

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JEFERSON TADEU MARTINS DE LIMA**

**ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO  
TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO NO SISTEMA-TESTE  
IEEE 30-BARRAS: UM ESTUDO DE CASO.**

**Alegrete - RS  
2021**

**JEFERSON TADEU MARTINS DE LIMA**

**ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO  
TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO NO SISTEMA-TESTE  
IEEE 30-BARRAS: 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  
2021**

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) .

Lima, Jeferson Tadeu Martins de  
ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO  
TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO NO SISTEMA-  
TESTE IEEE 30-BARRAS: UM ESTUDO DE CASO. / Jeferson  
Tadeu Martins de Lima.  
70 p.

L732a

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,  
2021.

"Orientação: Chrystian Dalla Lana da Silva".

1. Disjuntores de alta tensão. 2. superação de  
disjuntores. 3. tensão de restabelecimento transitória.  
4. transitório eletromagnético. I. Título.

SEI/UNIPAMPA - 0510175 - Folha de Aprovação



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**JEFERSON TADEU MARTINS DE LIMA**

**ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO NO SISTEMA-TESTE IEEE 30-BARRAS: 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: 29 de abril de 2021.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Alessandro Botti Benevides

UNIPAMPA

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHRYSIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2021, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2021, às 20:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALESSANDRO BOTTI BENEVIDES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/04/2021, às 18:55, 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 **0510175** e o código CRC **84EC1633**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete  
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550

Telefone: (55) 3422-8400

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, Antônio e Magda, e para minha namorada lhândora, pilares para a conclusão desta etapa tão importante.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Divido esta conquista com diversas pessoas que auxiliaram e contribuíram de alguma forma.*

*Agradeço aos meus pais Antônio e Magda, que sempre acreditaram no meu potencial e nunca mediram esforços para a realização desta conquista.*

*À minha namorada Ihândora, pelo suporte emocional e afetivo, pela paciência e incentivo através dos anos de curso.*

*Ao amigos e colegas que tive a oportunidade de conhecer durante o curso, em especial a gurizada do “Relatórios 10”, aos amigos que dividi apartamento e todos aqueles que, de certa forma, estiveram presentes nas noites viradas de estudo e nas partidas de futebol.*

*Ao meu orientador, professor Chrystian, pela prontidão em atender às dúvidas, e pelo suporte durante elaboração deste trabalho. Muito obrigado!*

*Agradeço a Unipampa, a todos os professores e servidores pela estrutura disponível e excelente aprendizado.*

*“O que você mais quer saber será encontrado onde você menos quer procurar”.*

*Carl Gustav Jung.*



## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso da superação por tensão de restabelecimento transitória (TRT) em disjuntores de alta tensão para o sistema-teste IEEE 30-barras. A tensão de restabelecimento transitória pode ser definida como um transitório eletromagnético que surge nos terminais do disjuntor quando este é acionado, surgindo depois que o arco elétrico gerado pela abertura dos contatos é dissipado quando a corrente passa por zero. Essa sobretensão pode apresentar alta frequência e, devido à sua magnitude, pode causar danos consideráveis aos disjuntores sujeitos a ela, o que justifica os estudos realizados acerca deste fenômeno. A superação dos disjuntores através da TRT acontece quando os valores das componentes dielétricas e térmicas que o dispositivo suporta são extrapoladas, seja pela amplitude da TRT, ou pela sua taxa de crescimento (TCTRT) em comparação às envoltórias definidas por normas técnicas. Os resultados das análises de superação deste trabalho são baseados na norma IEEE C37.06-2009, para capacidades nominais de interrupção (*Test Duty*) de 100, 60, 30 e 10 por cento, para curtos-circuitos fase-terra e trifásicos. Os resultados obtidos demonstraram que o local da falta e sua magnitude interferem diretamente no processo de superação do disjuntor. Além disso, quando a capacidade nominal de interrupção para *test duty* T100, não sofre superação, consequentemente as capacidades para T60, T30 e T10 também não são superadas.

**Palavras-Chave:** Disjuntores de alta tensão, superação de disjuntores, tensão de restabelecimento transitória, transitório eletromagnético.

## ABSTRACT

This work is a case study of transient recovery voltage (TRV) induced failure in high voltage circuit breakers for IEEE 30-bus test system. The transient recovery voltage is defined as an electromagnetic transient that appears at the circuit breaker terminals when they open, appearing after the electric arc generated by the contacts opening is dissipated when the current passes through zero. This overvoltage can have high frequency and cause failures like arc reignition and considerable damage to circuit breakers subject to it due to its magnitude, which justifies the studies carried out on this phenomenon. Circuit breakers fails when the values of the dielectric and thermal components the device supports are extrapolated, either by the TRV amplitude or by its rate of rise (RRRV – rate of rise of recovery voltage), when compare to envelopes defined by technical standards. The analysis is based on IEEE C37.06-2009 standard, with Test Duty - 100, 60, 30 and 10 percent, for phase-to-ground and three-phase faults. The results obtained demonstrated that the location of the fault and its magnitude directly interfere in the process of TRV induced circuit breaker failure. In addition, when the rated interruption capacity for test duty T100 is not exceeded, consequently the capacities for T60, T30 and T10 are also not exceeded.

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de disjuntor a SF6 do tipo pressão única. ....	23
Figura 2 – Sistemas conectados por um disjuntor.....	24
Figura 3 – Processos de interrupção de corrente no disjuntor. ....	25
Figura 4 – TRT em um disjuntor de alta tensão .....	26
Figura 5 – TRT com resposta exponencial.....	27
Figura 6 – TRT com resposta oscilatória.....	28
Figura 7 – TRT com resposta triangular.....	28
Figura 8 – TRT x Envoltória de um disjuntor não superado .....	30
Figura 9 – TRT x Envoltória de um disjuntor superado .....	30
Figura 10 – Envoltória de dois parâmetros.....	32
Figura 11 – Envoltória de quatro parâmetros .....	32
Figura 12 – Sistema-teste IEEE 30-barras.....	34
Figura 13 – Envoltórias da norma. ....	35
Figura 14 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 1 .....	37
Figura 15 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 1 .....	38
Figura 16 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 1 .....	39
Figura 17 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 1 .....	40
Figura 18 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1 .....	41
Figura 19 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 1 .....	42
Figura 20 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 2 .....	43
Figura 21 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 2 .....	44
Figura 22 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 2 .....	45
Figura 23 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 2 .....	46
Figura 24 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 2 .....	47
Figura 25 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 2 .....	48
Figura 26 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 3 .....	49
Figura 27 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 3 .....	50
Figura 28 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 3 .....	51
Figura 29 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 3 .....	52
Figura 30 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 3 .....	53
Figura 31 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 3 .....	54
Figura 32 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 4 .....	55

Figura 33 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 4 .....	56
Figura 34 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 4 .....	57
Figura 35 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 4 .....	58
Figura 36 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 4 .....	59
Figura 37 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 4 .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificações preferenciais de TRT para disjuntores classificados Acima de 100kV para $K_{pp} = 1,3$ .....	31
Tabela 2 – Parâmetros da norma.....	35
Tabela A.1 – Dados de Barra .....	65
Tabela A.2 – Dados de Linha em pu .....	66
Tabela A.3 – Dados do Transformador em pu .....	67
Tabela A.4 – Dados das cargas .....	68
Tabela A.5 – Dados dos compensadores síncronos .....	68
Tabela A.6 – Dados dos geradores.....	69
Tabela B.1 – Parâmetros da norma IEEE C37.06-2009.....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	Alternative Transient Program
CA	Corrente Alternada
Icc	Corrente de Curto-Circuito
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	Quilovolt
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
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>
1.1 Considerações Gerais.....	17
1.2 Objetivos .....	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	17
1.3 Justificativa.....	18
1.4 Revisão Bibliográfica .....	19
1.5 Estrutura do Trabalho .....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 Considerações Gerais.....	21
2.2 Disjuntores.....	21
2.2.1 Definição .....	21
2.2.2 Principais Funções de um Disjuntor .....	22
2.2.3 Principais Componentes de um Disjuntor .....	23
2.3 Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) .....	24
2.3.1 Definição e Origem.....	24
2.3.2 Tipos de TRT.....	27
2.4 Superação de Disjuntores por TRT e Envoltórias da Norma.....	29
2.4.1 Superação de Disjuntores por TRT.....	29
2.4.2 Envoltórias da Norma .....	30
2.5 Considerações Finais .....	33
<b>3 ANÁLISE DA SUPERAÇÃO POR TRT .....</b>	<b>34</b>
3.1 Considerações Gerais.....	34
3.2 Sistema-Teste e Envoltórias da Norma IEEE C37.06-2009 .....	34
3.3 Casos Analisados .....	36
3.4 Caso 1: Curto-Circuito Trifásico em 50% da Linha .....	37
3.4.1 Linha 1-2.....	37
3.4.2 Linha 6-28.....	39
3.4.3 Linha 8-28.....	41
3.5 Caso 2: Curto-Circuito Fase-Terra em 50% da Linha.....	43
3.5.1 Linha 1-2.....	43
3.5.2 Linha 6-28.....	45

3.5.3 Linha 8-28.....	47
<b>3.6 Caso 3: Curto-Circuito Trifásico próximo a um Disjuntor .....</b>	<b>49</b>
3.6.1 Linha 1-2.....	49
3.6.2 Linha 6-28.....	51
3.6.3 Linha 8-28.....	53
<b>3.7 Caso 4: Curto-Circuito Fase-Terra próximo a um Disjuntor .....</b>	<b>55</b>
3.7.1 Linha 1-2.....	55
3.7.2 Linha 6-28.....	57
3.7.3 Linha 8-28.....	59
<b>3.8 Considerações Finais .....</b>	<b>60</b>
<b>4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1 Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>65</b>



# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Considerações Gerais**

Disjuntores são dispositivos de proteção do sistema elétrico responsáveis pelo isolamento de curtos-circuitos através de manobras de chaveamento, minimizando os efeitos da falta sobre o restante do sistema. A superação destes mecanismos ocorre quando suas especificações nominais de corrente elétrica são ultrapassadas e pode ser analisada através de diferentes técnicas.

Quando um disjuntor é solicitado pelo sistema elétrico, através de uma manobra com corrente de carga, curto-circuito ou sobrecarga, a condição mais severa que o dispositivo pode ser submetido acontece e isto, em conjunto com as características da rede, ocasionam um transitório eletromagnético nos terminais do dispositivo. Este fenômeno é chamado de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) e ocorre a partir do momento em que a corrente passa por zero.

A análise da TRT é feita através da comparação entre sua taxa de crescimento e pico com as normas regulamentadas, as quais definem parâmetros de análise que, quando ultrapassados, caracterizam a superação do disjuntor. Os estudos desse tipo de superação vêm sendo desenvolvidos há décadas e contribuem significativamente para a confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O trabalho tem como objetivo geral fazer um estudo de caso usando o sistema-teste IEEE 30-barras, analisando os resultados de TRT e comparando-os com a envoltória da norma IEEE C37.06-2009, para capacidades nominais de interrupção de 100%, 60%, 30% e 10%, para curto-circuito trifásico e curto-circuito fase-terra.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, citam-se:

- Levantamento das bibliografias relacionadas ao tema proposto;
- Modelagem do sistema teste no *software* ATP, através de sua interface gráfica *ATPdraw*;
- Geração das envoltórias da norma IEEE C37.06-2009 em *software* Matlab®, conforme parâmetros definidos;
- Análise e comparação da TRT com a norma utilizada.

### 1.3 Justificativa

Devido ao constante crescimento do SEP, o estudo sobre efeitos de curto-circuito e transitórios eletromagnéticos, sobretudo nos dispositivos de proteção, tem um importante papel na garantia de confiabilidade do setor elétrico. As análises a curto e longo prazo devem assegurar a inserção de novas cargas e ampliação do sistema.

Disjuntores de alta tensão têm um papel indispensável na proteção do sistema. Portanto, seu correto dimensionamento através dos métodos de superação é fundamental. A análise da tensão de restabelecimento transitória é um dos fatores de superação mais usual nestes dispositivos, pois a superação de seus limites pode acarretar em danos graves, tanto no disjuntor, quanto na rede conectada.

Segundo a ONS (2014), a necessidade de estudos para evitar a superação de equipamentos surge como consequência do aumento da potência instalada e aos elevados níveis de curto-circuito e corrente de fluxo da rede, tornando esse tipo de análise uma tarefa difícil e complexa, exigindo a utilização de *softwares* computacionais. Nesse contexto o *software* ATP (*Alternative Transient Program*) é amplamente utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos, pois possibilita a modelagem da rede conforme o caso estudado, apresentando resultados confiáveis.

A aplicação da análise de superação por TRT aponta os disjuntores candidatos à superação no sistema, e podem evitar possíveis falhas que ocorrem nestes dispositivos quando suas capacidades térmicas e eletromagnéticas são rompidas.

## 1.4 Revisão Bibliográfica

Esta seção tem como objetivo sintetizar alguns artigos, teses e normas sobre o tema proposto, os quais foram de suma importância para a elaboração e entendimento do trabalho. Alguns são descritos a seguir.

Sinder (2007) investigou métodos de cálculo da TRT de disjuntores de alta tensão em sistemas rigorosamente malhados, nos domínios do tempo e da frequência, com o intuito de analisar a superação destes dispositivos. Propôs e desenvolveu um método através das transformadas de Fourier. Também, descreveu detalhadamente a superação de disjuntores das mais diversas formas.

Carvalho (2007), em seu artigo, apresentou critérios de análises do Grupo de Trabalho para Análises de Superação de Equipamentos de Alta Tensão (GT-AS), para superação por curto-circuito, corrente nominal, constante de tempo da rede, corrente de pico assimétrica e por TRT, relatando as experiências e resultados do processo.

Azevêdo (2010) mostrou, em sua dissertação de mestrado, uma técnica para estimação paramétrica de equivalentes dependentes da frequência para aplicação de estudos de TRT. Em outro artigo, ainda em 2010, sintetizou os principais desenvolvimentos inerentes à adoção de medidas mitigadoras para ajuste das solicitações acima dos limites admissíveis, medidas essas que discutiram a redução da TCTRT, assim como do pico da TRT.

Cavalcanti (2010) propôs uma metodologia para cálculo da TRT em disjuntores de acordo com o arco elétrico do dispositivo, analisando a adequação dos disjuntores através dos valores de pico e da taxa de crescimento da TRT, fazendo o uso do *Software* ATP.

Rabito; Paloma; e Silvestri (2011) exibiram um estudo de caso sobre a superação dos disjuntores da subestação elevadora da Usina de São Salvador no Tocantins, com base nos dados fornecidos pelo ONS. Abordaram a superação por diferentes métodos de superação, como corrente de carga, corrente simétrica e assimétrica de curto-circuito, crista da corrente de curto-circuito e TRT, para diferentes tipos de faltas.

Alves (2012) abordou sobre TRT, bem como a respeito das sobretensões dos sistemas elétricos, da superação de disjuntores e do impacto negativo nos equipamentos elétricos.

Padilha (2020) apresentou um método de cálculo de TRT em disjuntores de alta tensão para sistemas radiais e sistemas malhados, método esse baseado na utilização da impedância equivalente do sistema associado a uma fonte de corrente.

A norma IEEE Std C37.011-2005 (2005) fornece uma guia de aplicação, definição e características para utilização de parâmetros de TRT apresentadas em outras normas, dentre elas a IEEE Std. C37.06-2009.

A norma IEC 62271-100 (2008) estabelece os parâmetros de análise das tensões de restabelecimento transitória. Esta parte da IEC 62271 é aplicável a disjuntores de CA projetados para uso interno ou externo e para operação em frequências de 50 Hz e 60 Hz em sistemas com tensões acima de 1000 V.

A norma IEEE Std. C37.06-2009 (2009) descreve as classificações preferenciais de disjuntores de alta tensão internos e externos acima de 1000 V para uso em instalações comerciais, industriais e de serviços públicos.

## **1.5 Estrutura do Trabalho**

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

- No Capítulo 2, é demonstrada a fundamentação teórica sobre o assunto, com uma consideração geral sobre disjuntores, TRT, superação de disjuntores por TRT, envoltórias da norma IEEE C37.06-2009, com suas definições e tipos.
- No Capítulo 3, são abordadas as simulações, demonstrando o sistema teste utilizado e seus dados, os parâmetros da norma, assim como seus respectivos resultados e considerações.
- No Capítulo 4, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.
- Ao final, são apresentadas referências bibliográficas e os anexos.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Considerações Gerais**

A adequação dos disjuntores para suportar as correntes de carga e curto-circuito é feita através das análises de superação. É fundamental o entendimento sobre o funcionamento do disjuntor, o processo de superação da TRT, bem como das curvas envoltórias das normas técnicas.

Esta seção apresenta o embasamento teórico sobre a definição de disjuntores e suas características, a origem e tipos de TRT's, as envoltórias das normas técnicas e seus parâmetros. Também, é abordada a superação de disjuntores através da TRT, principal objetivo deste estudo.

### **2.2 Disjuntores**

#### **2.2.1 Definição**

De acordo com Sampaio (2012), disjuntores podem ser definidos como equipamentos de manobra que visam estabelecer, conduzir, interromper e suportar correntes elétricas em condições normais de serviço e em adversidades. São dispositivos de suma importância para qualquer sistema elétrico, de baixa ou alta tensão e complexidade.

Estes dispositivos devem ser instalados em associação com relés específicos, que são responsáveis pelo acionamento nas faltas elétricas. Caso contrário, as funções de proteção são perdidas, tornando-se apenas chaves de manobra. As características básicas são as mesmas para os diversos tipos de disjuntores, variando apenas detalhes, conforme classes de tensão e corrente.

O disjuntor deve ter a precisão de atuar em uma condição de falha no sistema, seja no interior de sua câmara de extinção ou com auxílio de dispositivos pilotos que operam o mecanismo de abertura. Após a detecção, feita pelo relé, os contatos devem ser abertos, através de energias mecânicas ou eletromagnéticas.

A vida útil dos seus componentes está atrelada à erosão do material dos contatos, devido ao arco elétrico formado para interromper uma corrente de curto-circuito. Esses contatos geralmente são construídos em cobre, ligas de prata ou

materiais altamente condutores. Para disjuntores de alta tensão, os contatos podem ser substituídos.

### **2.2.2 Principais Funções de um Disjuntor**

Conforme Rabito; Paloma; Silvestri (2011), as principais funções que um disjuntor deve ter são:

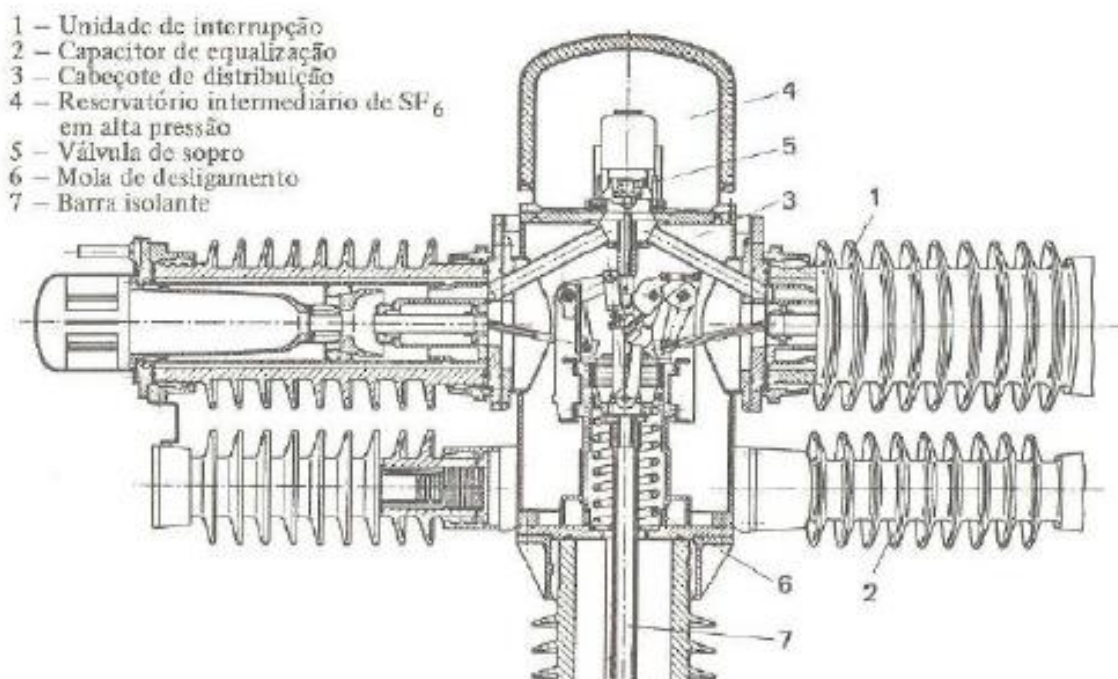
- Rapidez e sucessiva interrupção da corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ), limitando os danos causados aos equipamentos do sistema;
- Capacidade de interromper, estabelecer e conduzir não só as correntes nominais de carga, mas, também, as correntes de magnetização de transformadores, reatores e correntes capacitivas de banco de capacitores e linhas a vazio;
- Suportar, com os contatos abertos, a tensão nominal;
- Apresentar impedância infinita na posição aberta, sendo capaz de fechar em qualquer momento sem causar danos aos contatos, inclusive sob curto-circuito;
- Apresentar impedância desprezível na posição fechada, sendo capaz de interromper a corrente especificada sem causar sobretensões elevadas;
- Realização do movimento de abertura tão curto quanto 2 ciclos, mesmo após permanecer por vários meses na posição fechado;
- Suportar os efeitos do arco elétrico, bem como os efeitos eletromagnéticos e mecânicos devidos ao primeiro ciclo da  $I_{cc}$ , além dos efeitos térmicos da corrente estabelecida na posição fechada;
- Permitir o fechamento do circuito elétrico para condições normais de carga, imediatamente após a abertura para eliminação do defeito.

### 2.2.3 Principais Componentes de um Disjuntor

Sampaio (2012) estabelece que muitas partes integram um disjuntor, cada uma delas projetada de acordo com a função específica para o funcionamento adequado do equipamento. Dentre as principais partes construtivas dos disjuntores, podemos destacar os contatos permanentes, os contatos de arco, capa de proteção do contato de arco, a câmara de extinção e a porcelana envoltória. As características podem variar de acordo com os diferentes tipos de aspecto construtivo, que possibilitam variar técnicas de interrupção. Dentre estas podem-se citar: ar livre, sopro magnético, vácuo, ar comprimido, óleo, hexafluoreto de enxofre e semicondutores (RABITO; PALOMA; SILVESTRI, 2011, p. 32).

A Figura 1 demonstra os componentes de disjuntor SF<sub>6</sub> do tipo pressão única, onde os componentes mais importantes estão destacados e numerados.

Figura 1 – Componentes de disjuntor a SF<sub>6</sub> do tipo pressão única.



Fonte: (SAMPAIO, 2012, p. 28).

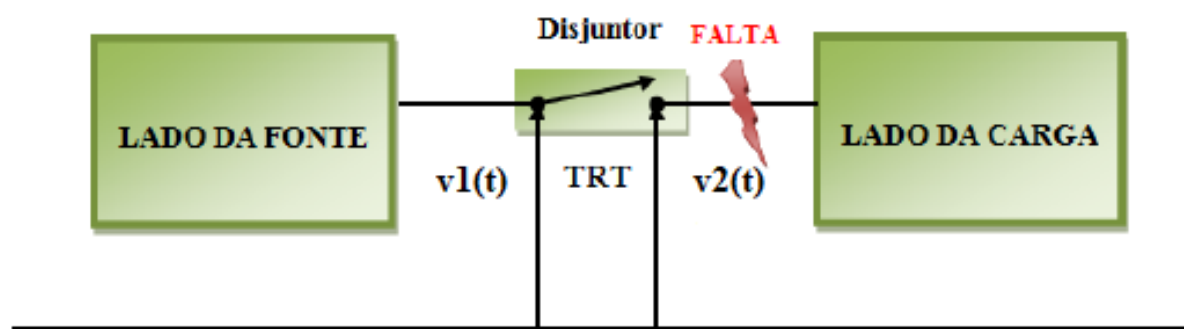
## 2.3 Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)

### 2.3.1 Definição e Origem

Para Azevêdo (2010), quando o disjuntor interrompe uma corrente elétrica com sua abertura, além da tensão nominal do sistema entre o lado energizado e o lado interrompido, uma outra diferença de potencial surge entre os terminais dos polos devido à resposta do sistema, determinada como tensão de restabelecimento transitória (TRT). Este fenômeno, normalmente oscilatório de alta frequência, pode atingir tensões de altas magnitudes, rompendo o dielétrico do disjuntor e ocasionando a falha da interrupção de corrente elétrica.

A Figura 2 mostra dois sistemas conectados por um disjuntor. Após a abertura dos contatos, cada uma delas redistribui sua energia, adaptando-se a um novo estado.

Figura 2 – Sistemas conectados por um disjuntor.



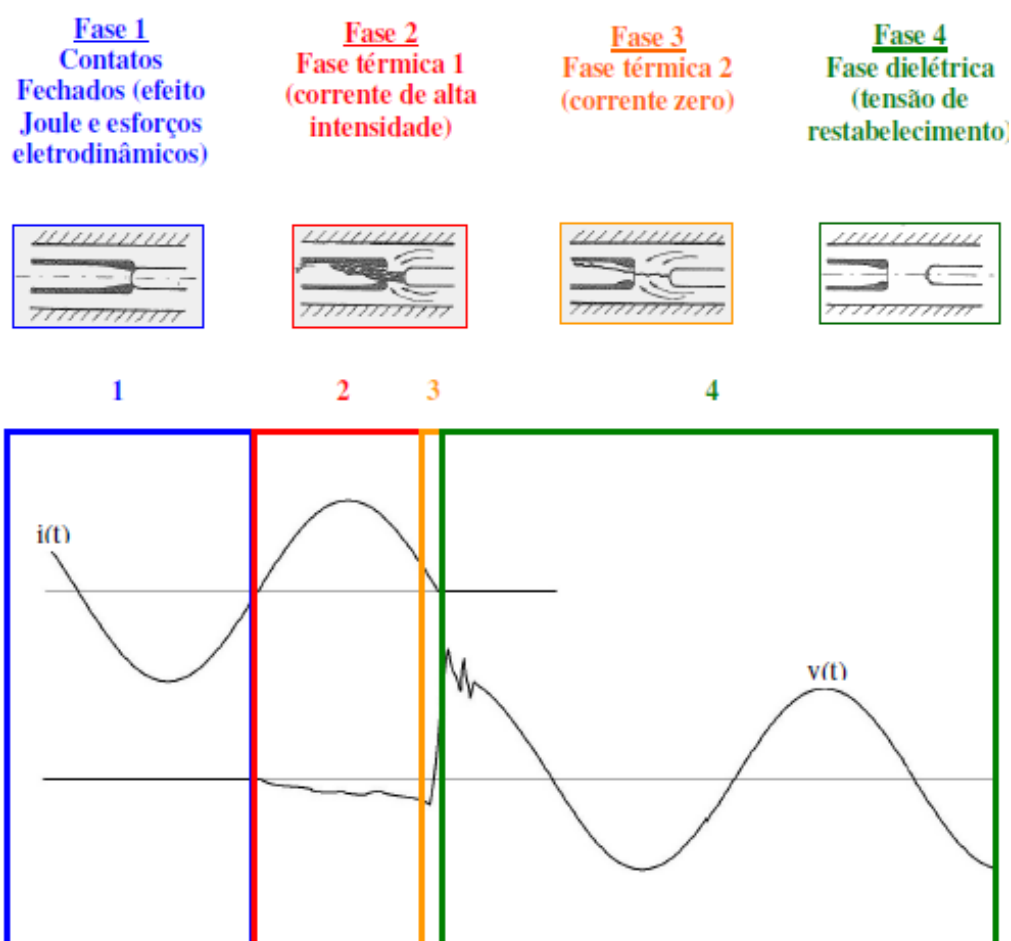
Fonte: (AZEVEDO, 2010, p. 6).

Como resultado da eliminação da corrente de falta, a tensão de restabelecimento entre os polos do disjuntor,  $v_1(t) - v_2(t)$ , apresentará oscilações transitórias até que o regime permanente seja atingido (AZEVEDO, 2010, p. 6).

Segundo Rabito; Paloma; Silvestri (2011), após a ocorrência da separação mecânica dos contatos do disjuntor, com o intuito de interromper o curto-circuito, um arco elétrico é formado entre os contatos. Isso acontece devido à conservação do fluxo magnético nas indutâncias do circuito, iniciando o processo de extinção desse fenômeno no interior do disjuntor. A Figura 3 demonstra o processo de interrupção da corrente.



Figura 3 – Processos de interrupção de corrente no disjuntor.



Fonte: (SINDER, 2007, p.8).

De maneira resumida, 4 etapas compõem esse processo:

A 1ª etapa representa os contatos fechados, abrangendo os esforços eletrodinâmicos e o efeito joule, uma vez que a corrente de carga que flui através dos contatos provoca o aquecimento dos mesmos.

A 2ª etapa representa a abertura dos contatos durante valores não-nulos de corrente, onde o objetivo é suprimir o reacendimento por reignição térmica. Isto ocorre, através do resfriamento do meio da câmara de extinção. Esse resfriamento causa uma deformação no arco elétrico, mas não consegue extinguí-lo.

A 3ª etapa representa a passagem da corrente por zero quando os contatos estão abertos. É nesse momento que ocorre a extinção do arco elétrico. Nesse momento, é determinado o sucesso ou fracasso da operação de interrupção, que depende do balanço de energia no arco, ou seja, o meio extintor deve retirar mais

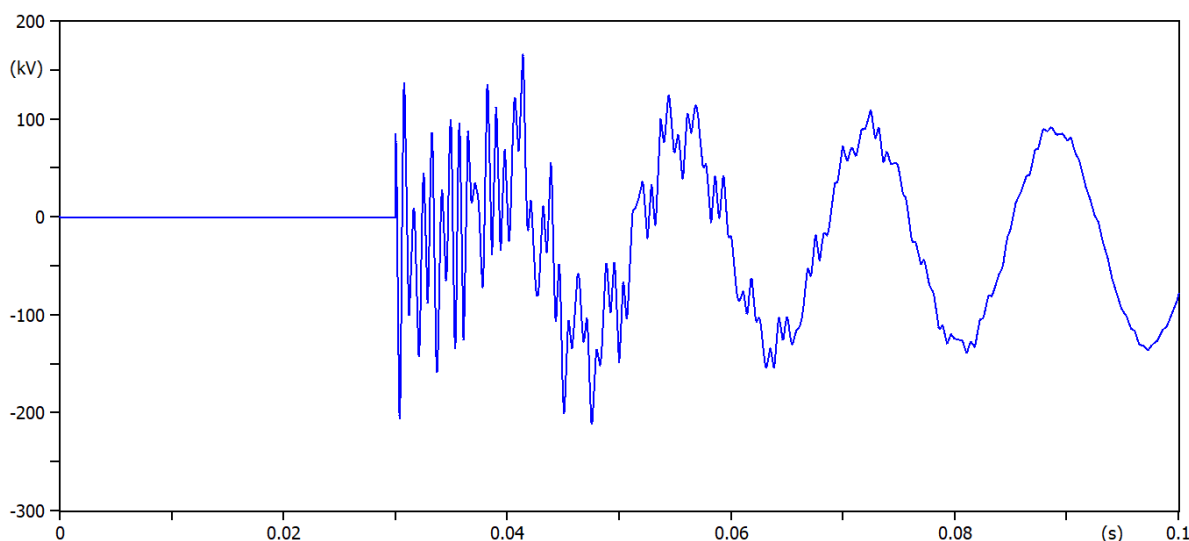
energia do arco elétrico, do que a energia dissipada pela corrente de curto-circuito (SINDER, 2007 p. 12).

A 4ª etapa ocorre após a extinção do arco, onde as capacidades térmicas e dielétricas da câmara de extinção começam a se recuperar, estabelecendo uma tensão através dos contatos do disjuntor, que tentará reacender o arco elétrico por reignição ou por ruptura do dielétrico.

Essa tensão de restabelecimento possui alguns componentes que oscilam em duas diferentes frequências, uma determinada como frequência natural, que é a própria frequência nominal do sistema, e outra determinada pelas oscilações oriundas das dinâmicas do sistema. A combinação dessas componentes gera uma tensão que possui um transitório inicial de frequência elevada, chamada de tensão de restabelecimento transitória.

Para o sucesso da interrupção de corrente, é necessário que as suportabilidades térmica e dielétrica do disjuntor sejam superiores à TRT. Portanto, a magnitude da corrente de falta e a TRT determinam a capacidade de interrupção destes equipamentos. A Figura 4 mostra uma TRT em um sistema de alta tensão no momento da abertura de seus contatos, demonstrando a sobretensão gerada.

Figura 4 – TRT em um disjuntor de alta tensão.



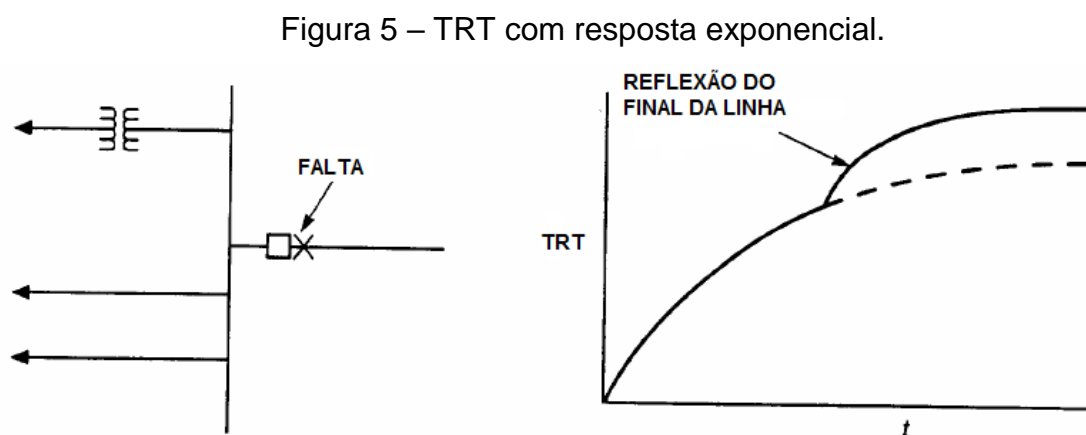
Fonte: Autor.

### 2.3.2 Tipos de TRT

Segundo a norma IEEE C37.011-2005 (2005), a tensão de restabelecimento transitória pode ter uma resposta do tipo exponencial, oscilatória, ou triangular, ou ainda, uma combinação entre elas. Em geral, o que determina o tipo de resposta da TRT é o tipo de falta e o ponto onde ela ocorre.

As respostas exponenciais e oscilatórias ocorrem através do primeiro terminal do disjuntor, interrompendo uma falta simétrica trifásica, no momento em que a tensão é máxima. As respostas triangulares são relacionadas às faltas que ocorrem na linha, onde o aumento das tensões ocorre a medida que a falta se aproxima do disjuntor. (IEEE C37.011-2005, 2005, p. 5).

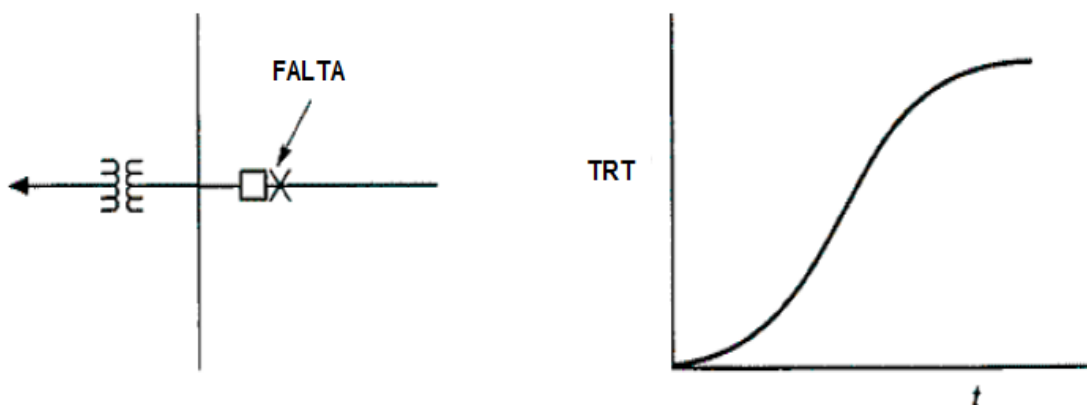
Uma TRT com resposta exponencial ocorre, geralmente, quando a falta acontece no lado oposto de onde se encontra o transformador e a linha de transmissão. A Figura 5 mostra uma TRT exponencial (IEEE C37.011-2005, 2005, p. 5).



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

Já uma TRT com resposta oscilatória acontece quando há apenas um transformador ou reator no lado oposto do disjuntor onde ocorre a falta. Devido às características indutivas e capacitivas do sistema, esse tipo de resposta tende a ser mais comum (IEEE C37.011-2005, 2005, p. 5). A Figura 6 demonstra uma TRT com resposta oscilatória.

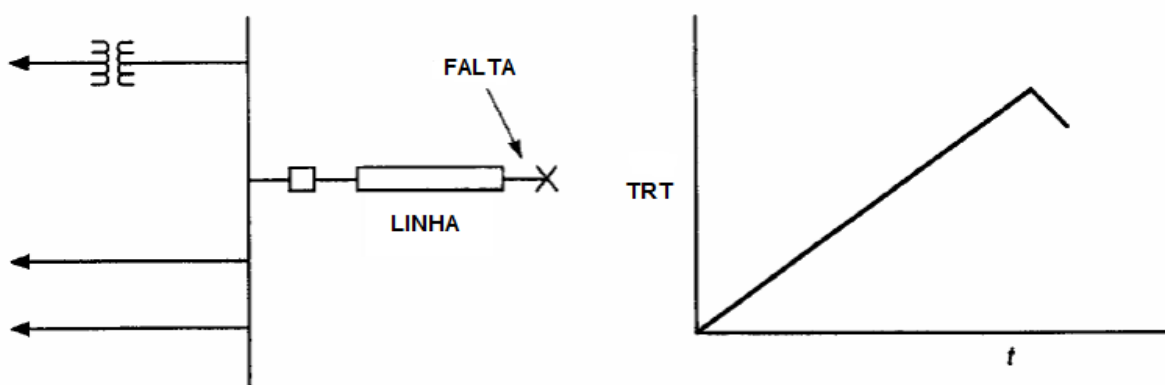
Figura 6 – TRT com resposta oscilatória.



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

Por fim, a resposta triangular para uma TRT ocorre quando a falta se encontra na linha de transmissão. A natureza da TRT é determinada pela impedância de surto da linha e, frequentemente, possui a taxa de aumento da curva maior que as taxas das respostas exponenciais e oscilatórias (IEEE C37.011-2005, 2005, p. 5). A figura 7 ilustra uma TRT com resposta triangular.

Figura 7 – TRT com resposta triangular.



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

## **2.4 Superação de Disjuntores por TRT e Envoltórias da Norma**

### **2.4.1 Superação de Disjuntores por TRT**

De acordo com Sinder (2007), a superação de disjuntores pode ser feita em duas etapas. Na primeira, deve-se realizar um estudo para escolha dos disjuntores candidatos à superação. Já na segunda, uma análise aprofundada dos disjuntores escolhidos deve ser feita, observando qual tipo de superação deve ser analisada.

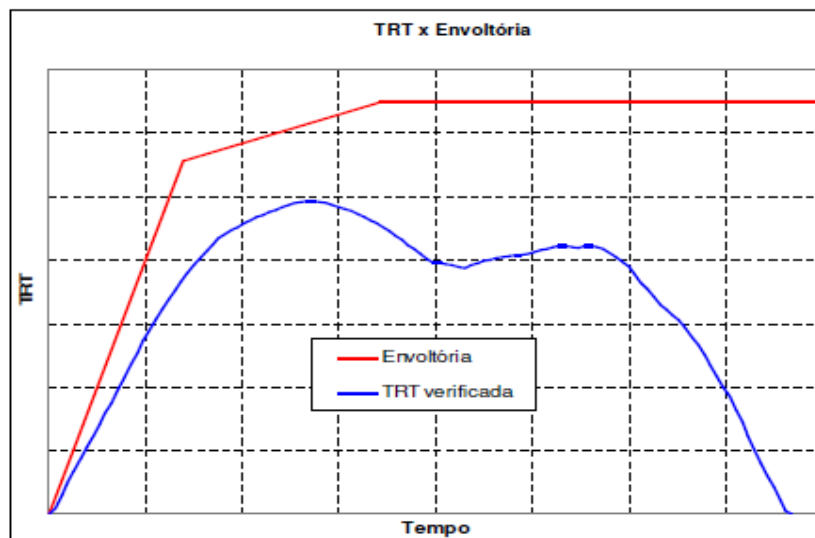
Os tipos de superação definidos por Sinder (2007) e, também reafirmados pelo relatório de critérios para análise de equipamentos de alta tensão da ONS (2014), são os seguintes: por corrente de carga, corrente de curto-circuito simétrica, corrente de curto-circuito assimétrica, crista da corrente de curto-circuito e superação por tensão de restabelecimento transitória.

A superação por TRT é caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade dielétrica ou térmica do meio de extinção do arco elétrico. O disjuntor pode ser considerado superado por amplitude ou por taxa de crescimento da TRT (TCTRT) (SINDER, 2007, p. 34).

Sinder (2007) afirma que a verificação da superação da TRT deve ser feita através da comparação da forma de tensão da TRT com a envoltória prevista em normas, em um mesmo gráfico. Estas normas podem ser definidas pela IEC 62271-100, pela IEEE C37.06-2009 ou ainda, por normas especificadas pelo fabricante. O disjuntor é considerado superado quando a curva de sua TRT ultrapassa qualquer ponto da envoltória.

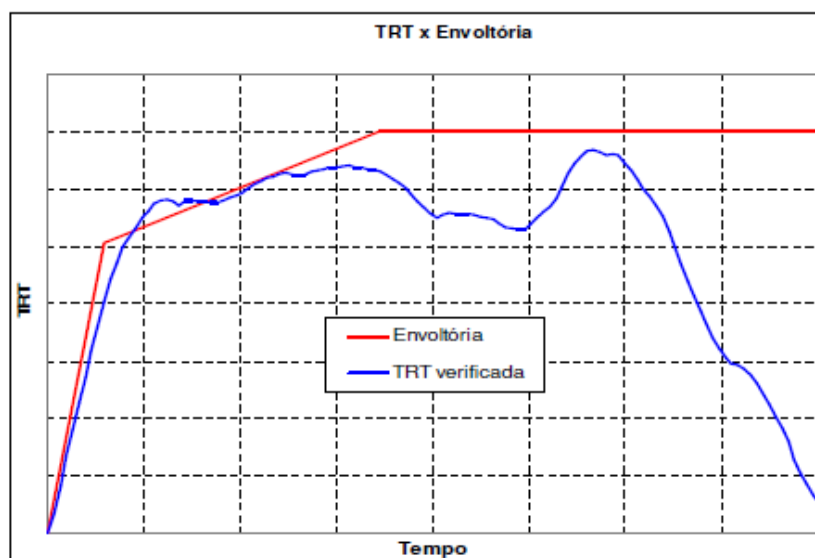
As Figuras 8 e 9 demonstram como ocorre o processo de superação de disjuntores por TRT em comparação às normas. A Figura 8 mostra um disjuntor não superado, enquanto a Figura 9 demonstra a superação de um disjuntor pela sua TCTRT.

Figura 8 – TRT x Envoltória de um disjuntor não superado.



Fonte: (SINDER, 2007, p. 39).

Figura 9 – TRT x Envoltória de um disjuntor superado.



Fonte: (SINDER, 2007, p. 39).

#### 2.4.2 Envoltórias da Norma

Como definido anteriormente, a utilização de envoltórias pré-definidas por normas são partes fundamentais na análise de superação por TRT. A norma utilizada nesse trabalho foi a IEEE C37.06-2009, e seus parâmetros podem ser vistos a seguir, na tabela 1.

Tabela 1 – Classificações preferenciais de TRT para disjuntores classificados  
Acima de 100kV para  $K_{pp} = 1,3$ .

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).

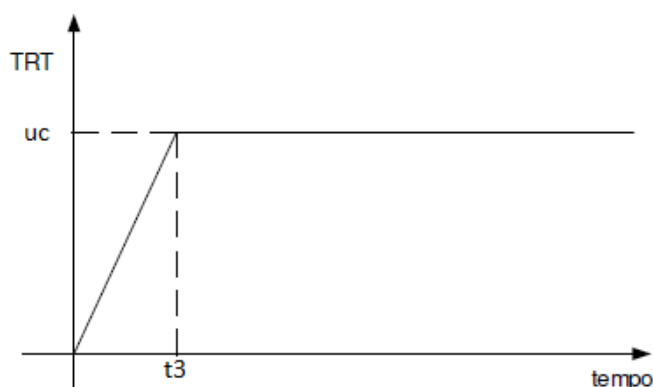
Da tabela, podemos definir os seguintes parâmetros:

- $U_r$ : tensão máxima nominal;
- *Test Duty*: Capacidade de interrupção da  $I_{cc}$  (%CNI). Altera significativamente a capacidade térmica e dielétrica do meio de extinção do arco. 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;
- $U_c$ : maior valor de pico para a TRT;
- $t_1$ : primeiro tempo de referência para envoltória de quatro parâmetros;
- $t_2$ : tempo necessário para atingir o maior valor de pico para envoltória de quatro parâmetros;
- $t_3$ : tempo necessário para atingir o maior valor de pico para envoltória de dois parâmetros;
- $t_d$ : segmento de reta que define um retardo nominal;
- *RRRV*: *rate of rise of recovery voltage*, que significa taxa de crescimento da TRT (TCTRT), é porção crescente da envoltória, dada em  $kV/\mu$ s;
- $K_{pp}$ : Fator de primeiro polo, que é uma função dos arranjos de aterramento do sistema, e representa a relação entre a componente fundamental da tensão do primeiro polo do disjuntor a suprimir a corrente de curto-circuito (antes da

eliminação da falta pelos outros polos) e seu correspondente valor de regime após a supressão da falta por todos os polos (AZEVEDO, 2010 p. 12). Segundo a norma IEEE C37.011-2005 (2005), a escolha desse fator depende do arranjo de aterramento do sistema e pode ser padronizado no valor de 1,3 para sistemas efetivamente aterrados.

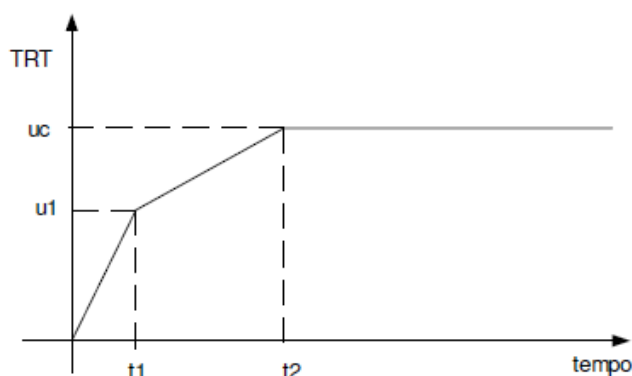
A norma IEEE C37.06-2009 (2009) prevê envoltórias de dois e quatro parâmetros. A definição do tipo de envoltória é dada pela classe de tensão do disjuntor e pela escolha do *Test Duty* utilizado. Para classes de tensão abaixo de 100 kV, a envoltória é sempre de dois parâmetros. Já para tensão acima de 100 kV, podem ser de dois ou quatro parâmetros. No caso de classe de tensão maior que 100 kV, para T100 e T60, a envoltória a ser utilizada é a de quatro parâmetros, já para T30 e T10, é utilizada a de dois parâmetros. As Figuras 10 e 11 demonstram essas envoltórias e suas diferenças.

Figura 10 – Envoltória de dois parâmetros.



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

Figura 11 – Envoltória de quatro parâmetros.



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



## **2.5 Considerações Finais**

Este Capítulo apresentou a fundamentação teórica sobre alguns aspectos básicos de disjuntores, sua definição e principais funções. Também, foi feita uma abordagem sobre o surgimento da TRT a partir do processo de interrupção que ocorre nos disjuntores, além da definição dos tipos de respostas de tensão para diferentes localidades da falta.

Foi elucidado os tipos de superação que um disjuntor pode sofrer, em especial a superação por TRT, que ocorre quando sua forma de onda supera as envoltórias definidas por normas específicas. Os parâmetros utilizados por estas normas também foram explicados e demonstrados.

### 3 ANÁLISE DA SUPERAÇÃO POR TRT

#### 3.1 Considerações Gerais

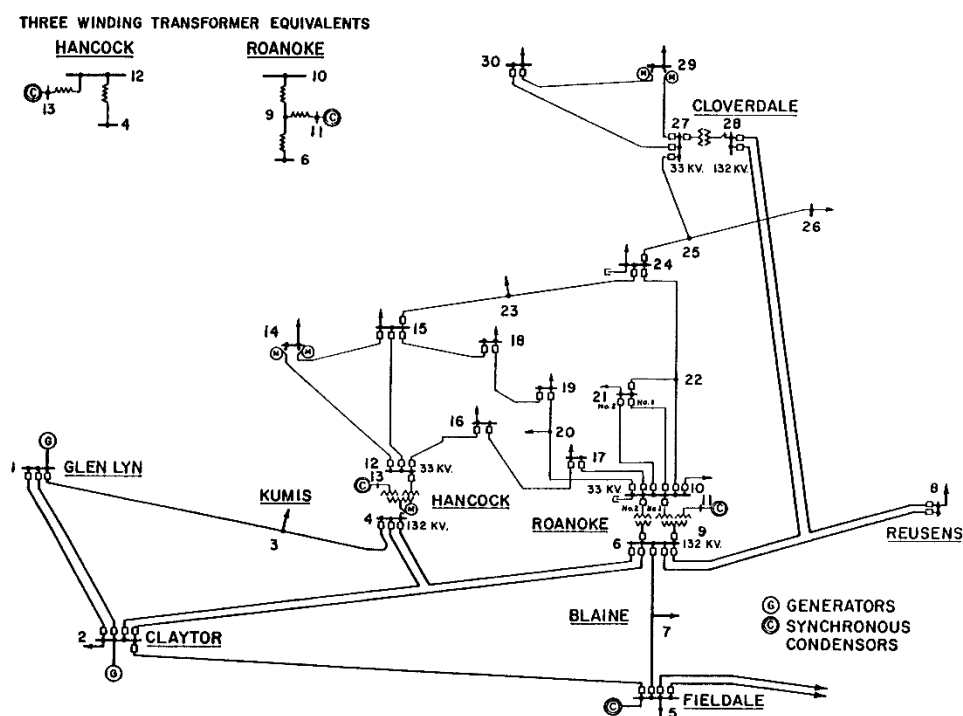
Neste capítulo, são abordados os detalhes do sistema-teste utilizado, os parâmetros da norma e os casos analisados, descrevendo cada parte do processo para a obtenção dos resultados.

Os resultados do estudo de caso de superação por TRT para curtos-circuitos trifásicos e fase-terra em diferentes localidades do sistema são abordados, assim como a relação entre os diferentes tipos de *Test Duty* para um disjuntor da mesma classe de tensão.

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

O sistema-teste IEEE 30-barras mostrado na Figura 12, foi modelado através da interface gráfica do *software ATPdraw*. Os dados completos do sistema estão disponíveis nas Tabelas do Anexo A. Todos os casos analisados têm esse sistema como base.

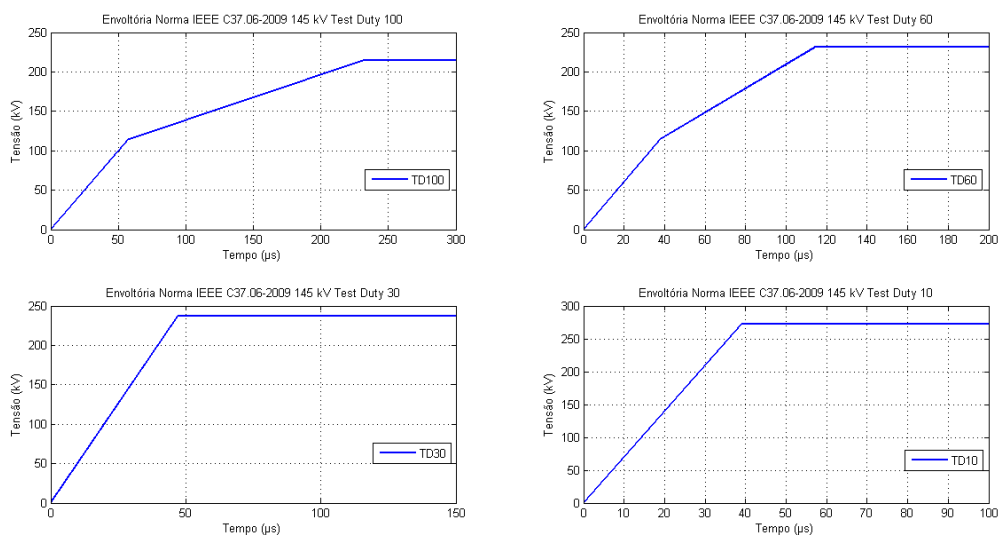
Figura 12 – Sistema-teste IEEE 30-barras.



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

Os parâmetros da norma IEEE C37.06-2009 foram utilizados para gerar as envoltórias. Todos seus dados podem ser vistos no Anexo B. A Figura 13 apresenta as envoltórias para classe de tensão de 145 kV e *Test Duties* T100, T60, T30 e T10, respectivamente.

Figura 13 – Envoltórias da norma.



Fonte: Autor.

As envoltórias foram geradas através do *software* Matlab®. Os valores da tensão são dados em Quilovolt (kV) e o tempo em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ). Para *Test Duties* T100 e T60 as envoltórias são de 4 parâmetros. Já para T30 e T10, estas são de dois parâmetros. A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados.

Tabela 2 – Parâmetros da norma.

$U_r$ kV, rms	Test duty	$u_1$ kV	$t_1$ $\mu\text{s}$	$u_c$ kV	$t_2$ $\mu\text{s}$	$t_3$ $\mu\text{s}$	$t_d$ $\mu\text{s}$	RRRV kV/ $\mu\text{s}$
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).

### 3.3 Casos Analisados

Os casos analisados para superação da TRT levaram em consideração as seguintes condições:

- Curto-circuito trifásico em 50% da linha;
- Curto-circuito fase-terra em 50% da linha;
- Curto-circuito trifásico próximo a um dos disjuntores da linha;
- Curto-circuito fase-terra próximo a um dos disjuntores da linha.

Para todos os casos a classe de tensão foi padronizada em 145 kV, com capacidades nominais de interrupção do disjuntor de 100%, 60%, 30% e 10%, pois o sistema-teste não apresenta essas informações. As linhas escolhidas foram as seguintes: 1-2, 6-28 e 8-28, pois, dentre as várias simulações feitas, estas apresentaram resultados preliminares mais promissores para o efeito comparativo.

A demonstração dos resultados é feita através da apresentação das formas de onda da TRT envoltas pelos valores da norma, sendo as fases apresentadas o primeiro polo a abrir. Para os curtos-circuitos, foi considerada a impedância de falta nula. Os dados de tensão da TRT foram obtidos através do sistema-teste IEEE 30-barras modelado em *software* ATPdraw. As fases utilizadas foram então exportadas para o *software* Matlab® e sincronizadas com as envoltórias da norma, assim gerando os gráficos da análise.

A análise da TCTRT para cada caso é feita através do detalhamento dos ciclos iniciais da TRT. A porção crescente da envoltória contempla a taxa de crescimento que a TRT deve respeitar. Quando essa porção da envoltória é violada, a superação por TCTRT acontece. Se a TRT ultrapassa a envoltória da norma em sua parte constante, a superação ocorre por pico da TRT.

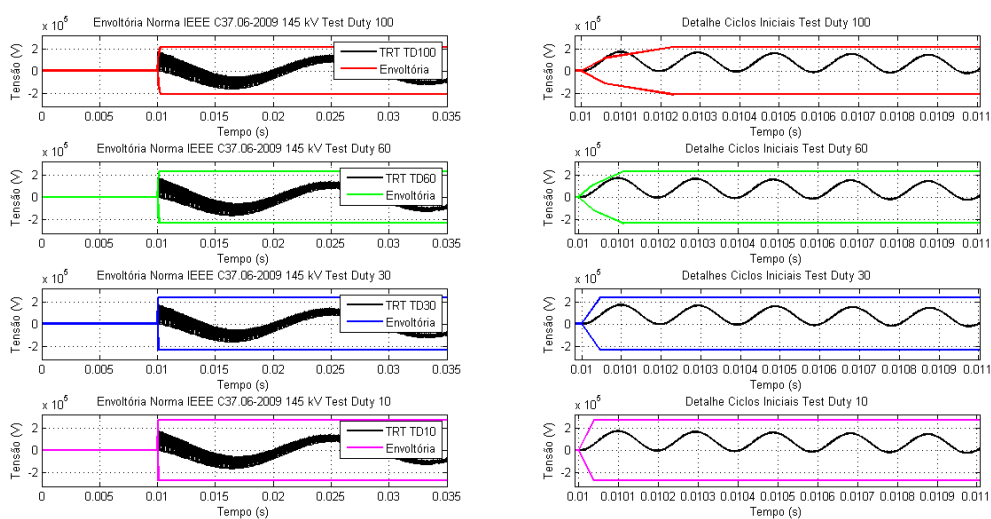
### 3.4 Caso 1: Curto-Circuito Trifásico em 50% da Linha

Nesse caso, a simulação foi feita com curto-circuito trifásico na metade da linha. Os dois disjuntores de cada linha foram analisados para todas as capacidades de interrupção previstas na norma. Os resultados de cada linha podem ser vistos a seguir.

#### 3.4.1 Linha 1-2

Os dois disjuntores nas extremidades da linha 1-2 foram analisados para curto-circuito trifásico em 50% da linha. A Figura 14 mostra a TRT envolta pela norma para *Test Duties* T100, T60, T30 e T10 para o disjuntor 1. Nota-se, no detalhe dos ciclos iniciais que a TCTRT extrapolou a envoltória da norma para T100, portanto, o disjuntor foi considerado sujeito à superação nesse parâmetro. Para T60, T30 e T10, não houve superação.

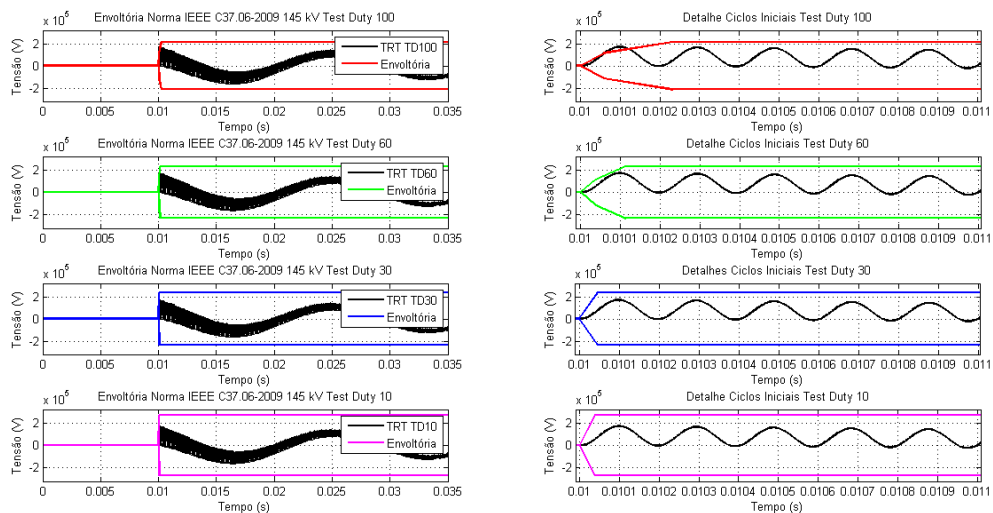
Figura 14 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 1.



Fonte: Autor.

Já a Figura 15 mostra a análise de superação para o disjuntor 2 da linha. Assim como aconteceu com o disjuntor 1, para capacidade de interrupção de corrente T100 houve a superação do disjuntor através da TCTRT, visto no detalhe dos ciclos iniciais. Para os demais *Test Duties*, não houve superação para esse disjuntor.

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



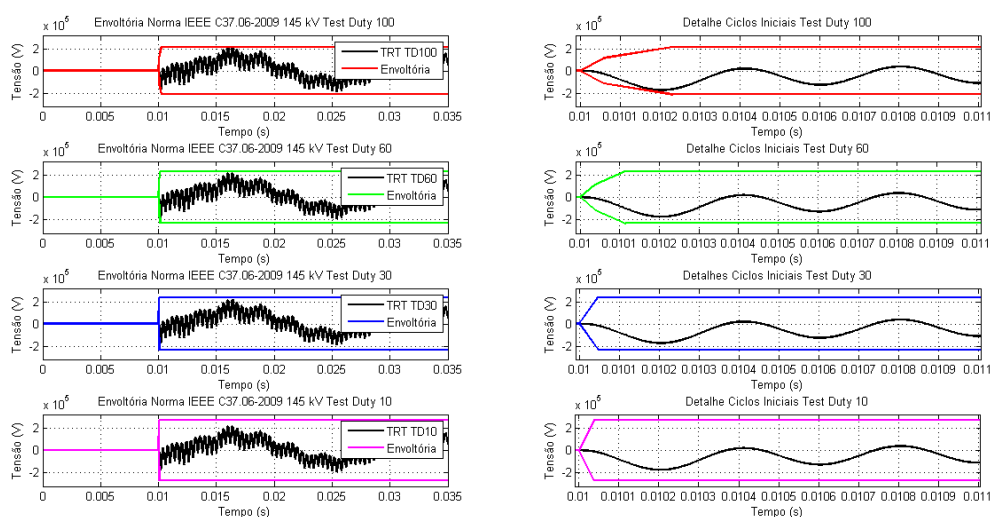
Fonte: Autor.

Para a linha 1-2, os dois disjuntores foram superados para *Test Duty* T100 através de sua TCTRT, porém, para as demais capacidades de interrupção, não houve superação.

### 3.4.2 Linha 6-28

Assim como na linha 1-2, os dois disjuntores nas extremidades da linha 6-28 foram analisados para curto-circuito trifásico em 50% da linha. A Figura 16 mostra a análise de superação do disjuntor 6 para todas as capacidades de interrupção previstas na norma. O pico TRT superou a envoltória da norma para *Test Duty* 100, portanto, o disjuntor foi superado para esse parâmetro. Para os demais *Test Duties*, não houve superação.

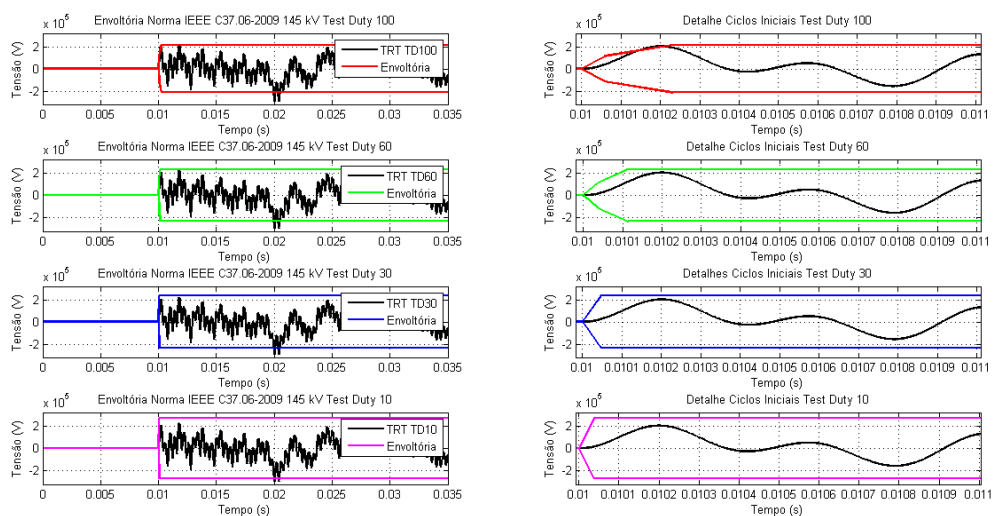
Figura 16 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 1.



Fonte: Autor.

A Figura 17 mostra a análise da superação por TRT para o disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 1. Todas as capacidades de interrupção do disjuntor foram violadas através do pico da TRT. Para *Test Duty* T100, a superação também ocorreu pela TCTRT demonstrada no detalhe dos ciclos iniciais da TRT.

Figura 17 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 1.



Fonte: Autor.

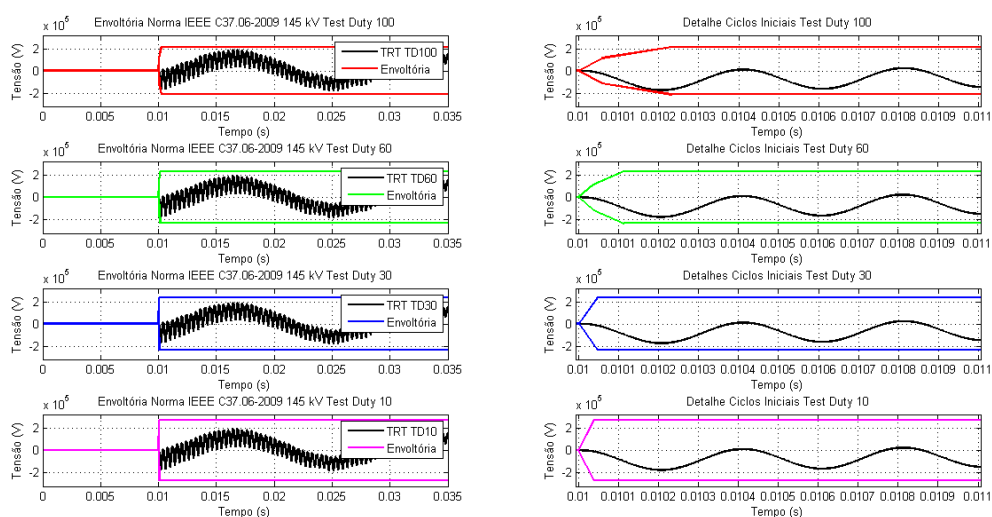
Os disjuntores da linha 6-28 para o caso 1 apresentaram resultados distintos. Enquanto o disjuntor 6 foi superado apenas para a capacidade de interrupção T100 através do pico da TRT, o disjuntor 28 violou a norma para todos os *Test Duties* pelo pico da TRT e, além disso, violou a TCTRT para T100.



### 3.4.3 Linha 8-28

Assim como ocorreu nas linhas anteriores, os dois disjuntores nas extremidades da linha 8-28 foram analisados para curto-circuito trifásico em 50% da linha. A Figura 18 apresenta os resultados da análise de superação por TRT para o disjuntor 8 para todos os *Test Duties* previstos na norma. A TRT não violou a norma em nenhum ponto, portanto, o disjuntor não foi superado para nenhuma capacidade de interrupção.

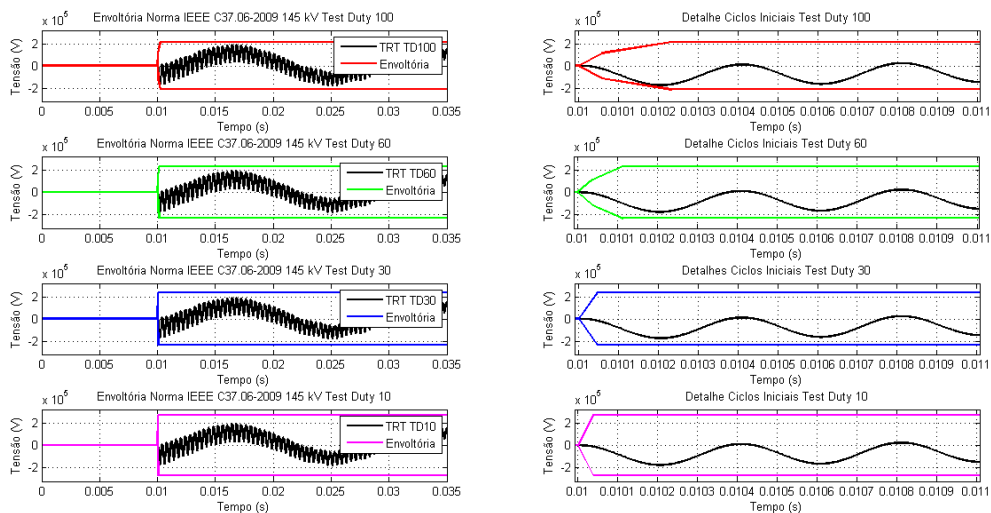
Figura 18 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 1.



Fonte: Autor.

A Figura 19 demonstra a análise de superação por TRT para o disjuntor 28 da linha 8-28. Assim como ocorreu com o disjuntor 8, não houve superação do disjuntor 28 para nenhuma capacidade de interrupção de  $I_{cc}$ .

Figura 19 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 1.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos para os dois disjuntores da linha 8-28 demonstraram que não houve superação para nenhum *Test Duty* para o caso 1 nessa linha.

Nesse primeiro caso para curto-circuito trifásico em 50% da linha, os disjuntores, em sua maioria, foram superados para corrente de curto-circuito próxima à capacidade de interrupção T100, e para valores menores de  $I_{cc}$ , T60, T30 e T10, essa tendência diminuiu. Foi possível observar que quando a capacidade de interrupção de  $I_{cc}$  T100 não é superada, os demais *Test Duties* (T60, T30 e T10) também não são.

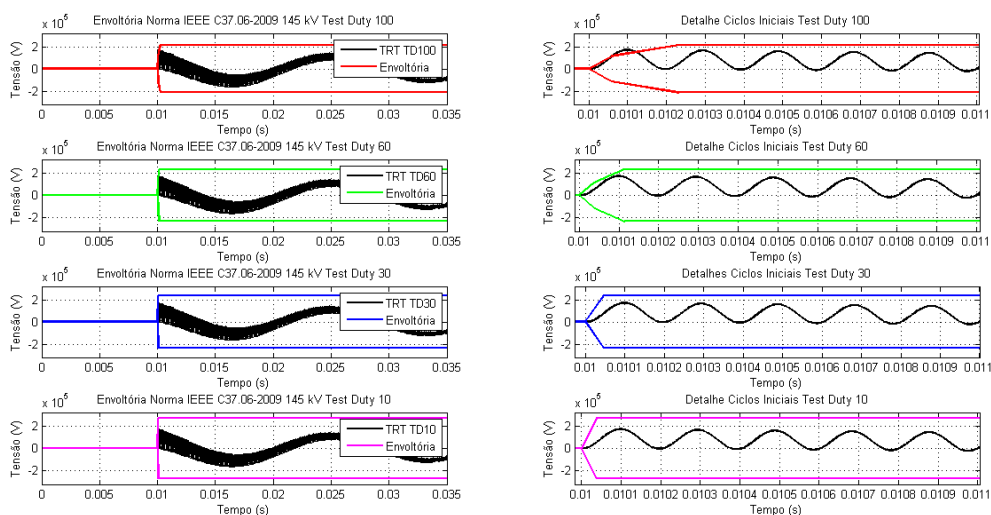
### 3.5 Caso 2: Curto-Circuito Fase-Terra em 50% da Linha

Nesse caso, a simulação foi feita com curto-circuito fase-terra na metade da linha, os dois disjuntores de cada linha foram analisados para todas as capacidades de interrupção previstas na norma. Os resultados de cada linha são mostrados a seguir.

#### 3.5.1 Linha 1-2

Os dois disjuntores nas extremidades da linha 1-2 foram analisados para curto-circuito fase-terra na metade da linha. A Figura 20 apresenta o resultado da análise de superação por TRT para o disjuntor 1 para todos os *Test Dutys* previstos na norma. Para capacidade de interrupção da Icc T100, o disjuntor foi superado através da TCTRT, demonstrada no detalhe dos ciclos iniciais da TRT. Para T60, T30 e T10, não houve superação.

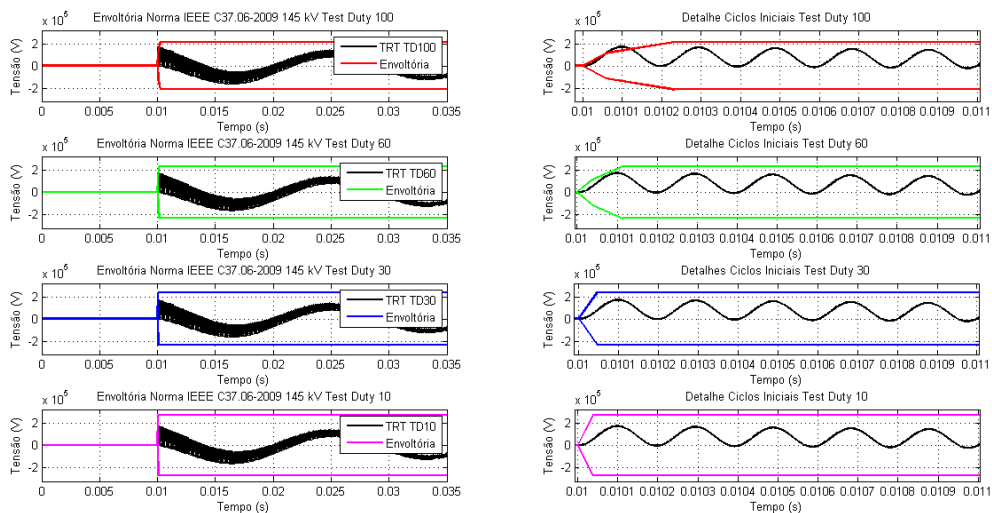
Figura 20 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 2.



Fonte: Autor.

A Figura 21 apresenta os resultados das análises de superação para o disjuntor 2 da linha. Assim como aconteceu com o disjuntor 1, apenas a TCTRT para capacidade de interrupção de Icc T100 foi violada. Para os demais *Test Duties* não houve superação do disjuntor.

Figura 21 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 2.



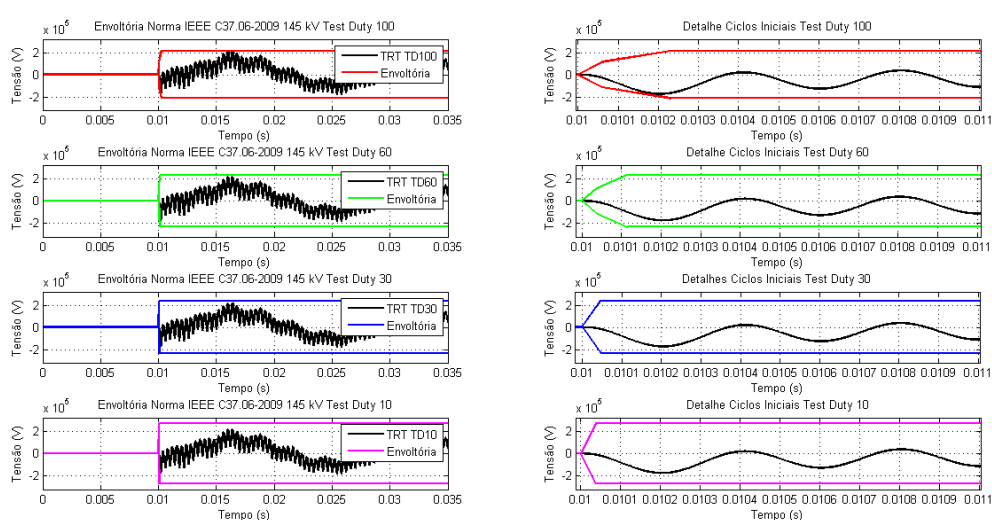
Fonte: Autor.

Os dois disjuntores da linha 1-2 apresentaram resultados similares para o segundo caso analisado nesse trabalho. Ambos foram superados para capacidade de interrupção de  $I_{cc}$  T100 através de sua TCTRT demonstrada nos ciclos iniciais da TRT.

### 3.5.2 Linha 6-28

Da mesma forma que ocorreu na linha 1-2, os dois disjuntores das extremidades da linha 6-28 foram analisados para curto-circuito fase-terra na metade da linha. A Figura 22 mostra o resultado da análise de superação por TRT para o disjuntor 6 para todas as capacidades de interrupção de Icc. Não houve superação do disjuntor em nenhum caso.

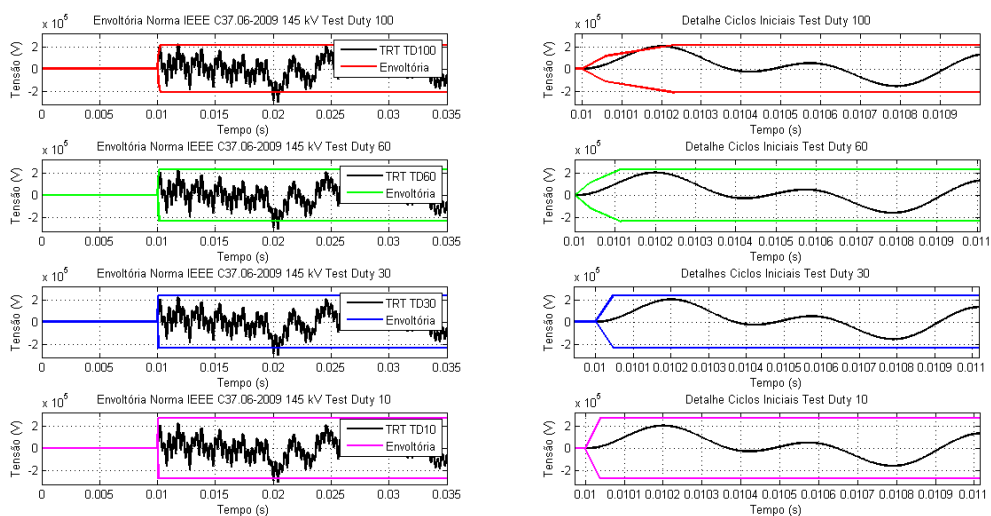
Figura 22 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 2.



Fonte: Autor.

Já a Figura 23 apresenta o resultado da análise de superação para o disjuntor 28 da linha 6-28. Ao contrário do que ocorreu com o disjuntor 6, o disjuntor 28 foi superado para todas as capacidades de interrupção de Icc previstas na norma. O pico da TRT violou todos os *Test Duties*, enquanto a TCTRT foi violada para T100, como demonstrado no detalhe dos ciclos iniciais da TRT.

Figura 23 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 2.



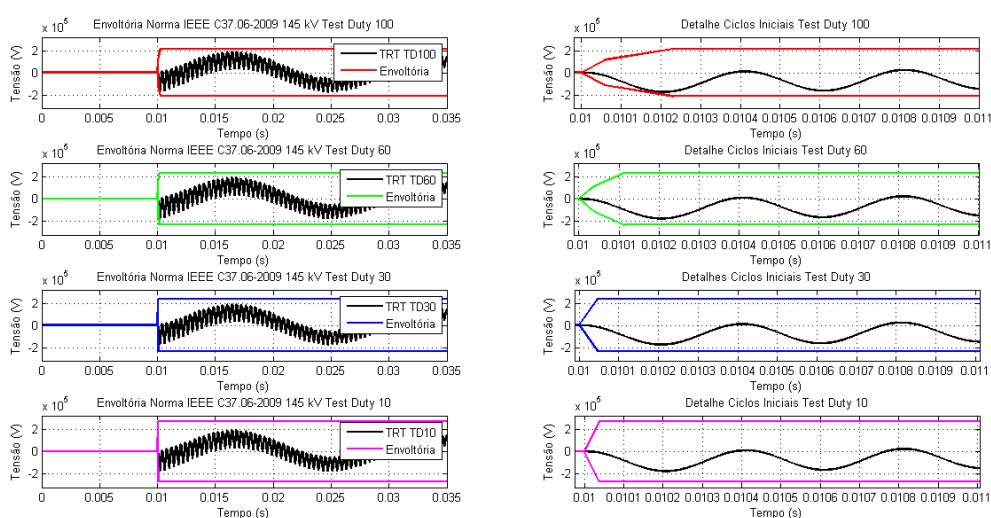
Fonte: Autor.

Os disjuntores da linha 6-28 para o caso 2 apresentaram resultados distintos. O disjuntor 6 não foi superado para nenhum *Test Duty*, enquanto os resultados do disjuntor 28 demonstraram a superação para todas as capacidades de interrupção de lcc.

### 3.5.3 Linha 8-28

Como feito nas linhas anteriores, os dois disjuntores nas extremidades da linha 8-28 foram analisados para curto-circuito fase-terra na metade da linha. A Figura 24 mostra o resultado da análise de superação por TRT do disjuntor 8 para todos os *Test Duties* previstos na norma. A forma de onda da TRT não superou a envoltória em nenhum ponto, portanto o disjuntor não foi superado para nenhum desses casos.

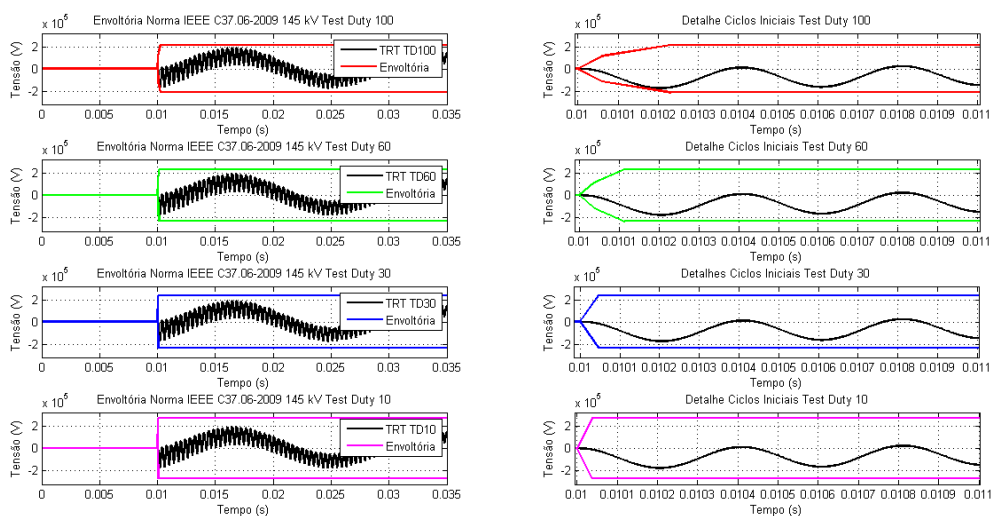
Figura 24 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 2.



Fonte: Autor.

A figura 25 demonstra o resultado da análise de superação para o disjuntor 28 da linha 8-28. Assim como ocorreu com o disjuntor 8, a envoltória da norma não foi violada em nenhum ponto para nenhuma capacidade de interrupção de  $I_{cc}$ . O disjuntor 28 não foi superado para o caso 2.

Figura 25 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 2.



Fonte: Autor.

Os disjuntores da linha 8-28 para curto-circuito fase-terra em 50% da linha, não violaram a norma em nenhum aspecto, portanto, não foram considerados superados.

No caso 2, como aconteceu no primeiro, os disjuntores tenderam a ser superados para corrente de curto-circuito próxima à capacidade de interrupção T100. Já para valores menores de  $I_{cc}$ , T60, T30 e T10, essa tendência diminuiu. A mesma observação acerca da superação do *Test Duty* T100 pode ser observada, pois quando como se trata da maior capacidade de interrupção, conseqüentemente as demais não serão superadas.



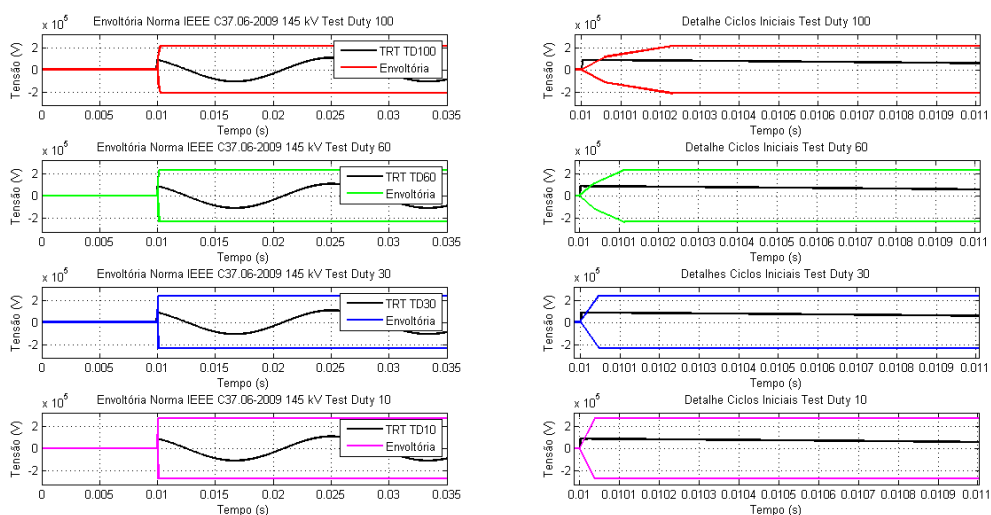
### 3.6 Caso 3: Curto-Circuito Trifásico próximo a um Disjuntor

Nesse caso, a simulação foi feita com curto-circuito trifásico próximo a um dos disjuntores da linha, os dois disjuntores de cada linha foram analisados para todas as capacidades de interrupção previstas na norma. Os resultados de cada linha podem ser vistos a seguir.

#### 3.6.1 Linha 1-2

Os dois disjuntores nas extremidades da linha 1-2 foram analisados para curto-circuito trifásico próximo ao disjuntor 1 da linha. A Figura 26 apresenta o resultado da análise de superação por TRT do disjuntor 1 para todas as capacidades de interrupção de lcc previstas na norma. O disjuntor foi superado por sua TCTRT para todos os *Test Duties*, como pode ser visto no detalhe dos ciclos iniciais da TRT.

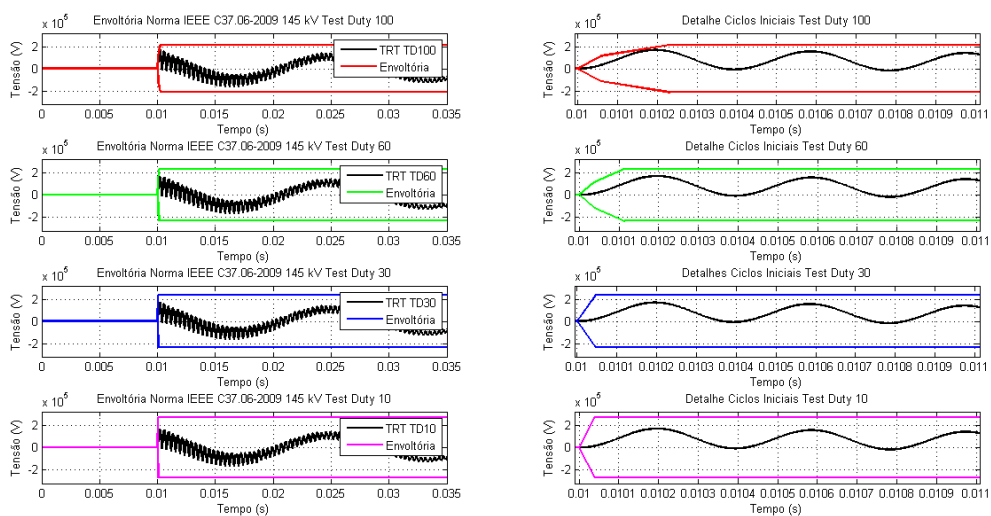
Figura 26 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 3.



Fonte: Autor.

A Figura 27 apresenta o resultado da análise da superação por TRT do disjuntor 2 da linha 1-2. Ao contrário do que ocorreu com o disjuntor 1, o disjuntor 2 não foi superado para nenhum *Test Duty*.

Figura 27 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 3.



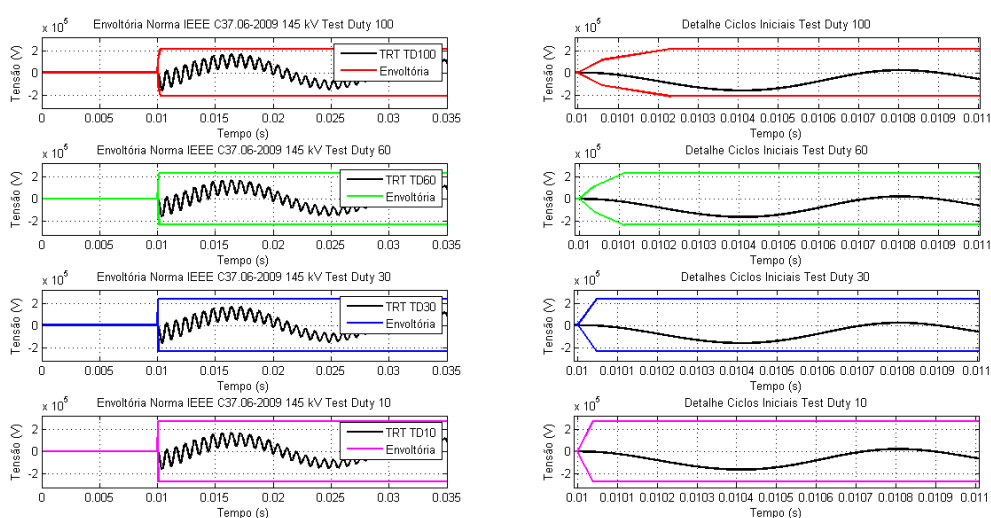
Fonte: Autor.

Os disjuntores da linha 1-2 apresentaram resultados diferentes para o caso 3. Enquanto o disjuntor 1 foi superado para todas as capacidades de interrupção de  $I_{cc}$  previstas em norma, o disjuntor 2 não apresentou superação.

### 3.6.2 Linha 6-28

Assim como na linha 1-2, os dois disjuntores nas extremidades da linha 6-28 foram analisados para curto-circuito trifásico próximo ao disjuntor 28 da linha. A Figura 28 apresenta o resultado da análise de superação do disjuntor 6 para todos os *Test Dutys* previstos na norma. A TRT não violou a norma em nenhum ponto, portando o disjuntor não foi superado para esse caso.

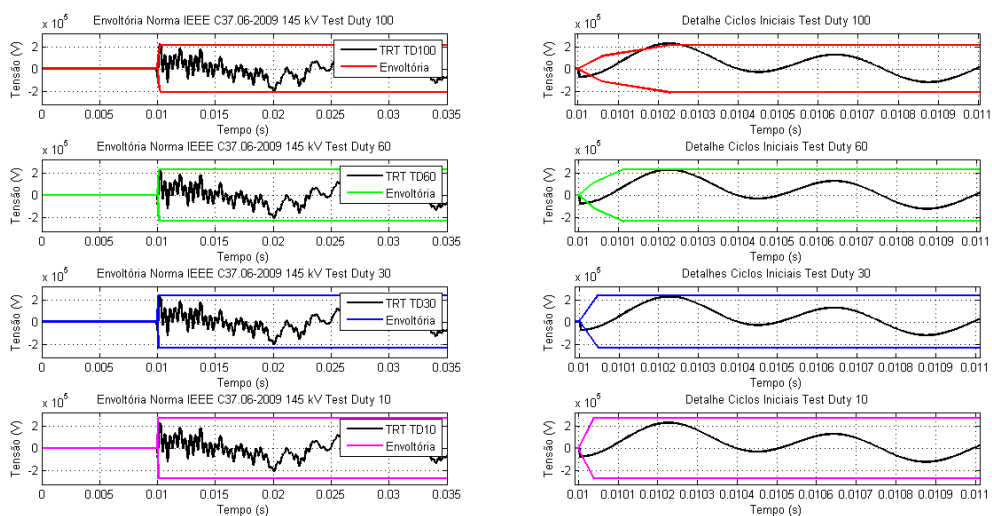
Figura 28 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 3.



Fonte: Autor.

Já a Figura 29 demonstra o resultado da análise de superação por TRT do disjuntor 28 da linha para todas as capacidades de interrupção da corrente de  $I_{cc}$ . Os resultados apontam para a superação do disjuntor para todos os *Test Dutys* através de sua TCTRT, demonstrada nos detalhes do ciclo inicial da TRT. Para *Test Duty* T100 o pico da TRT violou a envoltória da norma.

Figura 29 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 3.



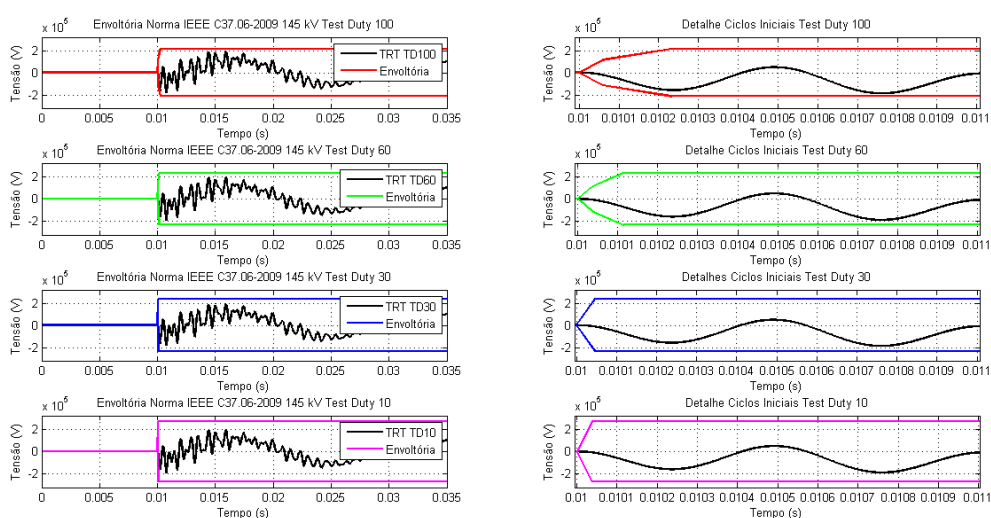
Fonte: Autor.

Para o caso 3, os disjuntores da linha 6-28 apresentaram resultados distintos. O disjuntor 6 não foi superado para nenhum *Test Duty*, enquanto o disjuntor 28 superou a TCTRT para todas as capacidades de interrupção de  $I_{cc}$  previstas na norma.

### 3.6.3 Linha 8-28

Como nas linhas anteriores, os dois disjuntores nas extremidades da linha 8-28 foram analisados para curto-circuito trifásico próximo ao disjuntor 28 da linha. A Figura 30 mostra o resultado da análise de superação do disjuntor 8 para todos os *Test Duties* previstos na norma. A envoltória da norma não foi violada em nenhum ponto, portanto, o disjuntor não foi superado.

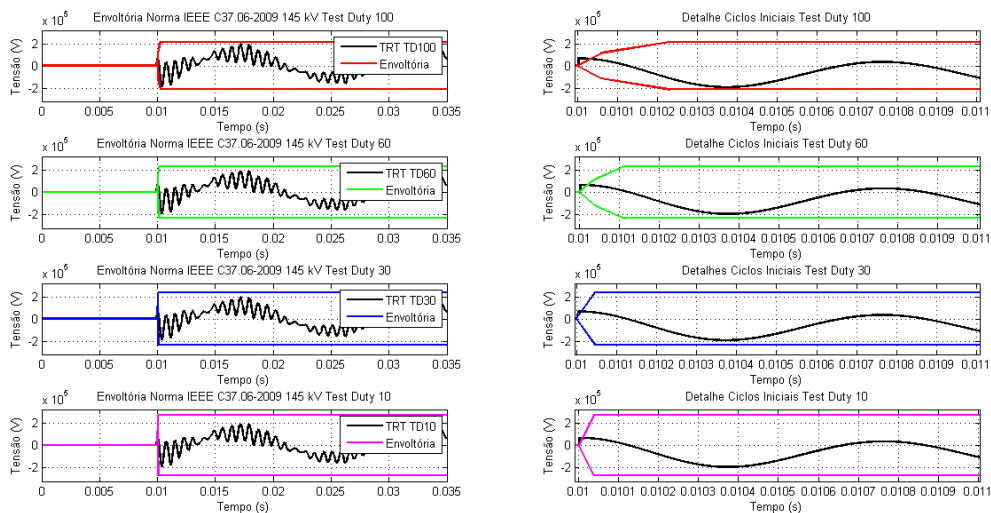
Figura 30 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 3.



Fonte: Autor.

A Figura 31 apresenta o resultado da análise da superação por TRT do disjuntor 28 da linha para todas as capacidades de interrupção de  $I_{cc}$ . Os gráficos demonstram que o disjuntor foi superado para todas essas capacidades de interrupção, através da TCTRT, demonstrada no detalhe dos ciclos iniciais da TRT.

Figura 31 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 3.



Fonte: Autor.

O disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 3 não foi superado em nenhum parâmetro, já o disjuntor 28 teve sua TCTRT violada, configurando a superação do dispositivo.

Nesse terceiro caso, os disjuntores foram, em sua maioria superados para corrente de curto-circuito próxima à capacidade de interrupção T100, e para valores menores de  $I_{cc}$ , T60, T30 e T10, houve um aumento no número de disjuntores superados. Os disjuntores próximos da falta foram mais exigidos e conseqüentemente, mais susceptíveis à superação.

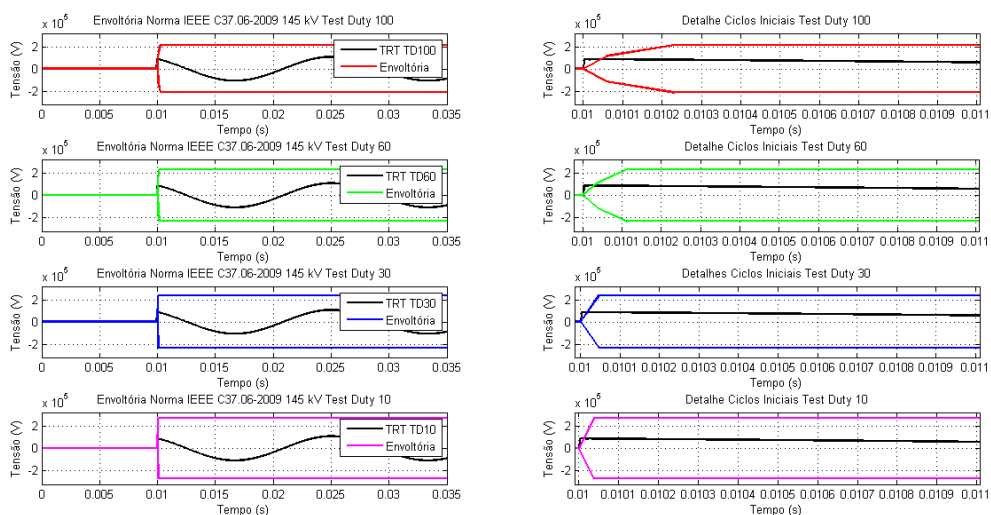
### 3.7 Caso 4: Curto-Circuito Fase-Terra próximo a um Disjuntor

Nesse caso, a simulação foi feita com curto-circuito fase-terra próximo a um dos disjuntores da linha, os dois disjuntores de cada linha foram analisados para todas as capacidades de interrupção previstas na norma. Os resultados de cada linha são mostrados a seguir.

#### 3.7.1 Linha 1-2

Os dois disjuntores nas extremidades da linha 1-2 foram analisados para curto-circuito fase-terra próximo ao disjuntor 1 da linha. A Figura 32 apresenta o resultado da análise de superação por TRT do disjuntor 1 para todas as capacidades de interrupção de  $I_{cc}$ . A norma foi violada através da TCTRT para todos os parâmetros, como pode ser visto no detalhe dos ciclos iniciais da TRT. O disjuntor 1, portanto, foi superado.

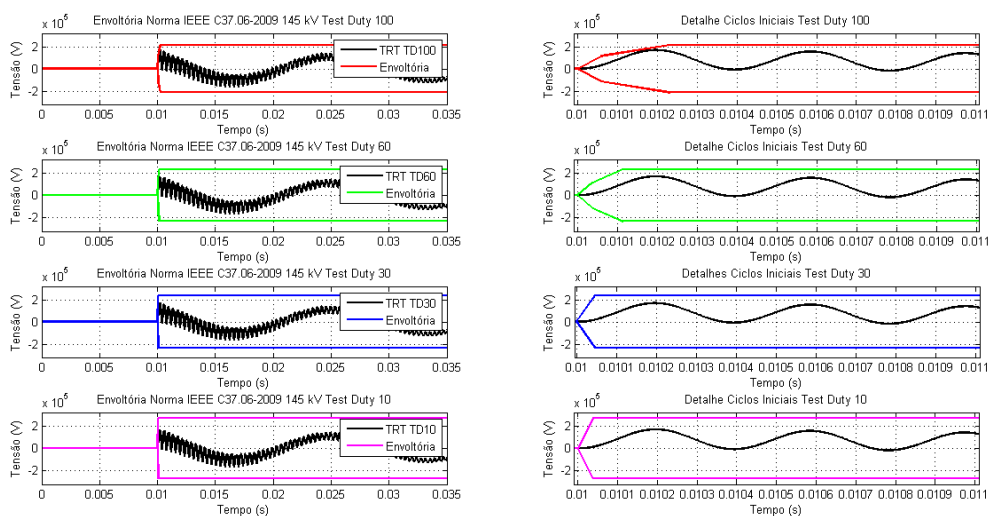
Figura 32 – Análise de superação do disjuntor 1 da linha 1-2 para o caso 4.



Fonte: Autor.

A Figura 33 mostra o resultado da análise de superação do disjuntor 2 da linha, para todos os *Test Duties* previstos na norma. Em nenhum ponto a forma de onda da TRT violou a envoltória da norma, portanto, o disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 4 não foi superado.

Figura 33 – Análise de superação do disjuntor 2 da linha 1-2 para o caso 4.



Fonte: Autor.

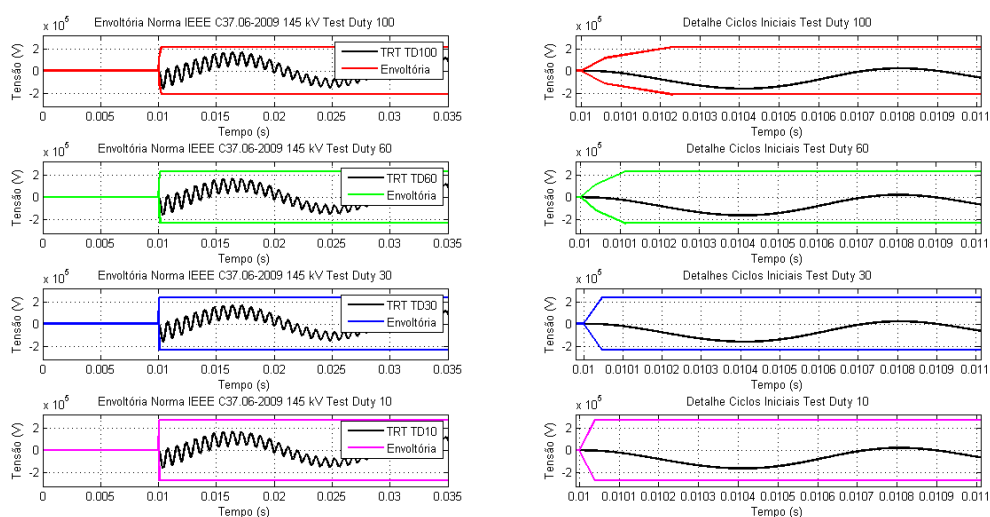
Os disjuntores da linha 1-2 para o caso 4 apresentaram resultados diferentes. O disjuntor 1 foi superado através de sua TCTRT para todas as capacidades de interrupção de  $I_{cc}$ , enquanto o disjuntor 2 não violou a norma em nenhum ponto.



### 3.7.2 Linha 6-28

Da mesma forma que ocorreu com a linha 1-2, os dois disjuntores nas extremidades da linha 6-28 foram analisados para curto-circuito fase-terra próximo ao disjuntor 28 da linha. A Figura 34 apresenta o resultado da análise da superação por TRT do disjuntor 6 para todos os *Test Duties* da norma. Através dos gráficos, é possível perceber que a envoltória da norma não foi violada em nenhum dos parâmetros, portanto, o disjuntor não foi superado.

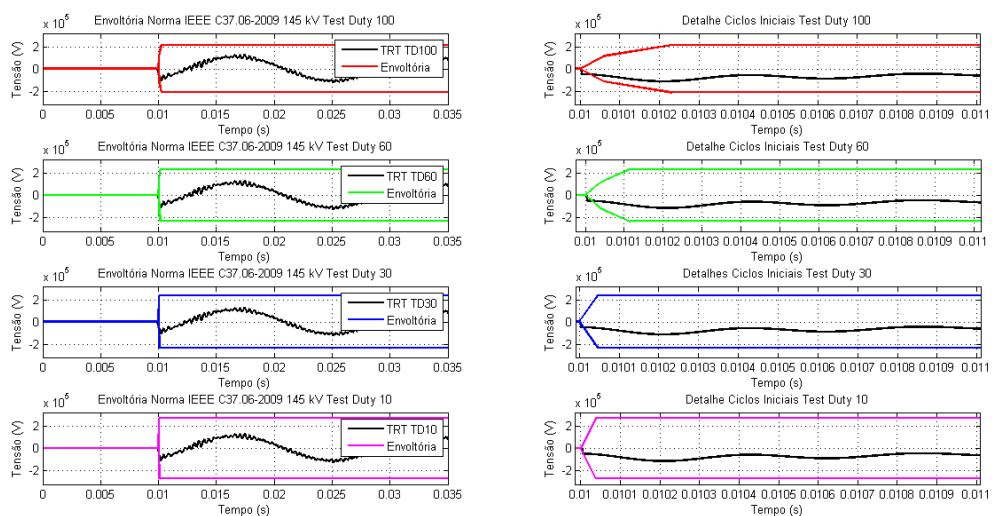
Figura 34 – Análise de superação do disjuntor 6 da linha 6-28 para o caso 4.



Fonte: Autor.

Já a Figura 35 mostra o resultado da análise de superação do disjuntor 28 da linha para todas as capacidades de interrupção da  $I_{cc}$  previstas na norma. O disjuntor 28 foi superado para todos os *Test Duties* através da TCTRT, que pode ser observada no detalhe dos ciclos iniciais da TRT. Portanto, o disjuntor é considerado superado.

Figura 35 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 6-28 para o caso 4.



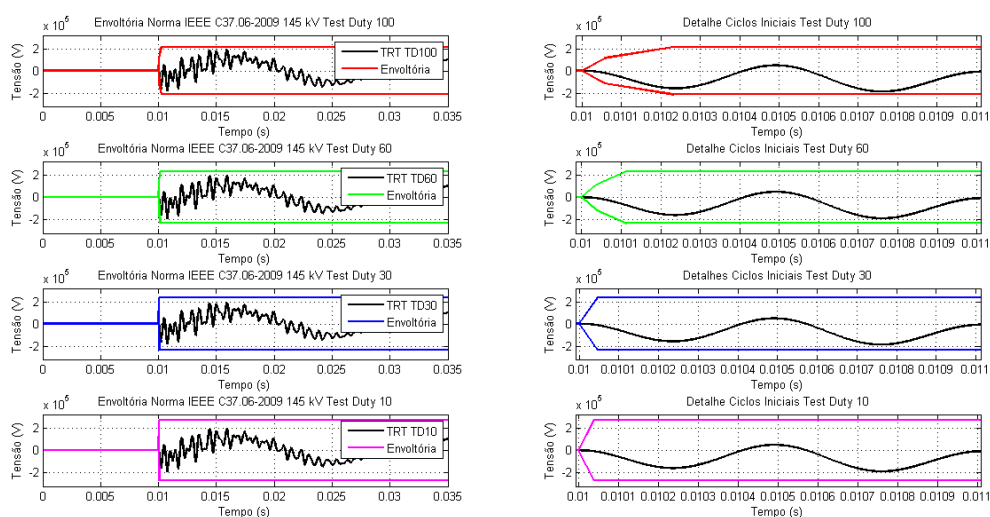
Fonte: Autor.

Os resultados das análises dos disjuntores da linha 6-28 para esse caso 4 foram distintos. Enquanto o disjuntor 6 não apresentou nenhuma superação dos parâmetros, o disjuntor 28 foi superado para todas as capacidades de interrupção de lcc.

### 3.7.3 Linha 8-28

Assim como nas linhas anteriores, os dois disjuntores nas extremidades da linha 8-28 foram analisados para curto-circuito fase-terra próximo ao disjuntor 28 da linha. A Figura 36 demonstra o resultado da análise de superação por TRT do disjuntor 8, para todas as capacidades de interrupção de Icc previstas na norma. Como pode ser observado nos gráficos, a envoltória da norma não foi violada em nenhum ponto, portanto, o disjuntor 8 não foi superado para o caso 4.

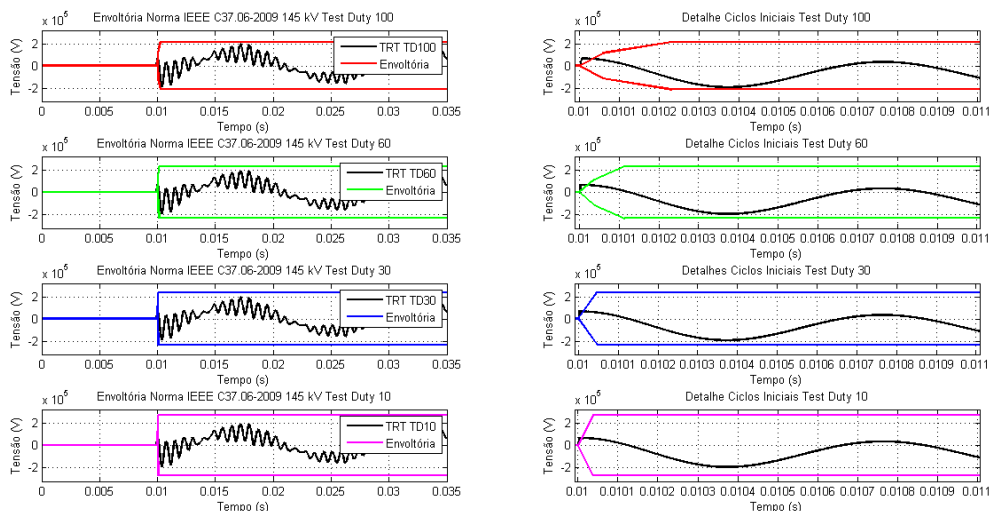
Figura 36 – Análise de superação do disjuntor 8 da linha 8-28 para o caso 4.



Fonte: Autor.

A Figura 37 apresenta o resultado da análise de superação para o disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 4. Todas as capacidades de interrupção de Icc previstas na norma foram consideradas. Através da observação do detalhe dos ciclos iniciais da TRT é possível perceber que houve a superação da TCTRT para todos os *Test Duties*. Portanto, o disjuntor 28 é considerado superado.

Figura 37 – Análise de superação do disjuntor 28 da linha 8-28 para o caso 4.



Fonte: Autor.

Os disjuntores da linha 8-28 para o caso 4 apresentaram resultados opostos. Enquanto o disjuntor 8 não foi superado em nenhum parâmetro, o disjuntor 28 foi superado por TCTRT para todas as capacidades de interrupção de  $I_{cc}$ .

Nesse quarto caso, assim como no terceiro caso, os disjuntores tendem a ser superados para corrente de curto-circuito próxima à capacidade de interrupção T100, e para valores menores de  $I_{cc}$ , T60, T30 e T10, houve um aumento no número de disjuntores superados, principalmente os disjuntores próximos do ponto onde a falta ocorre.

### 3.8 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentadas as simulações para as análises de superação de disjuntores por TRT. Através da modelagem do sistema-teste IEEE 30-barras em *software* ATP, foi possível variar as condições dos casos estudados e comparar seus resultados às envoltórias da norma IEEE C37.06-2009.

As diferenças nas condições de análise demonstraram a influência das faltas elétricas trifásicas e fase-terra em pontos distintos do sistema, contribuindo diretamente no resultado da superação dos disjuntores por TRT. Além disso, as variações de *test duty* previstos na norma mostraram a influência da capacidade de interrupção da corrente de curto-circuito dos disjuntores nos processos de interrupção destes dispositivos.

## 4 CONCLUSÃO

Devido ao crescimento do SEP, a análise de superação de disjuntores é de extrema importância para a confiabilidade do sistema elétrico. A superação de disjuntores por tensão de restabelecimento transitória é uma das formas mais usuais de estudo das capacidades de interrupção desses dispositivos, contribuindo para seu correto dimensionamento.

Este trabalho apresentou um estudo de caso da superação de disjuntores por TRT, com o objetivo de comparar as diferenças dos resultados para faltas em pontos distintos do sistema e variações da capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito (*test duty*). As simulações da TRT foram geradas através da interface gráfica do *software* ATP e comparadas com as envoltórias da norma IEEE C37.06-2009.

As simulações demonstraram a relação entre os tipos de falta e a superação por TRT, além disso, o ponto onde essas faltas ocorre também foi determinante. Os parâmetros da norma também causam impacto na superação de disjuntores por TRT, especialmente o *Test Duty* selecionado. Os resultados apresentados mostraram que quando a capacidade de interrupção de Icc T100 não era superada, consequentemente as capacidades T60, T30 e T10 também não eram. Além disso, os disjuntores próximos ao ponto da falta foram mais susceptíveis a sofrer superação.

Através desse estudo de caso, foi possível compreender a importância da análise da superação de disjuntores por TRT. Devido às características peculiares de cada sistema, essas análises podem ser de grande complexidade, exigindo um levantamento completo dos dados do sistema e leitura precisa dos parâmetros da norma.

#### **4.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Após a realização de uma pesquisa e o levantamento bibliográfico sobre determinado tema, novas perspectivas surgem acerca do mesmo assunto. Ficam as sugestões para pesquisas futuras:

- Simulação de superação de disjuntores por TRT para casos reais;
- Investigar ações mitigadoras para redução da TCTRT e o pico da TRT neste sistema;
- Simular o mesmo sistema para diferentes tipos de falta, modelagens de cargas e linhas.

## REFERÊNCIAS

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 janeiro de 2021.

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.

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.

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.

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.

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



## ANEXOS

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

As tabelas A.1 a 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.

<b>Gerador</b>	<b>Tensão (kV)</b>
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 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  $k_{fp} = 1.3$  at T100 1<sup>a</sup>**

Line No.	Standard values of TRV represented by four parameters (test duties T100, T60) and two parameters (test duties T30, T10).											
	Rated maximum voltage (1) $U_r$ , rms kV	Test duty	Amplitude factor $k_{af}$ p.u.	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	Voltage $u'$ kV	Time (5) $t'$ $\mu$ s	RRRV $u_1/t_1$ or $u_c/t_3$ kV/ $\mu$ s
	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12
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).