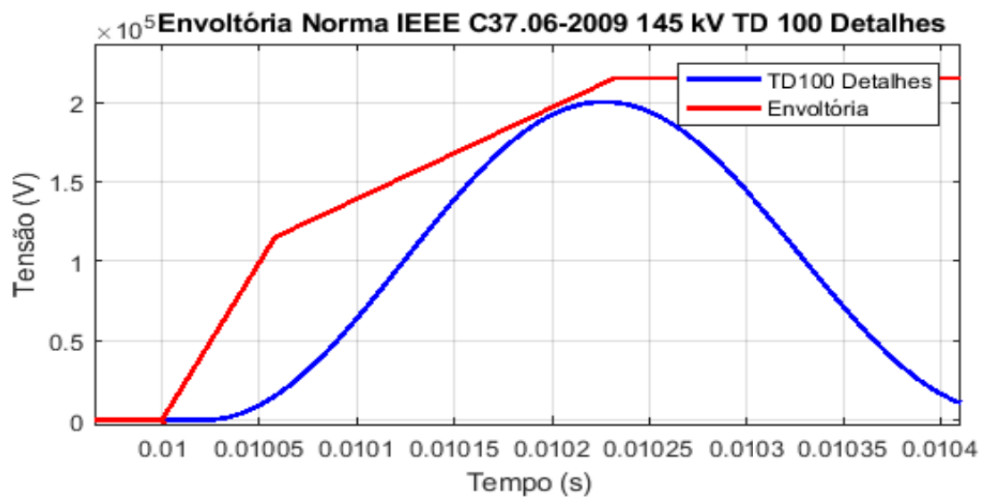
Para solucionar o problema relacionado à superação de TCTRT para o disjuntor 3, foram adicionadas células de surto capacitivas no valor de 2  $\mu\text{F}$  ao terminal do disjuntor correspondente ao lado da linha para reduzir a TCTRT e fazer com que a TRT se enquadre dentro da envoltória definida por norma. Os resultados relacionados à simulação da mitigação da TCTRT do disjuntor 3 após a adição das células de surto capacitivas no valor de 2  $\mu\text{F}$  podem ser visualizados a seguir na Figura 26 e Tabela 11.

Figura 26 – Análise da TRT do disjuntor 3 da linha 1-3 após a adição das células de surto capacitivas no valor de  $2 \mu\text{F}$  para o caso 2.

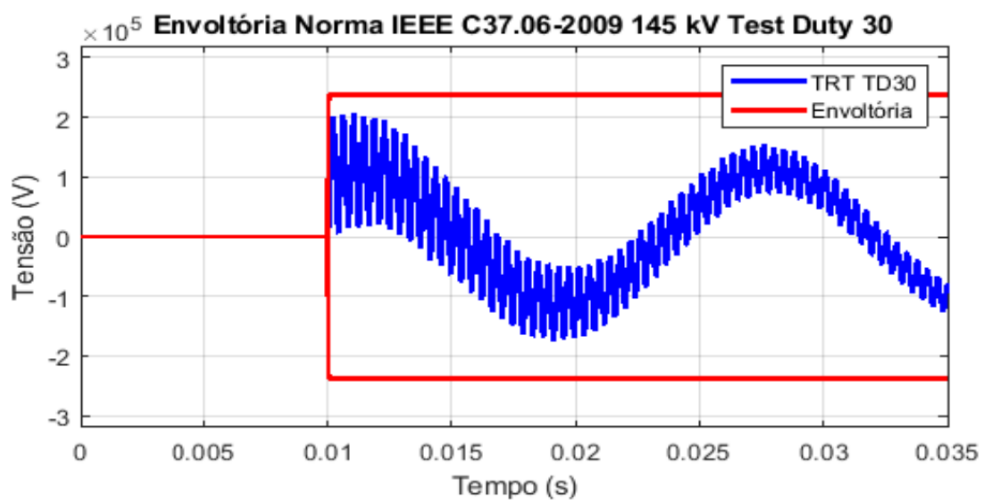
(a) Análise da TRT para o TD100 após as células de surto capacitivas de  $2 \mu\text{F}$ .



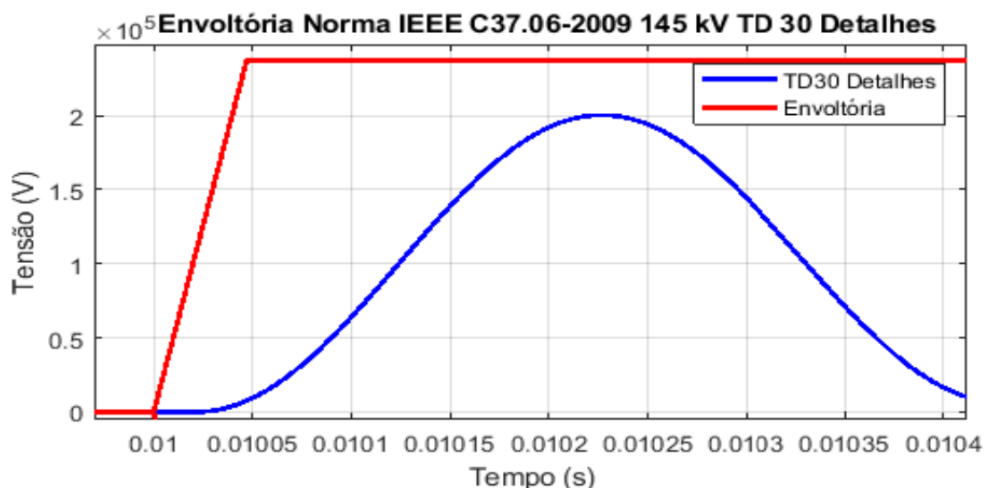
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100 após as células de surto capacitivas de  $2 \mu\text{F}$ .



(c) Análise da TRT para o TD30 após as células de surto capacitivas de 2  $\mu\text{F}$ .



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30 após as células de surto capacitivas de 2  $\mu\text{F}$ .



Fonte: Autor.

Tabela 11 – Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 3 da linha 1-3 após a adição das células de surto capacitivas no valor de 2  $\mu\text{F}$  para o caso 2.

Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu\text{s}$ )	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu\text{s}$ )	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu\text{s}$ )
Disjuntor 3 Linha 1-3	208,66	0,981	215	2	237	5

Fonte: Autor.

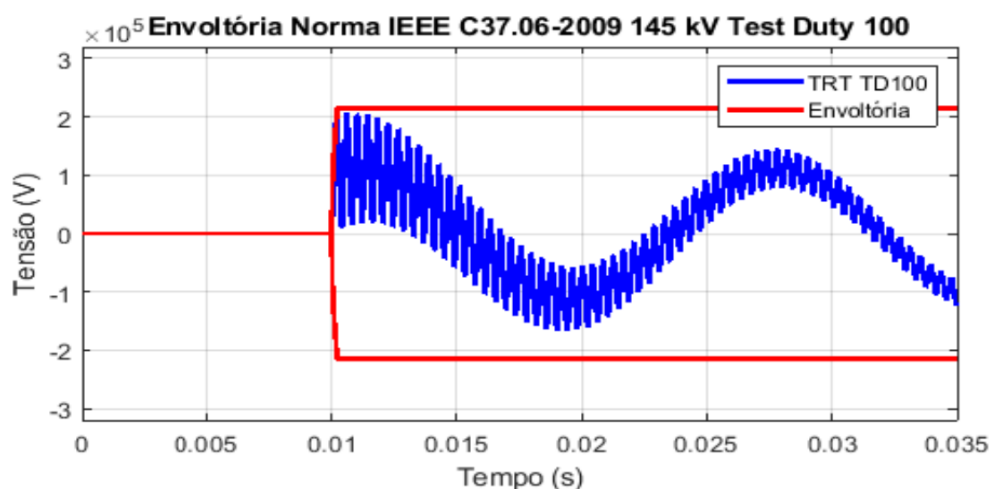
Observa-se que após as modificações apresentadas, os valores encontrados na simulação da TRT para o disjuntor 3 se adequaram nos valores definidos em norma para os regimes de teste T100 e T30.

### 3.5.3 Linha 6-7

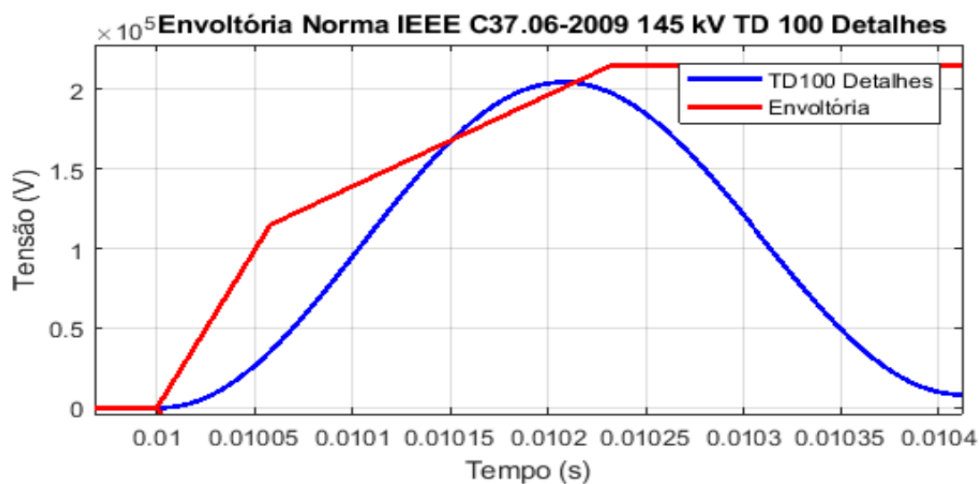
Nesta análise, o disjuntor 6, foi avaliado para um curto-circuito fase-terra definido na metade da linha. Diante disso, foi realizada a comparação da TRT com a norma que relaciona os sistemas efetivamente aterrados à tensão de 145 kV para um curto-circuito fase-terra com os regimes de teste T100 e T30. A Figura 27 a seguir exibe o resultado da simulação da TRT envolta pela norma para os *Test Duties* T100 e T30 para o disjuntor 6.

Figura 27 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-7 para o caso 2.

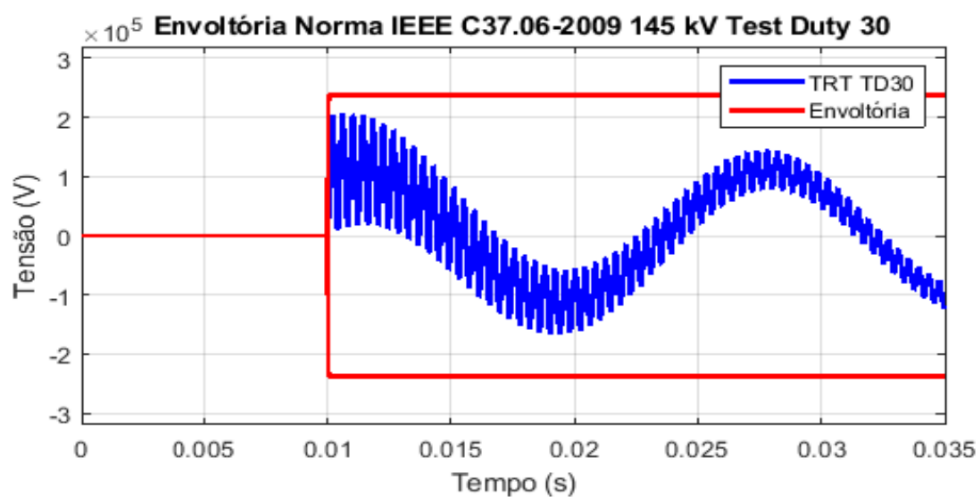
(a) Análise da TRT para o TD100.



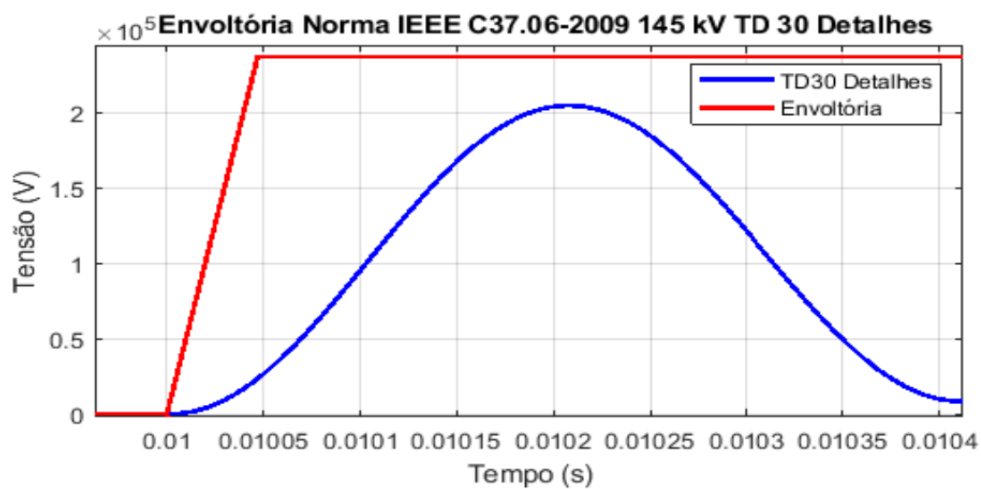
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100.



(c) Análise da TRT para o TD30.



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30.



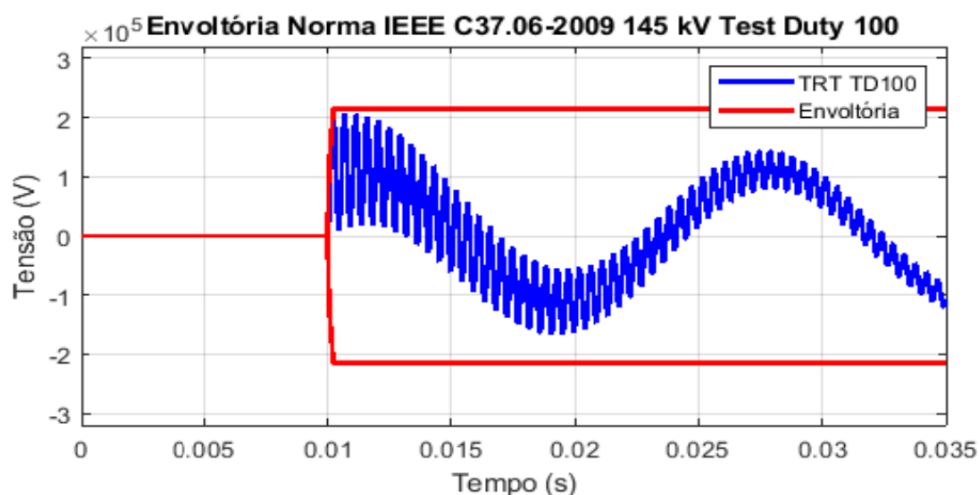
Fonte: Autor.

Observa-se por meio dos resultados da simulação que a TRT não ultrapassou os limites definidos em norma para o valor de pico da TRT para os dois regimes de teste analisados. Entretanto, nota-se, no detalhe dos ciclos iniciais, que houve a superação do disjuntor através da TCTRT para o *Test Duty* T100.

Com o intuito de mitigar o problema referente à superação da TCTRT para o disjuntor 6, foram adicionadas células de surto capacitivas no valor de  $5\ \mu\text{F}$  ao terminal do disjuntor correspondente ao lado da linha para reduzir a TCTRT e fazer com que a TRT se enquadrasse dentro da envoltória definida por norma. Os resultados correspondentes a simulação da TRT do disjuntor 6 após a adição das células de surto capacitivas no valor de  $5\ \mu\text{F}$  são exibidos a seguir na Figura 28 e Tabela 12.

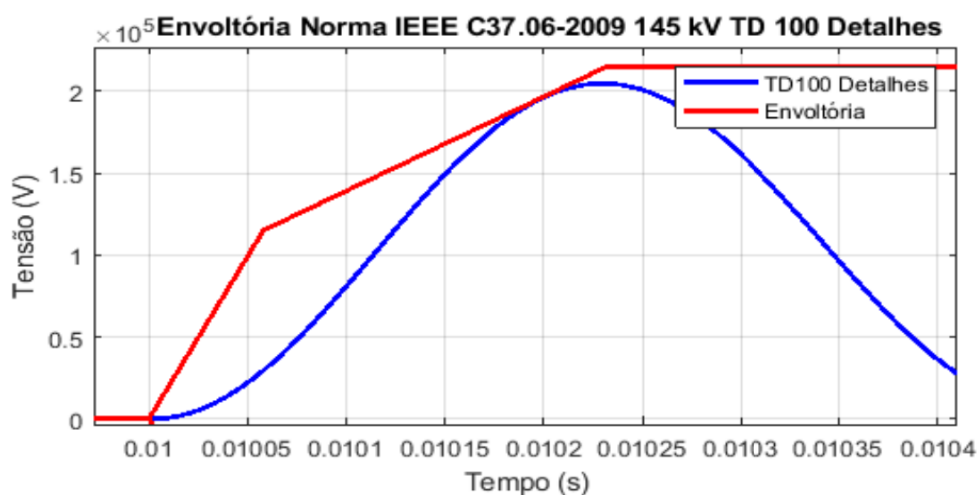
Figura 28 – Análise da TRT do disjuntor 6 da linha 6-7 após a adição das células de surto capacitivas no valor de  $5\ \mu\text{F}$  para o caso 2.

(a) Análise da TRT para o TD100 após as células de surto capacitivas de  $5\ \mu\text{F}$ .

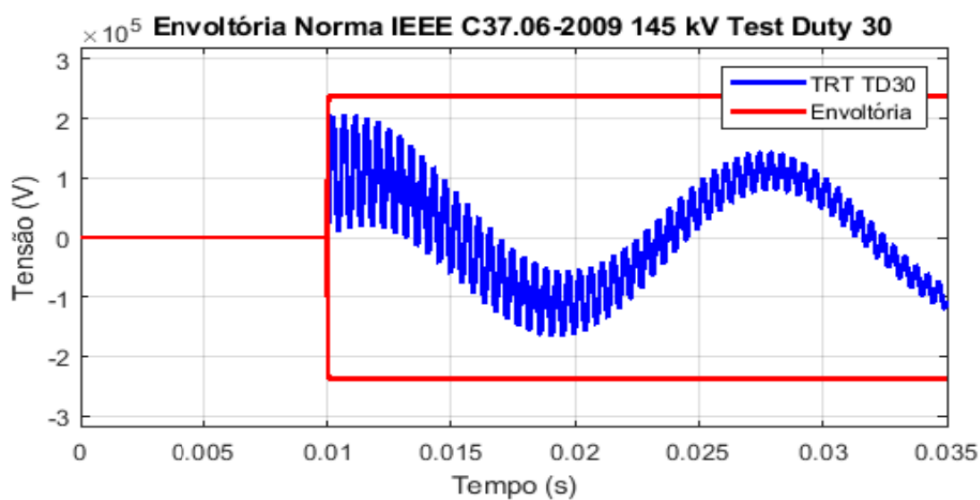




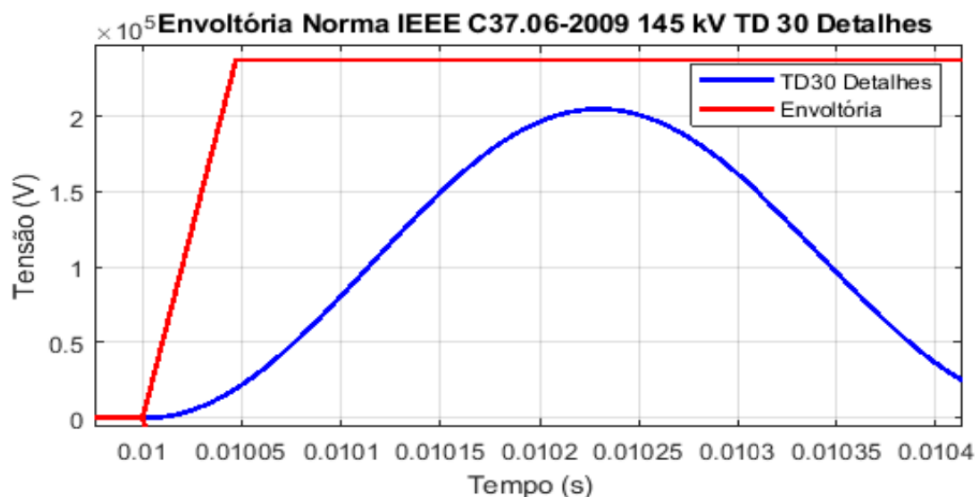
(b) Detalhes da TCTRT para o TD100 após as células de surto capacitivas de 5  $\mu\text{F}$ .



(c) Análise da TRT para o TD30 após as células de surto capacitivas de 5  $\mu\text{F}$ .



(d) Detalhes da TCTRT para o TD30 após as células de surto capacitivas de 5  $\mu\text{F}$ .



Fonte: Autor.

Tabela 12 – Valores de pico da TRT e TCTRT para o disjuntor 6 da linha 6-7 após a adição das células de surto capacitivas no valor de 5  $\mu$ F para o caso 2.

Equipamento	Simulação		Norma IEEE TD100		Norma IEEE TD30	
	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	TCTRT (kV/ $\mu$ s)
Disjuntor 6 Linha 6-7	207,15	0,901	215	2	237	5

Fonte: Autor.

Como se pode perceber, após as modificações apresentadas, os valores encontrados na simulação da TRT para o disjuntor 6 respeitaram os valores estipulados em norma.

### 3.6 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentadas as simulações do sistema teste IEEE 30-barras para as análises de mitigação da superação de disjuntores de alta tensão por meio da TRT. Através do *software* ATP, foram analisados os efeitos da TRT em curtos-circuitos trifásicos não aterrados e fase terra nos disjuntores do sistema teste, para os *Test Duty* T100 e T30, com os seus respectivos resultados comparados às envoltórias da norma IEEE C37.06-2009. Além disso, também foram aplicadas medidas mitigadoras para os disjuntores superados. Resistores de abertura foram utilizados para reduzir o valor de pico da TRT e células de surto capacitivas foram empregadas para minimizar o efeito da taxa de crescimento da TRT.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de caso sobre métodos mitigadores para a redução da TRT em disjuntores de alta tensão. Foi elaborada a fundamentação teórica acerca do fenômeno transitório da TRT e dos parâmetros a serem utilizados na análise de superação dos disjuntores de alta tensão do sistema teste estudado. Também, foram realizadas simulações de curtos-circuitos em diferentes partes do sistema através de simulações com o auxílio do *software* ATP, comparando os resultados obtidos com as envoltórias e com a capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito (*Test Duty*) para os testes T100 e T30 da norma IEEE C37.06-2009.

A partir dos resultados obtidos através das simulações, foram evidenciados quais disjuntores foram superados mediante a TRT, e, então, diante dos resultados, foram apresentados métodos mitigadores para a solução do problema. Tais medidas fundamentam-se na utilização de resistores de abertura e de células de surto capacitivas na redução de sobretensões transitórias ocasionadas pelos curtos-circuitos nas linhas de transmissão.

Na análise da mitigação do valor de pico da TRT, a partir de curtos-circuitos trifásicos não aterrados próximo ao disjuntor, resistores de abertura foram introduzidos em paralelo com a câmara principal do disjuntor superado. Os resultados das análises digitais por meio do *software* ATP comprovaram a eficácia do limitador de tensão proposto. Por fim, o cenário de mitigação da taxa de crescimento da TRT, provocadas por curtos-circuitos fase-terra quilométricos, a aplicação de células de surto capacitivas reduziu as taxas de crescimento da TRT à valores que se enquadraram diante da norma, mostrando-se mais eficiente a sua localização nos terminais do disjuntor situado no lado da carga.

### 4.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para a realização de futuros trabalhos.

- Simulação de superação de disjuntores de alta tensão por TRT para casos reais;
- Simular o mesmo sistema para diferentes tipos de falta;
- Investigação de outros tipos de dispositivos mitigadores de TRT.

## REFERÊNCIAS

ALVES, F. R. **Características do Disjuntor para Abertura de Linhas de Transmissão em Vazio – Metodologia de Estudo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, 2006.

ALVES, Rimon. **Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)**, Monografia, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

ALI R. Al-Roomi. **Power Flow Test Systems Repository**. Nova Scotia, Canada: Dalhousie University, Electrical and Computer Engineering, 2015. Disponível em <<https://www.al-roomi.org/power-flow/30-bus-system>>. Último Acesso em fevereiro de 2022.

ARANTES, Ivan. **Tecnologia de Chaveamento com Disjuntores de Média e Alta Tensão**. Monografia, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2015.

AZEVÊDO, Wilker Victor. **Contribuições para Análise e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória**. Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2010.

AZEVÊDO, Wilker Victor; NEVES, Washington Luiz; FERNANDES, Damásio; SOUZA, Benemar. **Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória: Discussão de Medidas e Avanços**. Artigo Acadêmico, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2010.

AZEVÊDO, Wilker Victor; NEVES, Washington Luiz; FERNANDES, Damásio; SOARES, Ricardo; FORMIGA, Danielly. **Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Média e Alta Tensão Devido às Solicitações de TRT – Procedimentos e Medidas Mitigadoras**. Artigo Acadêmico, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2010.

COLCLASER, R. G.; BERKEBILE, L. E.; BUETTNER, D. E.; **“The Effect of Capacitors on the Short-Line Fault Component of Transient Recovery Voltage”**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-90, n.2, March/April, 1971.

CARVALHO, Antonio C; SINDER, Daniel; MUNIZ, Mauro; MONTEIRO, Andréia M.; e SILVA, Benedito A. **Superação de Equipamentos de Alta Tensão: Critérios de Análise e Processo de Indicações de Substituições na Rede Básica e Demais**

**Instalações da Transmissão.** Seminário Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XIX SNPTEE), Rio de Janeiro, RJ, 14 a 17 de outubro de 2007.

D'AJUZ, A., FONSECA, C. S., CARVALHO, F. M. S., AMON FILHO, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., ESMERALDO, P. C. V., VAISMAN, R., FRONTIN, S. O.. **Transitórios Elétricos e Coordenação do Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão.** FURNAS - UFF, 1987.

IEC International Std. 62271-100. **High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers.** Geneva, Switzerland, 2008.

IEEE Std. C37.011™-2005. **Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers.** New York, NY, USA, 2005.

IEEE Std. C37.06™-2009. **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, NY, USA, 2009.

Leuven EMTP Center, ATP. **Alternative Transients Program Rule Book.** Belgium, July, 1987.

LIMA, Jeferson. **Análise da Superação da Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores de Alta Tensão no Sistema-Teste IEEE 30-Barras: Um Estudo de Caso.** Monografia, UNIPAMPA, Alegrete, RS, Brasil, 2021.

MELO, Luiz. **Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória: Avaliação e Medidas Mitigadoras.** Monografia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2010.

NOBRE, D. M. **Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT.** Dissertação de Mestrado, UFPB. Campina Grande, novembro de 1999.

OLIVEIRA PRETO, Patricia. **Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil, 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Critérios Para Análise de Superação de Equipamentos e Instalações de Alta Tensão.** Nota Técnica ONS nº 0048/2014. Brasil, 2014.

PADILHA, Fernando. **Método de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores de Alta Tensão Utilizando a Impedância Equivalente do Sistema.** Monografia, UNIPAMPA, Alegrete, RS, Brasil, 2020.

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

RODRIGUES, Ana. **Tensão de Restabelecimento Transitória em Disjuntores de Alta Tensão.** Monografia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2018.

SAMPAIO, André. **Consolidação de Material Didático para a Disciplina de Equipamentos Elétricos – Disjuntores.** Monografia, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

SINDER, Daniel. **Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão.** Dissertação de Mestrado., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

VALERO, Patricia. **Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Sobretensões Transitórias nas Manobras de Energização e Religamento de Linhas de Transmissão.** Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2007.

W SERVICE. **Disjuntores.** Disponível em:<<https://www.wservice.com.br/serv/>>. Último Acesso em: janeiro, 2022.

## ANEXOS

### ANEXO A – DADOS DO SISTEMA IEEE 30-BARRAS

As tabelas A.1 à A.6, demonstram os dados do Sistema-Teste IEEE 30-barras. As informações sobre dados de barra, de linha, do transformador, das cargas, dos compensadores síncronos e geradores podem ser observadas.

Tabela A.1 – Dados de Barra.

<b>Número</b>	<b>Nome</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>Sbase (MVA)</b>
1	Glen Lyn	132	100
2	Claytor	132	100
3	Kumis	132	100
4	Hancock	132	100
5	Fieldale	132	100
6	Roanoke	132	100
7	Blaine	132	100
8	Reusens	132	100
9	Roanoke	1	100
10	Roanoke	33	100
11	Roanoke	11	100
12	Hancock	33	100
13	Hancock	11	100
14	Bus 14	33	100
15	Bus 15	33	100
16	Bus 16	33	100
17	Bus 17	33	100
18	Bus 18	33	100
19	Bus 19	33	100
20	Bus 20	33	100
21	Bus 21	33	100
22	Bus 22	33	100
23	Bus 23	33	100

24	Bus 24	33	100
25	Bus 25	33	100
26	Bus 26	33	100
27	Cloverdle	33	100
28	Cloverdle	132	100
29	Bus 29	33	100
30	Bus 30	33	100

Fonte: Adaptação (Ali R. Al-Roomi, 2015).

Tabela A.2 – Dados de Linha em pu.

De	Para	R+ (%)	X+ (%)	B linha
1	2	0,0192	0,0575	0,0528
1	3	0,0452	0,1652	0,0408
2	4	0,057	0,1737	0,0368
3	4	0,0132	0,0379	0,0084
2	5	0,0472	0,1983	0,0418
2	6	0,0581	0,1763	0,0374
4	6	0,0119	0,0414	0,009
5	7	0,046	0,116	0,0204
6	7	0,0267	0,082	0,017
6	8	0,012	0,042	0,009
12	14	0,1231	0,2559	
12	15	0,0662	0,1304	
12	16	0,0945	0,1987	
14	15	0,221	0,1997	
16	17	0,0524	0,1923	
15	18	0,1073	0,2185	
18	19	0,0639	0,1292	
19	20	0,034	0,068	
10	20	0,0936	0,209	
10	17	0,0324	0,0845	



10	21	0,0348	0,0749	
10	22	0,0727	0,1499	
21	22	0,0116	0,0236	
15	23	0,1	0,202	
22	24	0,115	0,179	
23	24	0,132	0,27	
24	25	0,1885	0,3292	
25	26	0,2544	0,38	
25	27	0,1093	0,2087	
27	29	0,2198	0,4153	
27	30	0,3202	0,6027	
29	30	0,2399	0,4533	
8	28	0,0636	0,2	0,0428
6	28	0,0169	0,0599	0,013

Fonte: Adaptação (Ali R. Al-Roomi, 2015).

Tabela A.3 – Dados do Transformador em pu.

Transformadores		Ligação (kV)	X %
De	Para		
6	9	132 / 1	0,208
6	10	132 / 33	0,556
9	11	1 / 33	0,208
9	10	1 / 33	0,11
4	12	132 / 33	0,256
12	13	33 / 11	0,14
28	27	132 / 33	0,396

Fonte: Adaptação (Ali R. Al-Roomi, 2015).

Tabela A.4 – Dados das cargas.

<b>Barra</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVAr)</b>
2	21,7	12,7
3	2,4	1,2
4	7,6	1,6
5	94,2	19
7	22,8	10,9
8	30	30
10	5,8	2
12	11,2	7,5
14	6,2	1,6
15	8,2	2,5
16	3,5	1,8
17	9	5,8
18	3,2	0,9
19	9,5	3,4
20	2,2	0,7
21	17,5	11,2
23	3,2	1,6
24	8,7	6,7
26	3,5	2,3
29	2,4	0,9
30	10,6	1,9

Fonte: Adaptação (Ali R. Al-Roomi, 2015).

Tabela A.5 – Dados dos compensadores síncronos.

<b>Barra</b>	<b>Nome</b>	<b>B (MVAr)</b>
5	Fieldale	37
11	Roanoke	16,2
13	Hancock	10,6

Fonte: Adaptação (Ali R. Al-Roomi, 2015).

Tabela A.6 – Dados dos geradores.

Gerador	Tensão (kV)
1	132
2	132

Fonte: Adaptação (Ali R. Al-Roomi, 2015).

$R_+$  - Resistência de sequência positiva.

$X_+$  - Reatância de sequência positiva.

$B$  – Susceptância shunt.

$P$  – Potência ativa.

$Q$  – Potência reativa.

## ANEXO B – PARÂMETROS DA TABELA 12 - IEEE C37.06-2009

**Table 12—Preferred ratings of prospective TRV for circuit breakers rated 100 kV and above, including circuit breakers applied in gas-insulated substations, for effectively grounded systems and grounded faults with a first pole to clear factor of  $K_{pp} = 1.3$  at T100 1<sup>a</sup>**

Line No.	Rated maximum voltage (1) $U_r$ , kV, rms	Test duty	Amplitude factor	First reference voltage $u_r$ , kV	Time $t_1$ , $\mu$ s	TRV peak value (4) (8) $u_c$ , kV	Time (2) $t_2$ , $\mu$ s	Time $t_3$ , $\mu$ s	Time delay (5) $t_d$ , $\mu$ s	Voltage $u'$ , kV	Time (5) $t'$ , $\mu$ s	RRRV $u_r/t_1$ or $u_c/t_3$ , kV/ $\mu$ s
1	123	T100	1.40	98	49	183	196	—	2 [14]	49	27 [8]	2
2	123	T60	1.50	98	33	196	99	—	2 [10]	49	18 [26]	3
3	123	T30	1.54 (7)	—	—	201	—	40	6	67	19	5
4	123	T10	1.76 (7)	—	—	230	—	33	5	77	16	7
5	145	T100	1.40	115	58	215	232	—	2 [16]	58	31 [45]	2
6	145	T60	1.50	115	38	231	114	—	2 [12]	58	21 [31]	3
7	145	T30	1.54 (7)	—	—	237	—	47	7	79	23	5
8	145	T10	1.76 (7)	—	—	272	—	39	6	91	19	7
9	170	T100	1.40	135	68	253	272	—	2 [19]	68	36 [53]	2
10	170	T60	1.50	135	45	271	135	—	2 [14]	68	25 [36]	3
11	170	T30	1.54 (7)	—	—	278	—	56	8	93	27	5
12	170	T10	1.76 (7)	—	—	320	—	46	7	106	22	7
13	245	T100	1.40	195	98	364	392	—	2 [7]	98	51 [76]	2
14	245	T60	1.50	195	65	390	195	—	2 [20]	98	35 [52]	3
15	245	T30	1.54 (7)	—	—	400	—	80	12	133	39	5
16	245	T10	1.76 (7)	—	—	459	—	66	10	153	32	7
17	362	T100	1.40	288	144	538	576	—	2 [40]	144	74 [112]	2
18	362	T60	1.50	288	96	576	288	—	2 [29]	144	50 [77]	3
19	362	T30	1.54 (7)	—	—	592	—	118	18	197	57	5
20	362	T10	1.76 (7)	—	—	676	—	97	15	226	47	7

Fonte: (IEEE Std. C37.06-2009, 2009 p. 23).

## ANEXO C – PARÂMETROS DA TABELA 13 - IEEE C37.06-2009

**Table 13—Preferred ratings of prospective TRV for circuit breakers rated 100 kV and above, including circuit breakers applied in gas-insulated substations for non-effectively grounded systems (all faults) and also ungrounded faults in effectively grounded systems, all with a first pole to clear factor of  $K_{pp} = 1.5$  at T100<sup>a</sup>**

Line No.	Standard values of TRV represented by four parameters (T100, T60) and two parameters (T30, T10)																	
	Rated maximum voltage (1) $U_r$ , rms kV	Test duty	Amplitude factor $k_{gr}$ p.u.	First reference voltage $u_1$ kV	Time $t_1$ $\mu$ s	TRV peak value (2) (4) $u_c$ kV	Col 6	Time $t_2$ $\mu$ s	Col 7	Time $t_3$ $\mu$ s	Col 8	Time delay (3) $t_d$ $\mu$ s	Col 9	Voltage $u'$ kV	Col 10	Time (3) $t'$ $\mu$ s	Col 11	RRRV $u_1/t_1$ , or $u_c/t_3$ kV/ $\mu$ s
1	123	T100	1.40	113	56	211	Col 6	224	Col 7	—	2 [16]	Col 9	57	Col 10	30 [44]	Col 11	2	Col 12
2	123	T60	1.50	113	38	226	Col 6	114	Col 7	—	2 [11]	Col 9	57	Col 10	21 [30]	Col 11	3	Col 12
3	123	T30	1.58	—	—	238	Col 6	—	Col 7	48	7	Col 9	79	Col 10	23	Col 11	5	Col 12
4	123	T10	1.64	—	—	247	Col 6	—	Col 7	35	5	Col 9	82	Col 10	17	Col 11	7	Col 12
5	145	T100	1.40	133	67	249	Col 6	268	Col 7	—	2 [19]	Col 9	67	Col 10	35 [52]	Col 11	2	Col 12
6	145	T60	1.50	133	44	266	Col 6	132	Col 7	—	2 [13]	Col 9	67	Col 10	24 [35]	Col 11	3	Col 12
7	145	T30	1.58	—	—	281	Col 6	—	Col 7	56	8	Col 9	94	Col 10	27	Col 11	5	Col 12
8	145	T10	1.64	—	—	291	Col 6	—	Col 7	42	6	Col 9	97	Col 10	20	Col 11	7	Col 12
9	170	T100	1.40	156	78	291	Col 6	312	Col 7	—	2 [22]	Col 9	78	Col 10	41 [61]	Col 11	2	Col 12
10	170	T60	1.50	156	52	312	Col 6	156	Col 7	—	2 [16]	Col 9	78	Col 10	28 [42]	Col 11	3	Col 12
11	170	T30	1.58	—	—	329	Col 6	—	Col 7	66	10	Col 9	110	Col 10	32	Col 11	5	Col 12
12	170	T10	1.64	—	—	341	Col 6	—	Col 7	49	7	Col 9	114	Col 10	24	Col 11	7	Col 12
13	245	T100	1.40	225	113	420	Col 6	452	Col 7	—	2 [32]	Col 9	113	Col 10	58 [88]	Col 11	2	Col 12
14	245	T60	1.50	225	75	450	Col 6	225	Col 7	—	2 [23]	Col 9	113	Col 10	40 [60]	Col 11	3	Col 12
15	245	T30	1.58	—	—	474	Col 6	—	Col 7	95	14	Col 9	158	Col 10	46	Col 11	5	Col 12
16	245	T10	1.64	—	—	492	Col 6	—	Col 7	70	11	Col 9	164	Col 10	34	Col 11	7	Col 12
17	362	T100	1.40	333	166	621	Col 6	664	Col 7	—	2 [47]	Col 9	167	Col 10	85 [130]	Col 11	2	Col 12
18	362	T60	1.50	333	111	665	Col 6	333	Col 7	—	2 [33]	Col 9	167	Col 10	58 [89]	Col 11	3	Col 12
19	362	T30	1.58	—	—	701	Col 6	—	Col 7	140	21	Col 9	234	Col 10	68	Col 11	5	Col 12
20	362	T10	1.64	—	—	727	Col 6	—	Col 7	104	16	Col 9	242	Col 10	50	Col 11	7	Col 12

Fonte: (IEEE Std. C37.06-2009, 2009 p. 26).