

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**WELLINGTON DA SILVA BENITES**

**SIMULAÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA  
MODELAGEM DE LINHA CURTA, MÉDIA E LONGA**

**Alegrete - RS**

**2021**

**WELLINGTON DA SILVA BENITES**

**SIMULAÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA  
MODELAGEM DE LINHA CURTA, MÉDIA E LONGA**

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) .

B467s Benites, Wellington da Silva

Simulação de Tensão de Restabelecimento Transitória  
em Disjuntores de Alta Tensão: Avaliação dos Efeitos da  
Modelagem de Linha curta, Média e Longa / Wellington da  
Silva Benites.

58 p.

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

"Orientação: Chrystian Dalla Lana da Silva".

1. Disjuntores de alta tensão. 2. Tensão de restabe-  
lecimento transitória. 3. Modelagem de linhas. I. Títu-  
lo.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**WELLINGTON DA SILVA BENITES**

**SIMULAÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO:  
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA MODELAGEM DE LINHA CURTA, MÉDIA E LONGA**

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. Eduardo Machado dos Santos  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHRYSIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2021, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE WAGNER MACIEL KAEHLER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2021, às 18:11, 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 20:50, 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 **0510189** e o código CRC **258495F4**.

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 especialmente aos meus familiares mais próximos, pois é graças a força, ajuda, e suporte deles, não medindo esforços para me fazer alcançar meus objetivos que foi possível chegar até esse momento.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, pelas bênçãos em minha vida, pelo presente que foi essa família maravilhosa que me apoia e contribui para meu crescimento pessoal todos os dias.*

*Agradeço em especial as quatro mulheres mais importantes da minha vida, que são minha mãe Marileuza Benites, minhas duas tias Eleiza Benites e Mirian Benites e minha avó Eva Rodrigues, sem apoio de vocês não seria possível a conclusão deste trabalho.*

*Aos meus tios Ricardo Menezes e Jonatan Silva, ao meu padrasto Réger Courtes e ao meu avô Odilon Benites pelo apoio, motivação e ajuda nesta jornada.*

*Aos meus irmãos Amistron Benites e Maria Benites, aos meus primos Carolina Benites, Mauricio Caldas e Miriani Benites pelas conversas e ajuda até aqui.*

*Ao meu orientador Chrystian, que foi de extrema importância neste trabalho, obrigado aos conhecimentos passados e trocas de ideia, com certeza não conseguiria a conclusão deste trabalho sem a ajuda deste grande mestre.*

*Aos meus amigos e colegas, pela parceria de sempre e ajuda em todos momentos em que foi necessário.*

*Também agradeço a instituição de ensino federal, UNIPAMPA e seus profissionais, com uma estrutura de ensino de níveis excelentes, com certeza esse conhecimento será de muita ajuda para os dias que estão por vir.*

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso desistir, pois para mim, vencer é nunca desistir.”

Albert Einstein

## RESUMO

A tensão de restabelecimento transitória (TRT) pode gerar falhas na interrupção de uma falta em disjuntores de alta tensão quando seus valores ultrapassam aos de taxa de crescimento ou valor de pico estabelecidos por norma. Neste trabalho, foram desenvolvidos estudos do comportamento da TRT para faltas monofásicas e trifásicas em linhas com modelo de linha curta, média e longa. As simulações se deram através do software ATP. Os resultados obtidos pelas simulações foram comparados aos valores padronizados para as envoltórias, conforme a norma IEEE C37.06, de forma a avaliar a influência da modelagem de linha na análise de superação do disjuntor. Esses estudos trazem conclusões sobre o efeito causado pelo tipo da modelagem da linha utilizado na análise da TRT de disjuntores.

**Palavras-Chave:** Disjuntores de alta tensão, tensão de restabelecimento transitória (TRT), modelagem de linhas;

## **ABSTRACT**

The transient reset voltage (TRV) can generate failures in the interruption of a fault in high voltage circuit breakers when their values exceed those of the growth rate or peak value established by norm. In this work, studies of the behavior of TRV for single and three-phase faults were developed in lines with a short, medium and long line model. The simulations took place using the ATP software. The results obtained by the simulations were compared to the standard values for the envelopes, according to the IEEE C37.06 standard, in order to assess the influence of line modeling on the breaker overrun analysis. These studies bring conclusions about the effect caused by the type of line modeling used in the analysis of circuit breakers TRV.

**Keywords:** High voltage circuit breakers, transient reset voltage (TRV), line modeling,

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processo de interrupção de corrente alternada.....	20
Figura 2 - Exemplo onde não ocorre superação.....	22
Figura 3 - Exemplo onde ocorre superação.....	23
Figura 4 – Disjuntor com tensão nominal menor que 100kV, com envoltória a 2 parâmetros.....	24
Figura 5 – Disjuntor com tensão nominal superior a 100kV, com envoltória a 4 parâmetros .....	24
Figura 6 - Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta.....	26
Figura 7 - Circuito equivalente de uma linha de transmissão média (Pi).....	27
Figura 8 – Circuito do modelo uma linha de transmissão longa.....	29
Figura 9 – Sistema Teste.....	32
Figura 10 – Configuração utilizada nas simulações .....	32
Figura 11.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma .....	33
Figura 11.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	34
Figura 12a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma .....	34
Figura 12.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	35
Figura 13.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma .....	35
Figura 13.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	36
Figura 14.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma .....	36
Figura 14.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	37
Figura 15.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma.....	37
Figura 15.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	38
Figura 16.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma.....	38
Figura 16.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	39
Figura 17.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma .....	40
Figura 17.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	40
Figura 18.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma .....	41
Figura 18.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	41
Figura 19.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha	

pi e sua envoltória definida pela norma.....	42
Figura 19.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	42
Figura 20.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma.....	43
Figura 20.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	43
Figura 21.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma.....	44
Figura 21.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	45
Figura 22.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma .....	45
Figura 22.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	46
Figura 23a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma .....	46
Figura 23.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	47
Figura 24.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma .....	47
Figura 24.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	48
Figura 25.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma.....	48
Figura 25.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	49
Figura 26.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma.....	49
Figura 26.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros das envoltórias para tensão nominal de 245kV.....	25
Tabela A1- Dados de linha em pu.....	56
Tabela A2 – Dados dos geradores.....	56
Tabela A3 – Dados dos transformadores.....	56
Tabela A4 – Dados de carga.....	57

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

TRT - Tensão de Restabelecimento Transitória

ATP - Alternative Transient Program

TRV - Transient Recovery Voltage

TCTRT - Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Considerações gerais .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Motivação.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Revisão bibliográfica .....</b>	<b>16</b>
<b>1.5 Estrutura do trabalho.....</b>	<b>18</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Considerações gerais .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Disjuntores.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1 Definição .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 Funcionamento.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Tensão de restabelecimento transitória .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.1 Descrição e características do fenômeno.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2 Superação de disjuntores por TRT .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 Normas .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Modelagem de linhas .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.1 Modelo de Linha Curta.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.2 Modelo de linha média (Pi) .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.3 Modelo de linha longa (Parâmetros distribuídos) .....</b>	<b>28</b>
<b>2.6 Considerações Finais .....</b>	<b>30</b>
<b>3 METODOLOGIA, SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Considerações Gerais.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Sistema Teste .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Curto-circuito na linha 3-5 (regime de operação T100).....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.1 Falta monofásica para modelagem de linha curta, linha pi e parâmetros distribuídos.....</b>	<b>33</b>

3.3.2 Falta trifásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos. ....	36
3.4 Curto-circuito na linha 7-9 (regime de operação T30).....	39
3.4.1 Falta monofásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos. ....	39
3.4.2 Falta trifásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos. ....	41
3.5 Curto-circuito na linha 6-8 (regime de operação T60).....	44
3.5.1 Falta monofásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos. ....	44
3.5.2 Falta trifásica para modelagem de Linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos. ....	47
3.6 Considerações finais .....	50
4 CONCLUSÕES .....	52
4.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	52
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXOS .....	56

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações gerais

Atualmente, países que estão em desenvolvimento têm apresentado um aumento elevado no consumo de energia. A maior disponibilidade e utilização cada vez mais presente no dia-a-dia das pessoas e das indústrias, bem como o aprimoramento dos equipamentos mais eficientes, implicam no aumento de discussões de assuntos relacionados à qualidade na energia elétrica.

O desenvolvimento da tecnologia e automação industrial fizeram com que aparecessem no mercado dispositivos e equipamentos que têm uma tendência a serem mais sensíveis às perturbações. Uma das perturbações são as sobretensões, e dentre elas as nomeadas TRT's (Tensão de restabelecimento transitória), que surge entre os terminais do disjuntor após a interrupção da corrente de falta.

Equipamentos elétricos de manobra, como disjuntores, sempre devem ser dimensionados de modo a suportar as correntes de carga e de curto-circuito. Esse dispositivo é o principal responsável por resguardar as instalações elétricas do sistema. Quando submetidos a um aumento na solicitação elétrica, os mesmos podem chegar à superação.

### 1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é avaliar os efeitos das diferentes representações de modelos de linhas de transmissão na tensão de restabelecimento transitória em disjuntores. Os objetivos específicos do trabalho são:

- Simulação do sistema teste para os modelos de linha curta (modelo série), média (modelo pi equivalente) e longa (modelo de parâmetros distribuídos) na plataforma do software ATPDraw;
- Geração das envoltórias na plataforma do software Matlab seguindo a norma da IEEE C37.06;
- Comparação das formas de onda e verificação do erro comparado com o modelo de parâmetros distribuídos;
- Comparação das formas de onda com as envoltórias da norma IEEE C37.06

para determinação de superação por TRT.

### **1.3 Motivação**

O sistema elétrico brasileiro está sempre em constante crescimento e, assim, fica cada vez mais interligado e complexo. Este aumento constante, somados a estudos de médio e longo prazo de efeitos de curto-circuito e transitórios elétricos nos disjuntores de alta tensão, leva a uma importância cada vez maior de conhecimentos que permitam uma análise mais aprofundada desses conceitos.

Visualizar as características da tensão de restabelecimento transitória em disjuntores de alta tensão é um fator considerável para o Sistema Interligado Nacional (SIN), pois a TRT é um dos fatores de superação comum nesses disjuntores. Deste modo, é necessário ter conhecimento do sistema elétrico e de fatores que causam essa superação dos equipamentos, para que a escolha na especificação de disjuntores seja correta, o que trará uma melhoria no desempenho do sistema como um todo.

Analisando esses pontos, faz-se necessário que se tenha um domínio do conhecimento na representação, simulação e análise do comportamento do sistema necessário para especificação dos disjuntores de alta tensão. O software ATP é uma ferramenta bastante utilizada há bastante tempo, assim, como simulações de linhas transmissão em sua plataforma. Geralmente, são utilizados modelos de linha curta para as simulações de sistemas elétricos, ou, no máximo modelo de linha média. A modelagem de linha longa não é muito utilizada, logo, o trabalho pretende utilizar os três tipos de modelo de linha afim investigar a influência e as diferenças dos modelos quanto a análise da TRT.

### **1.4 Revisão bibliográfica**

Nesta seção, são apresentadas visões de autores de artigos, teses e também algumas normas sobre o tema abordado, e que foram de extrema importância para finalização desse Trabalho.

Wagner e Smith (1984), após vários eventos que, na prática, apresentaram comportamentos diferentes do esperado. Descobriram que a tensão após a interrupção da corrente elétrica tinha uma natureza oscilatória transitória. Essa

descoberta gerou vários estudos e investigações em diferentes pontos do mundo para determinação da TRT. O intuito era a padronização da análise da TRT.

Nobre (1999) fez um estudo para reavaliação dos disjuntores de 15kV, obtendo as formas de onda através de simulações digitais. Foi feita uma análise dos parâmetros da TRT, comparados com os valores estabelecidos nas normas técnicas. O trabalho foi um estudo inicial. Ele concluiu que a instalação de células capacitivas nos terminais do disjuntor foi bastante viável para reduzir as taxas de crescimento da TRT (TCTRT).

Sinder (2007) propôs um método que utiliza transformadas rápidas de Fourier para o cálculo da TRT em disjuntores de alta tensão. Ele investiga os métodos de cálculos de TRT que permitem obtenção de resultados similares aos calculados com o programa ATP, a fim de viabilizar a detecção da superação de disjuntores por TRT.

Alves (2012) apresenta um trabalho cujo o tema são as TRT's, dissertando sobre as sobretensões dos sistemas elétricos, os impactos nos equipamentos, bem como a superação de disjuntores. Foram verificados no trabalho que problemas de superação de TRT são capazes de comprometer a isolação dos equipamentos elétricos, reduzindo a vida útil. Foi concluído que a solução para o problema pode ser resolvida com a substituição do disjuntor que tenha as características adequadas para que não haja superação.

Fenocchio (2013) verificou diferentes modelagens de transformador em regime transitório, analisando a TRT no disjuntor da subestação.

Oliveira Preto e Zanetta Junior (2017) trabalharam com o cálculo da taxa de crescimento da TRT levando em consideração o caso de ocorrência de falta na barra. Não utilizaram simulações, devido ao fato de que em algumas condições poderiam ocorrer erros de oscilação e imprecisões numéricas.

De moura (2018) realizou uma avaliação da solicitação de disjuntores da linha de transmissão de pouco mais de meio metro de comprimento de onda. No trabalho foram realizadas simulações de TRT para diferentes tipos de falta, com abertura da linha à vazio. Foram analisadas também rejeições da carga. Durante as avaliações, notou-se que os valores de TRT são consideravelmente inferiores aos limites do disjuntor e que as faltas que geraram maior solicitação ao disjuntor foram as monofásicas terminais, quilométricas e remotas.

A norma ABNT NBR IEC 62271-200 (2007) decreta os parâmetros de análise das tensões de restabelecimento transitória no Brasil.

Já as normas IEEE C37.011 (2005) e IEEE C37.06 (2009) definem a base para aplicação de tensão de restabelecimento transitória em disjuntores de alta tensão CA.

### **1.5 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é dividido da seguinte forma:

No Capítulo 2, é abordada a fundamentação teórica abrangendo um estudo sobre disjuntores, TRT, envoltórias e suas normas, bem como as modelagens de linhas;

No Capítulo 3, são apresentadas as simulações e os resultados, relatando os tipos de casos que foram testados, seus respectivos resultados e comparações;

No capítulo 4, são feitas as conclusões e sugestões de propostas para trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Considerações gerais**

A análise da tensão de restabelecimento transitória é de suma importância para determinar se o disjuntor é ou não adequado para atuar no sistema. A partir de geração de curvas de TRT de disjuntores por meio de softwares, é possível analisar a superação por TRT, seguindo as normas técnicas estabelecidas para cada classe de tensão.

Este capítulo apresenta um embasamento teórico extraído a partir de pesquisas feitas sobre o tema e seus componentes principais. Inicialmente, é feita uma breve descrição técnica sobre os disjuntores, na sequência, é feita uma descrição sobre a TRT, bem como a superação de disjuntores por TRT, que é o fundamento principal deste trabalho. Depois, são apresentadas, também, as envoltórias e normas que dizem respeito a esse trabalho. Por fim, são apontados os três tipos de modelos de linha que foram utilizados nas simulações, suas características gerais e diferenças, seguidos de considerações finais.

### **2.2 Disjuntores**

#### **2.2.1 Definição**

Disjuntores são dispositivos eletromecânicos capazes de transportar e interromper correntes sob condições normais e, também, conduzir por um tempo específico e interromper correntes que estejam em condições anormais de operação, por exemplo em um caso de curto-circuito (Garzon, 2002).

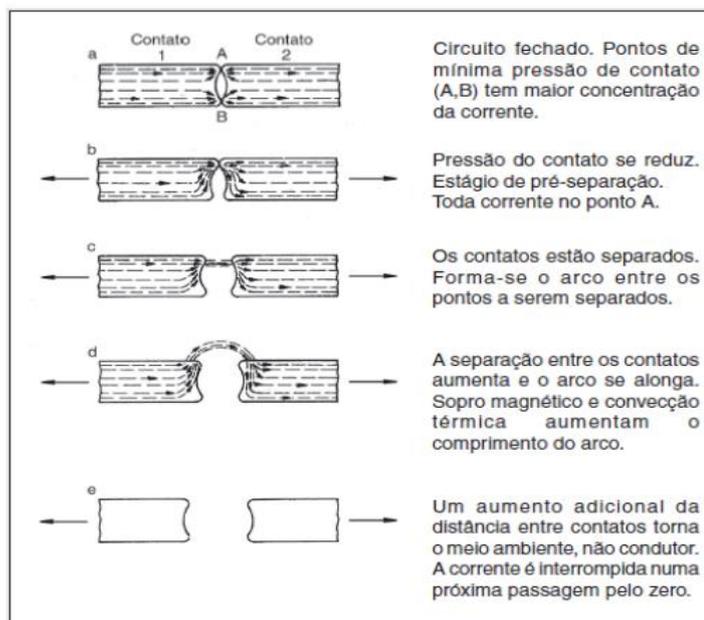
O Disjuntor deve ser capaz de interromper uma falha no sistema. Quando ele for de baixa tensão, isso é realizado no interior da capa que protege o dispositivo. Nos casos de disjuntores para média ou alta tensão, geralmente é associado um relé de proteção junto ao disjuntor, que são os responsáveis pelo acionamento em caso de uma falta no sistema. Nesses casos eles atuam como simples chaves de manobra, isentos da característica de proteção, sendo acionados pelo relé.

### 2.2.2 Funcionamento

No funcionamento de um sistema elétrico de potência, ao ocorrer uma falta, existe um relé de proteção que é responsável por detectar e emitir um comando a partir do circuito de controle do disjuntor para proteger os equipamentos do sistema.

Ao detectar um curto-circuito ou outro tipo de falta no sistema, o disjuntor é acionado. Ele recebe um comando para que seus contatos sejam abertos, a fim de eliminar o defeito e proteger a integridade dos equipamentos do sistema. A partir daí, é iniciada a abertura do equipamento. Separando os contatos permanentes, a corrente passa a circular através dos contatos principais, que são mais robustos para suportar os efeitos do arco elétrico. O funcionamento continua até que esses contatos não se toquem mais. Em consequência da diferença de potencial entre o pino e a tulipa, o arco elétrico se estabelece nesse mesmo local. Para entender melhor o funcionamento desse equipamento, é necessário que se tenha conhecimento em relação a interrupção do arco elétrico. A Figura 1 apresenta o processo e o passo a passo de como ocorre essa interrupção.

Figura 1 - Processo de interrupção de corrente alternada



(Fonte: W SERVICE, 2006)

Os disjuntores geralmente são construídos com técnicas de interrupção diferentes. São usados diferentes tipos de isolantes e métodos de extinção, como disjuntores a ar, a vácuo, a gás SF<sub>6</sub>, entre outros.

## **2.3 Tensão de restabelecimento transitória**

### **2.3.1 Descrição e características do fenômeno**

A tensão de restabelecimento está presente entre os contatos do disjuntor quando ocorre a interrupção da corrente, fazendo com que a capacidade da interrupção do disjuntor fique limitada. Ao analisar o fenômeno da TRT, é importante que os limites de isolamento elétrica do disjuntor (valores esses que são definidos pela norma apropriada) não sejam extrapolados.

Segundo Alves (2006), durante o processo de interrupção, o arco elétrico diminui rapidamente a sua condutividade ao mesmo tempo que a corrente tende a ir para zero. Microssegundos depois da corrente ficar nula, ela para de fluir no circuito. Logo, o sistema reage a esta interrupção de corrente na forma de oscilação transitória dando origem à TRT.

A tensão que surge entre os contatos ao mesmo tempo que ocorre a interrupção, provoca duas fases diferentes. A primeira é caracterizada pelas oscilações de alta frequência superpostas à onda de frequência fundamental, onde ocorre a taxa de crescimento da TRT. Já a fase 2 é caracterizada apenas por uma onda de frequência fundamental, onde se sucede o pico da TRT (Alves, 2012).

Esta TRT depende muito de qual circuito estamos realizando a interrupção, de forma que pode ser resistivo, indutivo, capacitivo, ou uma combinação de qualquer destes. Elementos concentrados e distribuídos nos levarão a reprodução de diferentes formas de ondas (Alves, 2012).

### **2.3.2 Superação de disjuntores por TRT**

Os equipamentos de manobra são dimensionados para suportar correntes de carga e de curto-circuito nominais. No cenário de uma expansão no sistema, esses equipamentos podem sofrer um aumento na solicitação elétrica, causando na maioria dos casos a sua superação. A superação por TRT se aplica apenas aos disjuntores, que são responsáveis por interromper a corrente de curto-circuito.

Para Sinder (2007), existem duas etapas que são de extrema importância e compreensão na superação em disjuntores, conforme citação:

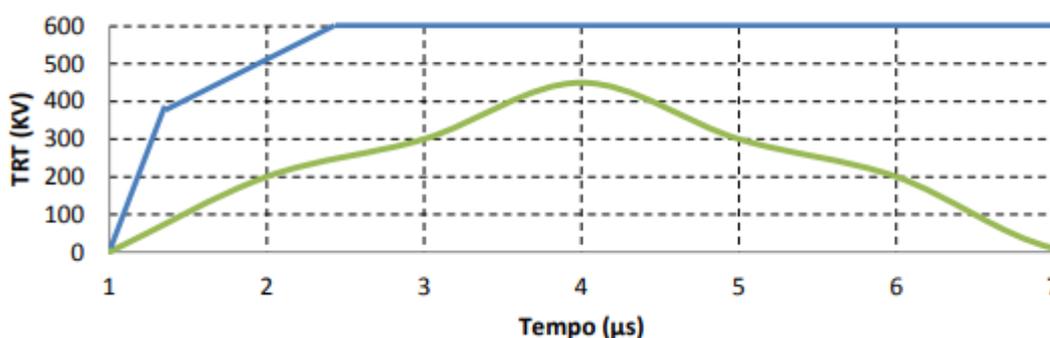
(...) a primeira consiste na análise dos estudos de curto-circuito, onde são identificados os disjuntores candidatos a superação. A segunda etapa consiste na reavaliação, em mais detalhes, dos disjuntores indicados, considerando os tipos possíveis de superação que são, por corrente de carga, corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica, crista da corrente de curto-circuito, e tensão de restabelecimento transitória (Sinder, 2007, pág. 7).

Neste trabalho, é tratado apenas a superação por tensão de restabelecimento transitória.

Alves (2006) nos mostra duas maneiras de representar as formas de onda de uma TRT junto a sua envoltória. Dependendo da tensão nominal e de características do sistema, a representação pode ser feita por dois ou quatro parâmetros que são definidos por norma.

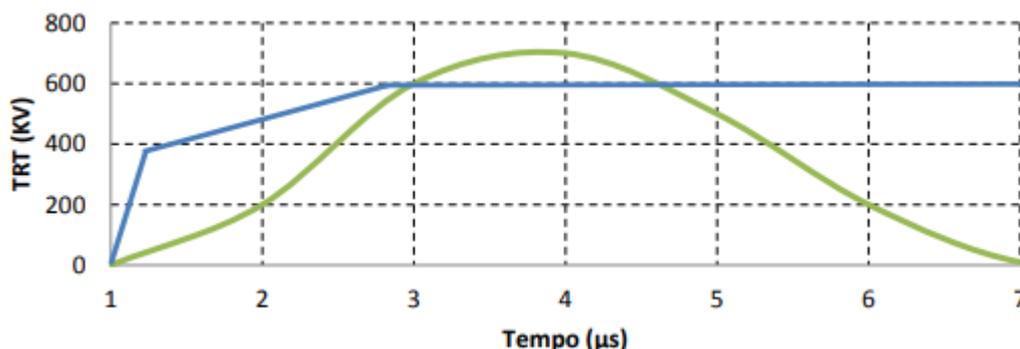
A superação do disjuntor ocorre quando a forma de onda da tensão ultrapassa a envoltória em qualquer ponto. Para deixar mais claro como funciona essa análise para a superação, as figuras abaixo apresentam os gráficos da tensão entre os terminais de um disjuntor em um sistema genérico, onde podem ser visualizados dois casos: sistema sem superação e outro com superação.

Figura 2 - Exemplo onde não ocorre superação.



(Fonte: Alves, 2012)

Figura 3 - Exemplo onde ocorre superação.



(Fonte: Alves, 2012)

O cálculo da TRT requer bastante tempo, devido a sua dificuldade para concretização. O meio mais viável é através de softwares que auxiliem nessas simulações de transitórios eletromagnéticos, pois são fornecidas as respostas em relação a rede para diversas frequências e também devido a sua facilidade de detalhamento na representação dos elementos que compõem o sistema.

## 2.4 Normas

As normas técnicas da IEC tiveram início na Europa e são as mais completas no que diz respeito à especificação de disjuntores. As normas da série 62271 são as que englobam o grupo dos equipamentos de alta tensão.

As normas técnicas da ABNT em vigor, na maioria dos casos, são uma tradução das técnicas da IEC, recebendo assim o nome de NBR IEC. É recomendado que se adote as últimas atualizações da norma equivalente da IEC quando não tiver atualizações na ABNT num prazo de tempo de 5 anos.

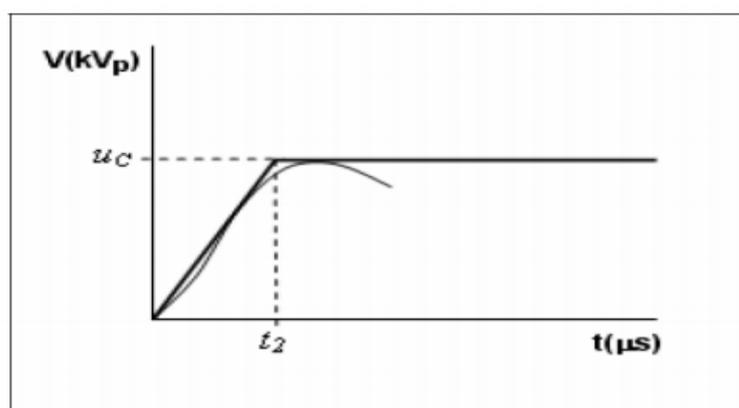
As normas técnicas da ANSI/IEEE dividem-se em dois grupos: a série (C37.1 e C37.2) e a (C37.01 e C37.02). A primeira série normatiza os disjuntores segundo seu dimensionamento pela corrente total de interrupção. No segundo caso, o dimensionamento se dá através da componente simétrica da corrente de curto-circuito. No processo de análise da superação de disjuntores deste trabalho, a norma usada seguindo a ANSI/IEEE, foi a IEEE C37.06-2009. De acordo com essa norma as classificações de tensão são baseadas na norma da ANSI C84.1-2006. Essas tensões são a máxima que os disjuntores foram fabricados para suportar.

O intuito destas técnicas é estabelecer os valores para a taxa de crescimento

e amplitude de tensões que surgem após a abertura do polo para diversos casos de corrente de falta, no sentido de garantir que a religação não aconteça. Nas situações em que a tensão estabelecida ultrapassa os limites normatizados, deve-se contatar o fabricante do disjuntor para reavaliar as medidas que busquem suprir as exigências do sistema.

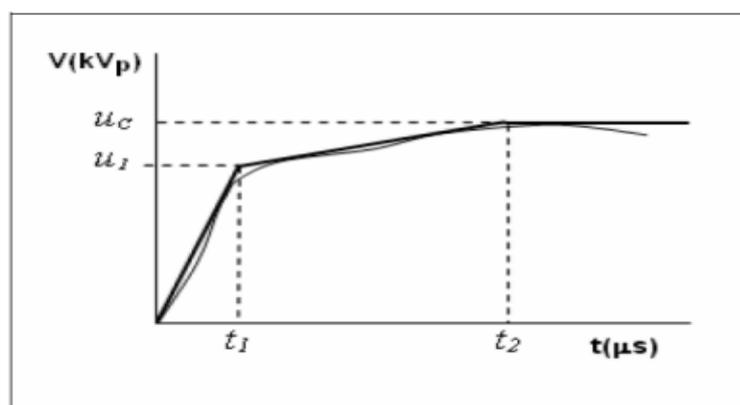
Em cada condição, os limites da TRT podem ser modelados com dois ou quatro parâmetros, a depender da classe de tensão do disjuntor e as configurações do sistema. As Figuras 4 e 5 mostram, de forma genérica, a representação de um disjuntor com tensão nominal menor que 100kV, usando uma envoltória a dois parâmetros e outro disjuntor com tensão nominal superior a 100kV, usando a envoltória a quatro parâmetros.

Figura 4 – Disjuntor com tensão nominal menor que 100kV, com envoltória a 2 parâmetros



(Fonte: ALVES, 2006).

Figura 5 – Disjuntor com tensão nominal superior a 100kV, com envoltória a 4 parâmetros



(Fonte: ALVES, 2006).

Neste trabalho, as normas usadas foram a IEEE C37.06, que apresenta os parâmetros das envoltórias, e a IEEE C37.011, que apresenta os modos de aplicação dos parâmetros, dentre várias outras informações que são relevantes para o estudo. A tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros que foram utilizados nas envoltórias para as comparações com a TRT. Foram utilizados regimes de operação T30, T60 e T100.

Tabela 1 – Parâmetros das envoltórias para tensão nominal de 245kV

Rated maximum voltage (1) $U_r$ kV, rms	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
245	T100	1.40	195	98	364	392	—	2 [7]	98	51 [76]	2
245	T60	1.50	195	65	390	195	-	2 [20]	98	35 [52]	3
245	T30	1.54 (7)	—	-	400	-	80	12	133	39	5
245	T10	1.76 (7)	—	-	459	-	66	10	153	32	7

Fonte: (Copyright © 2009 IEEE Std C37.06)

Dois parâmetros importantes das envoltórias são o fator de primeiro polo (kpp) e o regime de operação.

O fator de primeiro polo (kpp) expressa a elevação da tensão de restabelecimento aplicada ao primeiro polo a interromper em um disjuntor (MORAIS, 1985).

Em Colombo (1986), é descrito que o fator de primeiro polo significa a relação entre o valor máximo alcançado pela curva da TRT e o valor máximo de tensão na fase, sem considerar a parte transitória.

A norma da IEEE C37.11 diz que o kpp é a proporção da tensão de frequência de energia através do polo de interrupção, momentos antes da interrupção nos outros polos. Para um sistema com neutro não aterrado, kpp tende ao valor de 1,5. Em casos de sistemas neutros efetivamente aterrados, o valor depende da sequência de impedância dos caminhos de terra, a partir da localização da falha, para vários pontos neutros do sistema. Nestes estes sistemas essa proporção é  $\geq 1,3$ . As faltas trifásicas à terra, para tensões mais baixas, inferiores a 100kV, em casos de falta trifásica não aterrada o fator de primeiro polo de 1,5 cobre a falta.

Segundo Azevêdo (2010), o regime de operação é a relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de interrupção do disjuntor. Quanto menor for essa

relação, maior a chance de sucesso na abertura. Isso nos leva a conclusão de que a capacidade de eliminar o defeito tem relação inversamente proporcional ao nível da corrente que será interrompida.

Este regime é dividido em várias classes. De acordo com a suas especificações, são variadas as capacidades de suporte. Para operações onde ocorrem testes para casos em falta, o componente de corrente contínua de interrupção deve ser 20% inferior ao componente de corrente alternada.

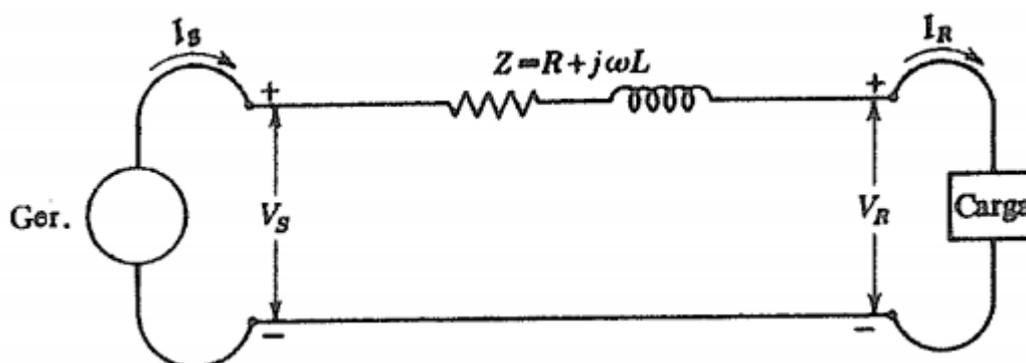
## 2.5 Modelagem de linhas

Para análise de sistemas de grande escala, é necessário utilizar modelos que ilustrem o comportamento real do sistema, como, por exemplo, às representações de linhas de transmissão por elementos de circuitos ideais. Os sistemas de linhas de transmissão dependem de seu comprimento. Os modelos de linha utilizados para os ensaios práticos deste trabalho, foram os modelos de linha curta, linha média (pi equivalente) e linha longa (parâmetros Distribuídos ou pi nominal).

### 2.5.1 Modelo de Linha Curta

Os sistemas de linhas de transmissão com modelo de linha curta são às que possuem até 80 km, a depender, de seu nível de tensão. Elas são as mais simples, em resumo seu modelo consiste em desprezar à capacitância da linha em decorrência da pequena corrente de fuga. No estudo do seu desempenho, são aplicados na linha de transmissão apenas os parâmetros de resistência e indutância, como mostra o sistema da Figura 6.

Figura 6 - Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta



(Fonte: Stevenson, 1986)

Na Figura 6 os valores de  $I_S$  e  $I_R$  são, respectivamente, as correntes da barra transmissora e receptora e  $V_S$  e  $V_R$ , são as tensões ao neutro na mesma barra (Stevenson, 1986). O circuito é resolvido como um circuito de corrente alternada série simples. Não existe ramos de derivação, sendo a corrente a mesma nas duas extremidades, conforme a Equação (2.1).

$$I_S = I_R \quad (2.1)$$

A tensão da barra de transmissão é dada por (2.2)

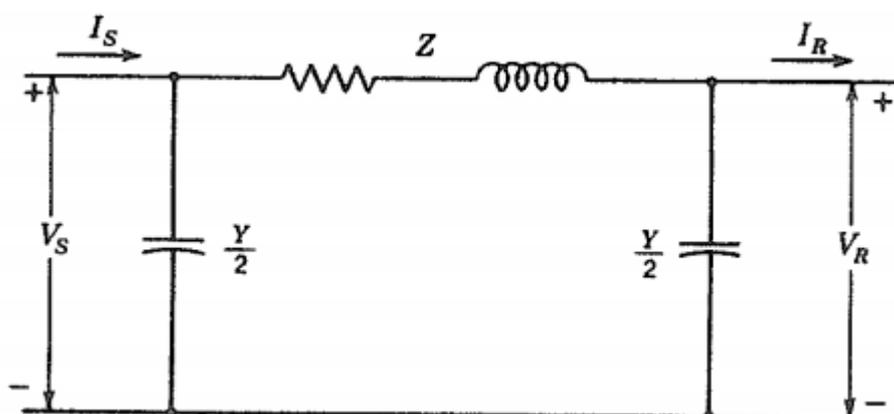
$$V_S = V_R + I_R * Z \quad (2.2)$$

Onde  $Z$  é a impedância total da linha.

### 2.5.2 Modelo de linha média (Pi)

Os sistemas de linhas de transmissão com modelo de linha média (Pi) são às que possuem entre 80km e 240km. Para os estudos de curto-circuito, este comprimento depende do nível de tensão. Neste caso, a capacitância da linha não pode ser desprezada, sendo considerada como concentrada em um ou mais pontos. No modelo Pi que foi o utilizado, a metade da capacitância é dividida para cada lado da linha como mostrado a Figura 7.

Figura 7 - Circuito equivalente de uma linha de transmissão média (Pi)



(Fonte: Stevenson, 1986)

Segundo Stevenson (1986), com a admitância em derivação, esta é incluída no cálculo como uma capacitância pura. Neste caso estudado, a linha é dividida em duas partes iguais alocadas junto as barras transmissora e receptora da linha. O modelo é chamado de pi por causa do diagrama que lembra a letra grega. Para dedução das equações, conforme a Figura 7, percebe-se que a corrente na capacitância da barra de recepção é  $V_r * Y/2$  e a corrente no ramo em série é  $I_r + V_r * Y/2$ . Portanto, tem-se (2.3) e (2.4).

$$V_S = \left( V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) + V_R \quad (2.3)$$

$$V_S = \left( \frac{Y * Z}{2} + 1 \right) * V_R + Z * (I_R) \quad (2.4)$$

Para deduzir  $I_S$ , nota-se que a corrente na capacitância em derivação da barra de transmissão é  $V_s * Y/2$ , que somada com a corrente em série resulta em (2.5).

$$I_S = \left( V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} \right) + I_R \quad (2.5)$$

Substituindo  $V_S$  pela Equação 2.4, na Equação 2.5, tem-se:

$$I_S = V_R * Y \left( 1 + \frac{ZY}{4} \right) + \left( 1 + \frac{ZY}{2} \right) * I_R \quad (2.6)$$

As Equações 2.4 e 2.6 podem ser representadas na forma geral como (2.7).

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Onde:

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1, C = Y * \left( \frac{ZY}{4} + 1 \right) \text{ e } B = Z;$$

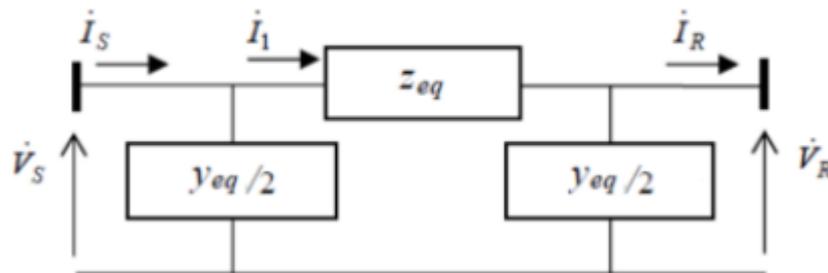
Essas constantes ABCD são aplicáveis à redes lineares, passivas e bilaterais com dois pares de terminais (quadripolos).

### 2.5.3 Modelo de linha longa (Parâmetros distribuídos)

Os sistemas de linhas de transmissão com modelo de linha longa (Parâmetros Distribuídos) são os que possuem distância superior a 240km. No curto-circuito, dependendo do caso, pode-se aplicar algumas simplificações. Os valores de

resistência série são bem inferiores em relação a reatância série da linha de transmissão para tensões de valores mais elevados. Para valores baixos, esta resistência é significativa. Neste caso, todos os parâmetros (resistância, indutância, capacitância e condutância) são igualmente distribuídos ao longo da linha. A Figura 8 mostra o modelo pi equivalente de linha longa para uma das fases.

Figura 8 – Circuito do modelo uma linha de transmissão longa



(Fonte: Stevenson, 1986)

Segundo a metodologia de Stevenson (1986), resolvendo este modelo, tem-se (2.8) e (2.9).

$$Z_{eq} = Z * \left[ \frac{\sinh(\gamma * l)}{(\gamma * l)} \right] \text{ (ohms)} \quad (2.8)$$

$$Y_{eq} = Y * \left[ \frac{\sinh\left(\gamma * \frac{l}{2}\right)}{\left(\gamma * \frac{l}{2}\right)} \right] \text{ (siemens)} \quad (2.9)$$

onde:

$\gamma = \sqrt{z' * y'}$  a constante de propagação onda por metro de linha.

$z'$  a impedância série por metro de linha.

$y'$  a admitância shunt por metro de linha.

$l$  o comprimento total da linha.

Matricialmente, escreve-se o modelo de linha longa como sendo o quadripolo dado por (2.10).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Onde:

$$A = \left(1 + \frac{Z_{eq}Y_{eq}}{2}\right), B = Z_{eq}, C = \left(1 + \frac{Z_{eq}Y_{eq}}{4}\right) * Y_{eq} \text{ e } D = A;$$

## 2.6 Considerações Finais

No intuito de entender o processo de simulação da tensão de restabelecimento transitória e a verificação da superação nos disjuntores, até aqui, foi apresentada, um pouco dos conceitos gerais importantes para resultados deste estudo.

Nesse contexto, foi introduzido, a teoria sobre disjuntores, modelos de linhas, TRT e as normas técnicas, que são os pontos implementados para obtenção dos resultados. Aplicou-se o método da superação por TRT para fazer às análises em disjuntores de três tipos de linha (curta, média e longa), verificando assim seu comportamento. Logo, fica evidente que é necessário seguir as normas adequadas quanto a curva envoltória, para que, assim, a partir da geração da TRT no disjuntor, possam ser feitas as devidas comparações entre as duas curvas e tiradas as conclusões quanto a ocorrência ou não de superação no disjuntor.

## **3 METODOLOGIA, SIMULAÇÕES E RESULTADOS**

### **3.1 Considerações Gerais**

Neste Capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para análise da TRT, bem como as simulações realizadas e os resultados deste trabalho.

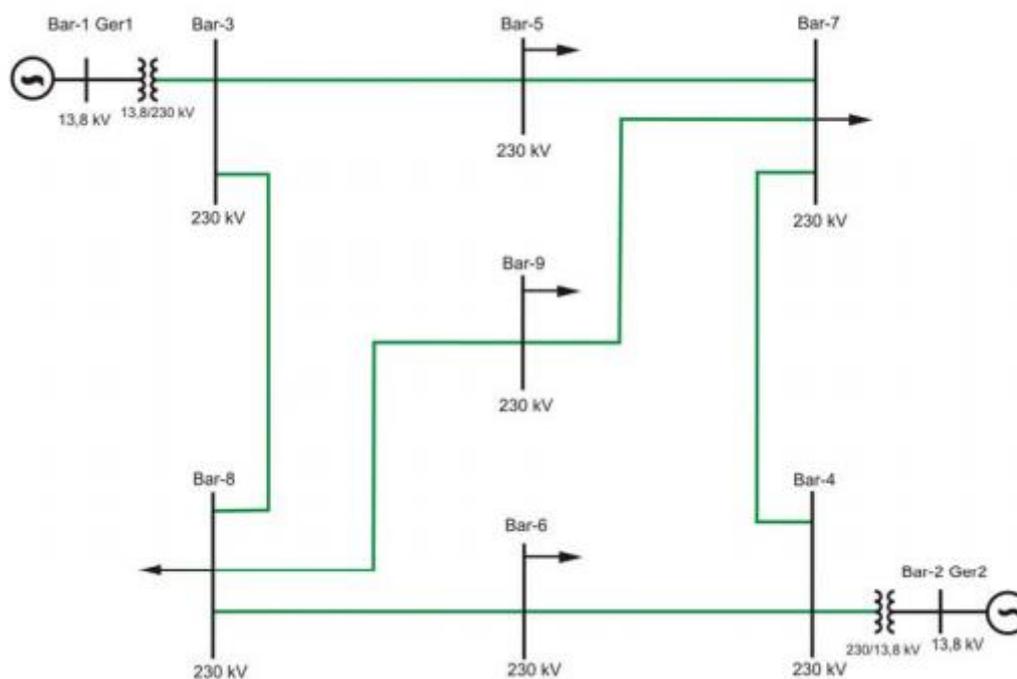
O comportamento de um sistema elétrico é descrito por equações diferenciais. Suas soluções do modo manual são bem complexas, devido aos sistemas do meio real muitas vezes serem bastante extensos, isso acaba dificultando o equacionamento. Logo, a simulação digital torna-se o meio mais acessível.

Tendo em vista a viabilidade dos meios digitais no auxílio a este tipo de estudo, são apresentados os resultados para as simulações de um sistema de 9 barras que foi simulado no software denominado ATP, através de sua interface gráfica ATPDraw. Neste software, foram obtidas as curvas de TRT em disjuntores para curtos-circuitos em diferentes linhas do sistema, para diferentes representações de modelo de linha. A partir dessas curvas foi programado um código no software Matlab seguindo as normas impostas pela IEEE para geração das envoltórias, que foram comparadas à TRT, para, assim, avaliar o efeito das diferentes representações de modelo de linha na análise da superação de disjuntores.

### **3.2 Sistema Teste**

Para análise do comportamento de disjuntores frente a TRT em diferentes tipos de representações de linha, foi simulado um sistema de 9 barras malhado. Trata-se de uma rede elétrica bem simples, de 230kV, proposta por Alves (2007). Esta tem o total de oito linhas de transmissão e é composta por dois geradores. Seus dados foram retirados da fonte e são apresentados no Anexo A. A Figura 9 mostra o sistema teste.

Figura 9 – Sistema Teste



Fonte: (ALVES, 2007)

As linhas de transmissão foram modeladas para três tipos de circuito e seus parâmetros foram obtidos de acordo com os dados construtivos do sistema teste proposto por Alves (2007). Foram realizadas as mesmas simulações do estudo para representação do modelo de linha curta, pi ou de parâmetros distribuídos, de forma a analisar a TRT do disjuntor e o efeito que essa representação causa na análise de superação. Foram realizadas simulações para diversos casos, dentre os quais alguns são apresentados nas subseções seguintes. A Figura 10 mostra as configurações utilizadas para simulação.

Figura 10 – Configuração utilizada nas simulações

$\Delta T$ :	1E-6
$I_{max}$ :	0.07
$X_{opt}$ :	0
$C_{opt}$ :	0
Epsilon:	0
Freq:	60

Fonte: (Autor)

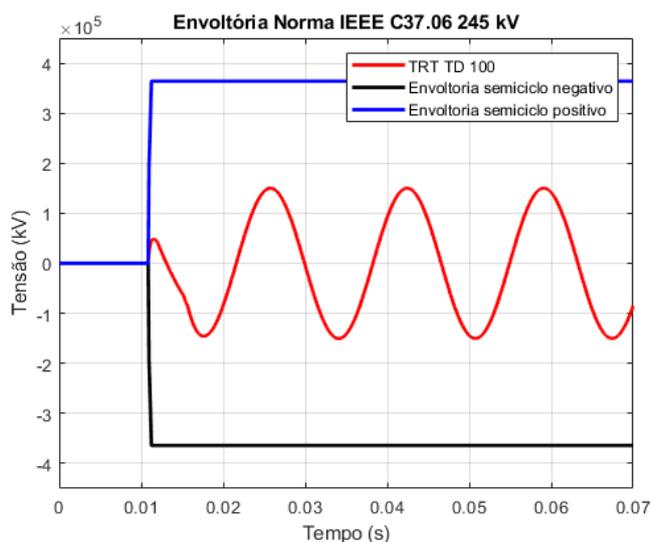
### 3.3 Curto-circuito na linha 3-5 (regime de operação T100)

Para as análises, neste caso, foram alocados disjuntores em cada extremidade da linha, sendo um próximo a barra 3 (início da linha de transmissão) e outro próximo a barra 5 (fim do trecho da linha de transmissão). O disjuntor analisado será o do fim do trecho, denominado de disjuntor 5. Essa avaliação leva em consideração uma falta no início do trecho, ou seja, a falta está localizada mais próxima à barra 3. Para este disjuntor, os critérios de comparação, ou seja, a envoltória para verificar a superação foi através dos valores da Tabela 1, para regime de operação T100, respeitando a norma da IEEE C37.06.

#### 3.3.1 Falta monofásica para modelagem de linha curta, linha pi e parâmetros distribuídos

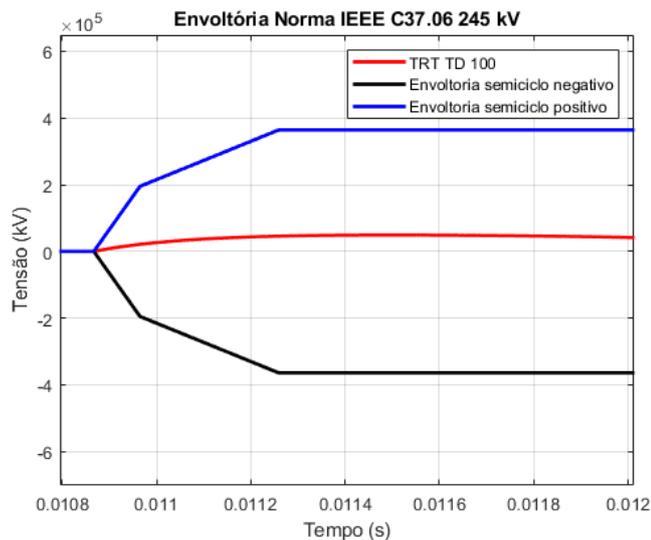
Como pode ser visualizado na Figura 11.a, para falta monofásica com modelagem de linha curta, a TRT não ultrapassou a curva da envoltória no seu valor de TCTRT e valor de pico. Com o auxílio da aproximação do gráfico, a figura 11.b deixa mais evidente que neste caso não ocorre superação.

Figura 11.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

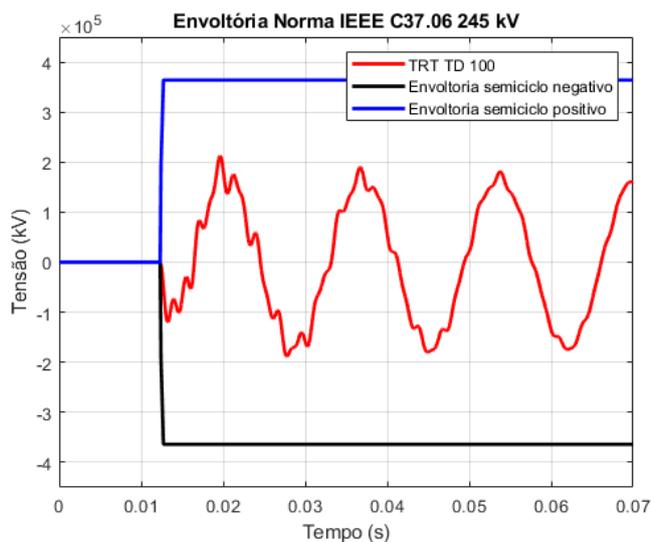
Figura 11.b – Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

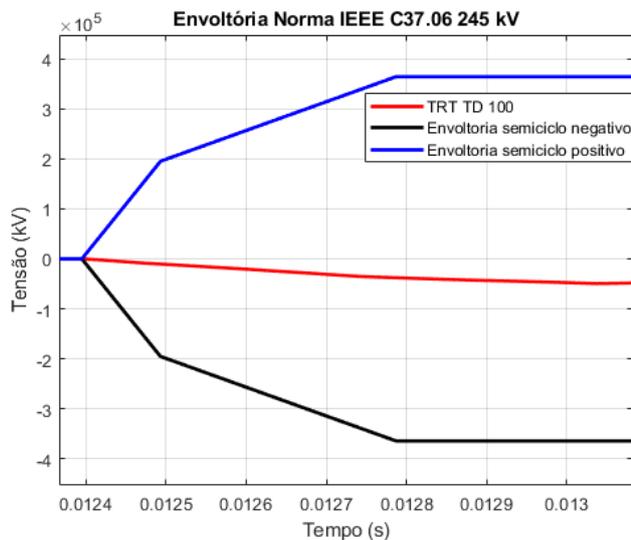
Para os mesmos parâmetros, porém agora para sistema com modelagem de linha pi, a Figura 12.a apresenta TRT para o disjuntor 5 e sua envoltória que é estabelecida pela norma. Na Figura 12.b, é feita uma aproximação que mostra a envoltória a quatro parâmetros do regime de operação T100. Logo, pela curva pode-se concluir que não há superação em nenhum dos pontos da TRT.

Figura 12.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

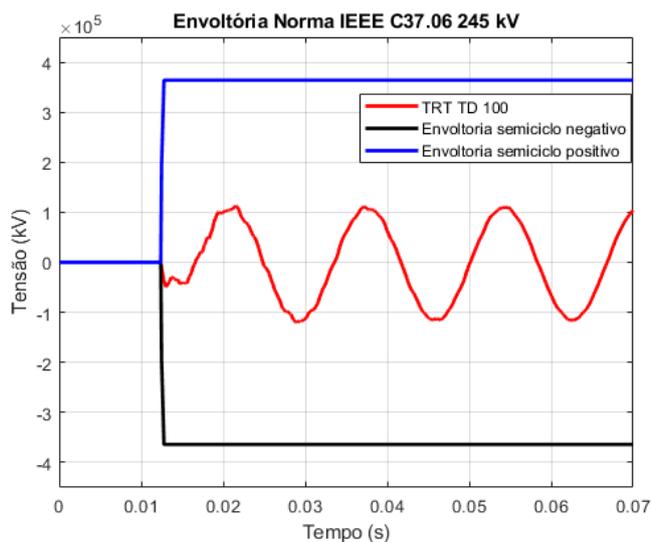
Figura 12.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

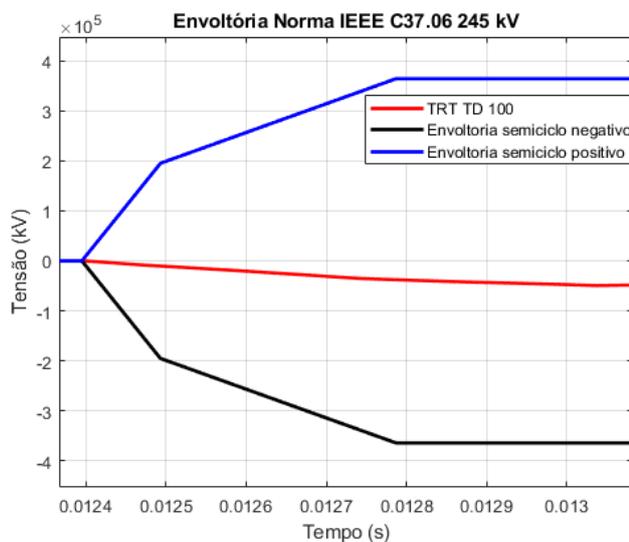
Seguindo o mesmo padrão de sistema, parâmetros e mesmo disjuntor, porém agora para sistema com modelagem de linha com parâmetros distribuídos, a Figura 13.a apresenta TRT para o disjuntor 5 e sua envoltória que é estabelecida pela norma. A Figura 13.b esclarece que não ocorre superação em nenhum dos pontos da TRT.

Figura 13.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha de parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

Figura 13.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória

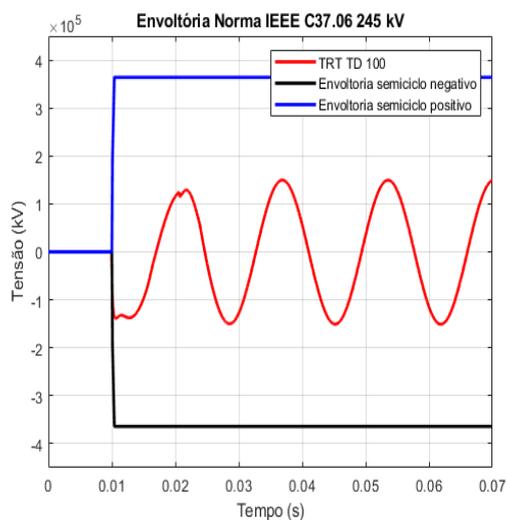


Fonte: (Autor)

### 3.3.2 Falta trifásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos.

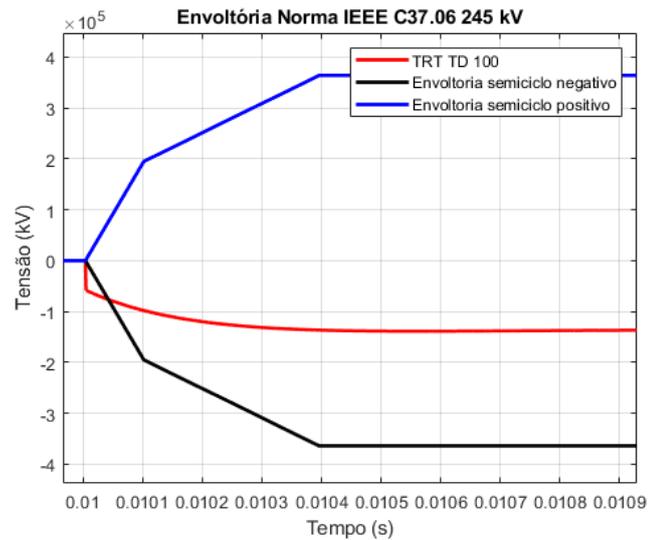
Como pode ser visualizado na Figura 14.a para falta trifásica com modelagem de linha curta, a TRT não ultrapassou a curva da envoltória no seu valor de pico, mas, em seu valor de TCTRT houve uma pequena superação dos valores. Com o auxílio da aproximação do gráfico, a Figura 14.b apresenta o detalhe onde fica mais evidente a ultrapassagem, causando a superação do disjuntor.

Figura 14.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

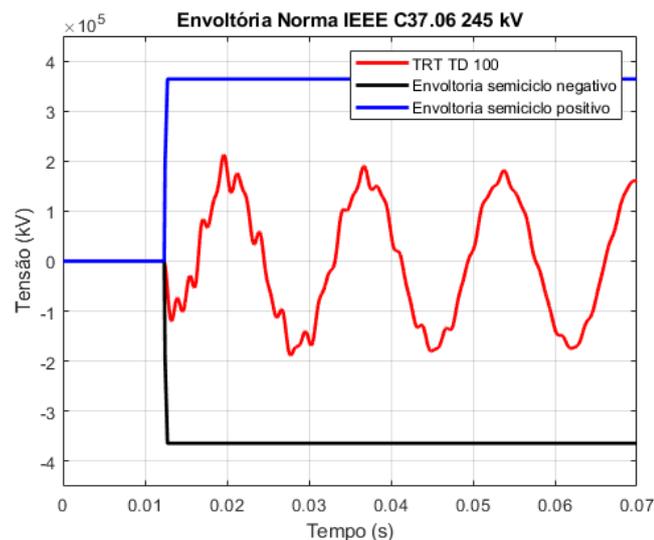
Figura 14.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

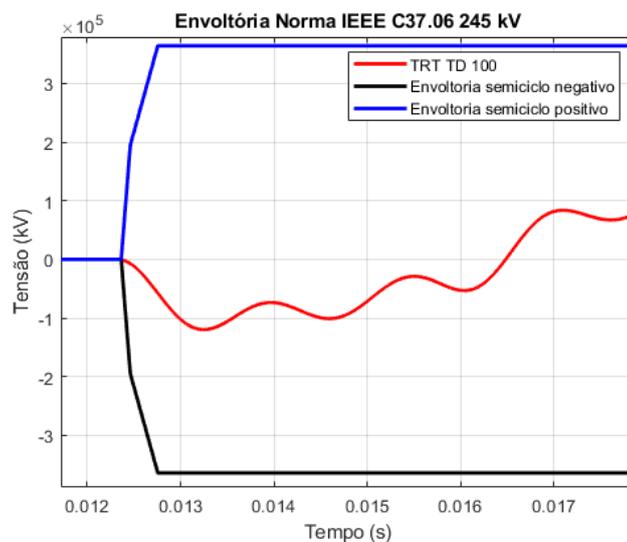
Para os mesmos parâmetros, porém, agora para o sistema com modelagem de linha pi, a figura 15.a apresenta a TRT para o disjuntor 5 e sua envoltória que é estabelecida pela norma. Na figura 15.b, é feita uma aproximação que mostra a TRT junto a envoltória, logo, pela curva percebe-se que não há superação em nenhum dos pontos da TRT.

Figura 15.a - TRT do disjuntor 5 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

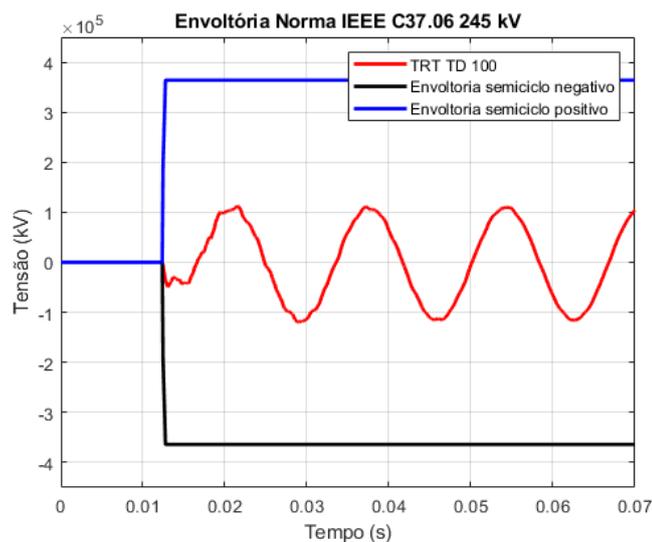
Figura 15.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

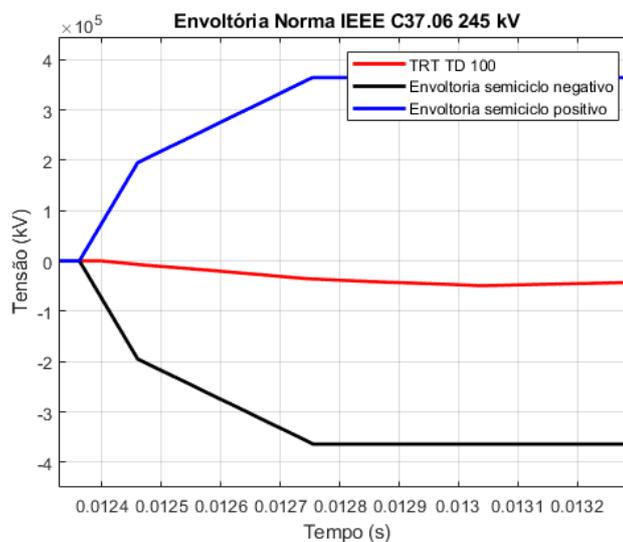
Neste caso, na modelagem de linha com parâmetros distribuídos, o disjuntor 5 não apresenta superação para nenhum dos pontos da TRT, para uma falta trifásica no início do trecho. As Figuras 16.a e 16.b detalham melhor o comportamento da TRT junto à envoltória.

Figura 16.a - TRT do disjuntor 5 e sua envoltória definida pela norma para curto-circuito trifásico em linha com modelagem de parâmetros distribuídos



Fonte: (Autor)

Figura 16.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

### 3.4 Curto-circuito na linha 7-9 (regime de operação T30)

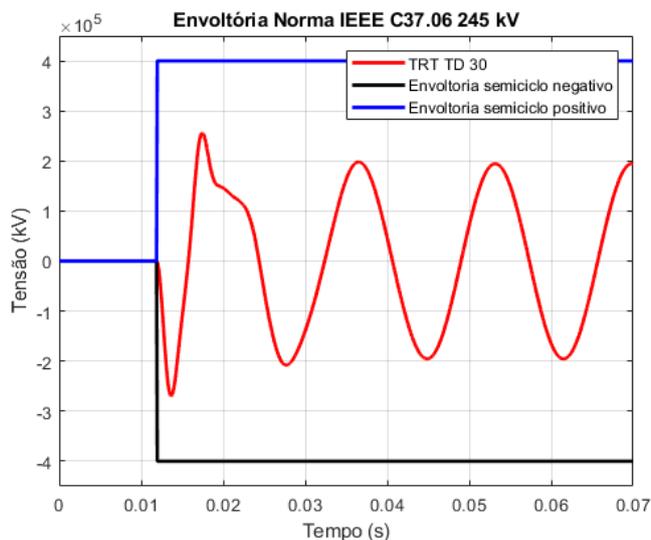
Do mesmo modo que no caso anterior, agora foram alocados dois disjuntores nas extremidades da linha 7-9, um próximo à barra 7 (início do trecho) e outro próximo a barra 9 (final do trecho). Neste caso, o disjuntor analisado é o disjuntor 9 que está no fim do trecho, lugar onde também está localizada a falta nesta linha. Para este disjuntor, os critérios de comparação, ou seja, a envoltória para verificar a superação deste caso, foram utilizadas obtidas a partir da Tabela 1 para regime de operação T30, respeitando a norma da IEEE C37.06.

#### 3.4.1 Falta monofásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos.

Para falta monofásica do fim do trecho considerando o modelo de linha curta, os resultados do disjuntor 9 não puderam ser apresentados devido à instabilidade numérica do software ATP.

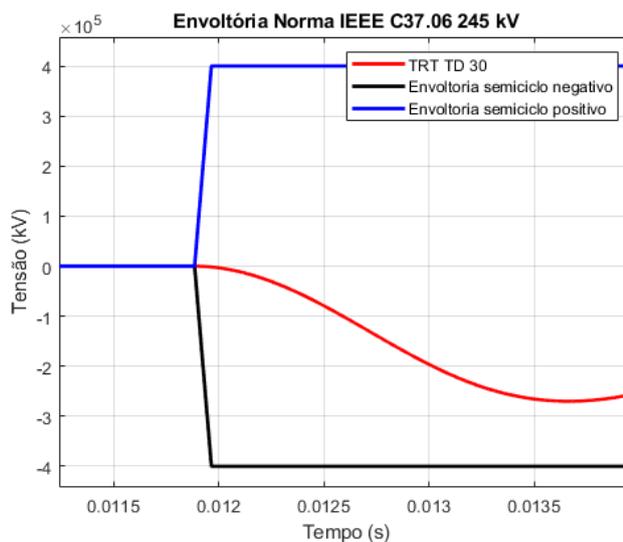
Já para a modelagem de linha pi, as Figuras 17.a e 17.b apresentam a TRT do disjuntor 9 junto à envoltória e o detalhe da taxa de crescimento da TRT, respectivamente. Neste caso, o disjuntor não é superado para nenhum dos pontos da TRT.

Figura 17.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

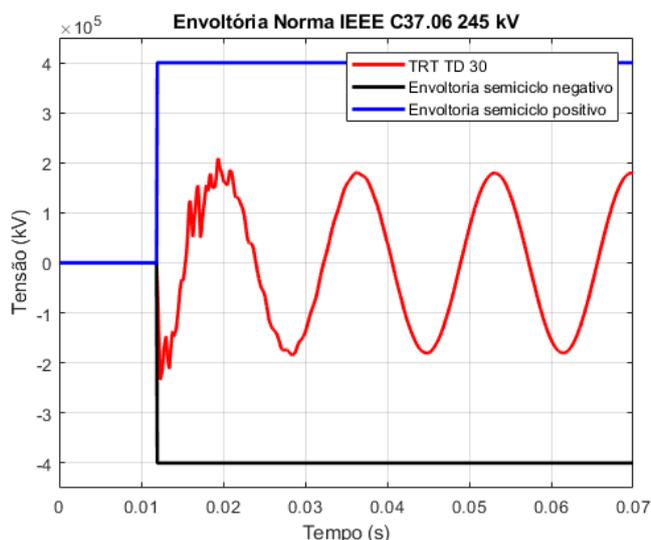
Figura 17.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

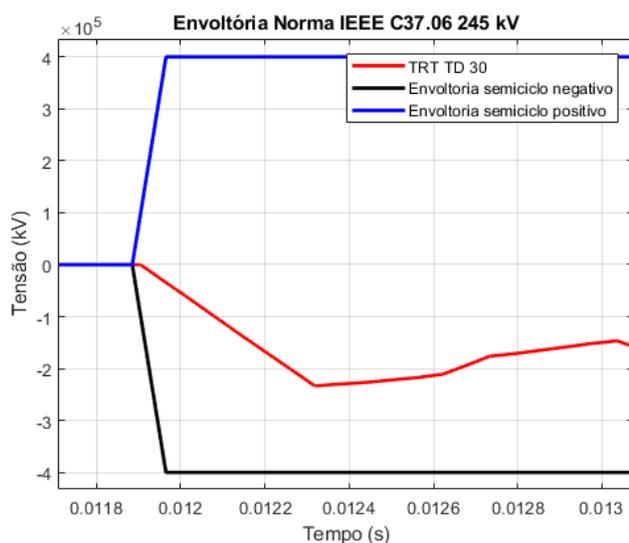
Na Figura 18.a, para uma modelagem de linha com parâmetros distribuídos, é visto que a TRT do disjuntor 9 passa próxima à envoltória. Analisando a Figura 18.b percebe-se por análise do detalhamento da taxa de crescimento da TRT que o disjuntor 9 não sofre superação para nenhum dos pontos da TRT.

Figura 18.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

Figura 18.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

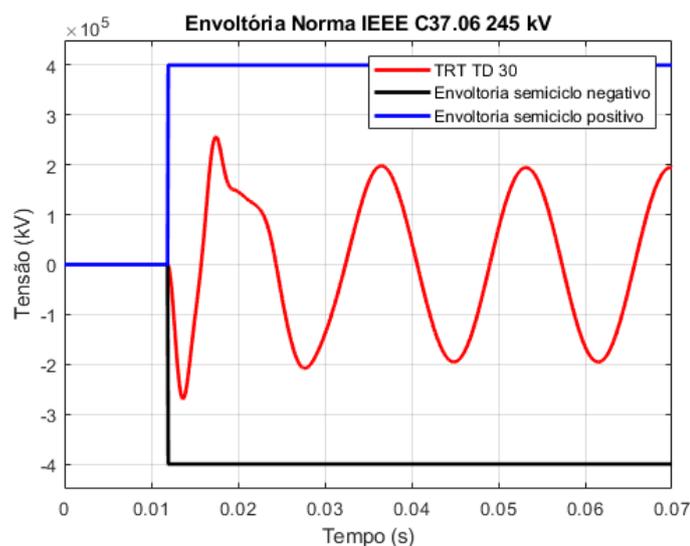
### 3.4.2 Falta trifásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos.

Para uma falta trifásica, com modelagem de linha curta, as simulações da TRT do disjuntor 9 apresentaram instabilidade numérica causada pelo software ATP, com isso, não puderam ser incluídas no trabalho.

As Figuras 19.a e 19.b apresentam, respectivamente, a TRT do disjuntor na

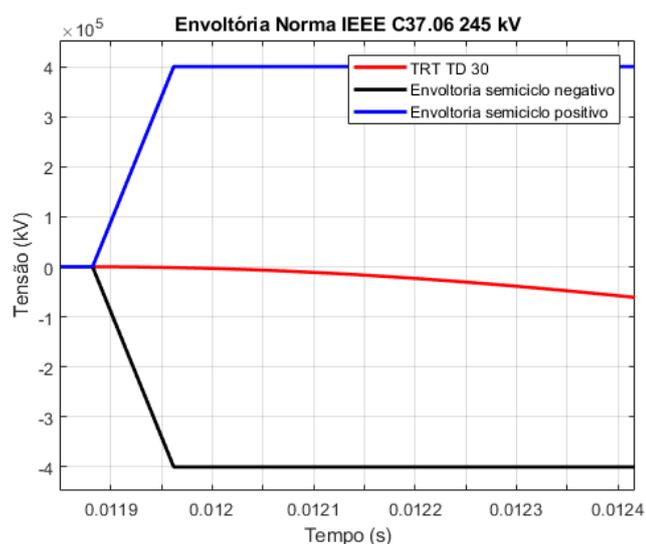
barra 9 para um curto-circuito trifásico com modelagem de linha pi comparado a sua envoltória e uma aproximação desta, mostra o comportamento quando a taxa de crescimento e valor de pico. Pode-se observar que, neste caso, não ocorre superação.

Figura 19.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

Figura 19.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória

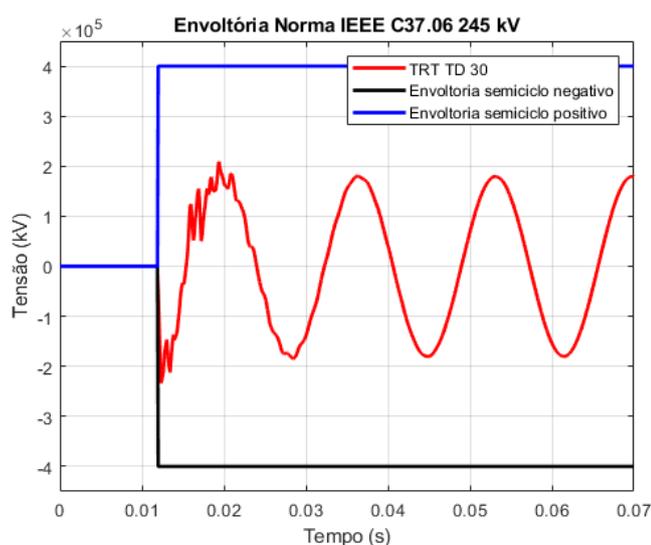


Fonte: (Autor)

As figuras 20.a e 20.b tratam do curto-circuito trifásico na linha 7-9 (no fim do trecho). Os gráficos mostram a TRT do disjuntor 9 localizado no fim do trecho para

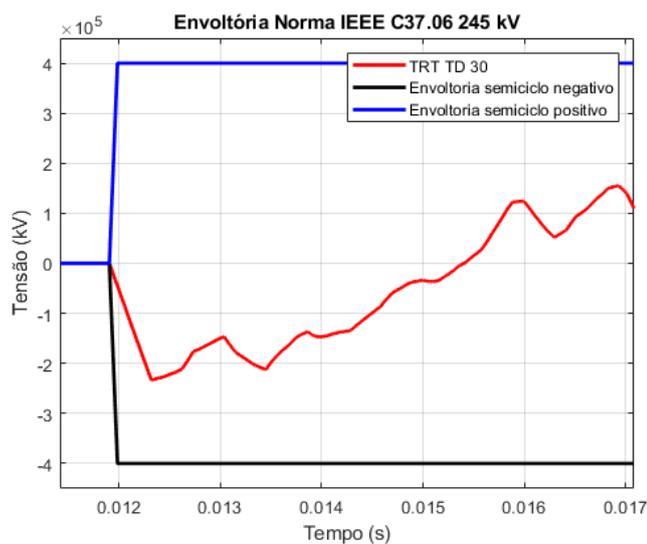
uma modelagem de linha com parâmetros distribuídos. Na primeira Figura, é apresentada a TRT do disjuntor comparado com a sua envoltória. Na segunda, é feita uma aproximação, onde é possível analisar que a TRT não ultrapassa nenhum os parâmetros da envoltória. Logo, não há superação no disjuntor 9 para este caso.

Figura 20.a - TRT do disjuntor 9 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

Figura 20.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

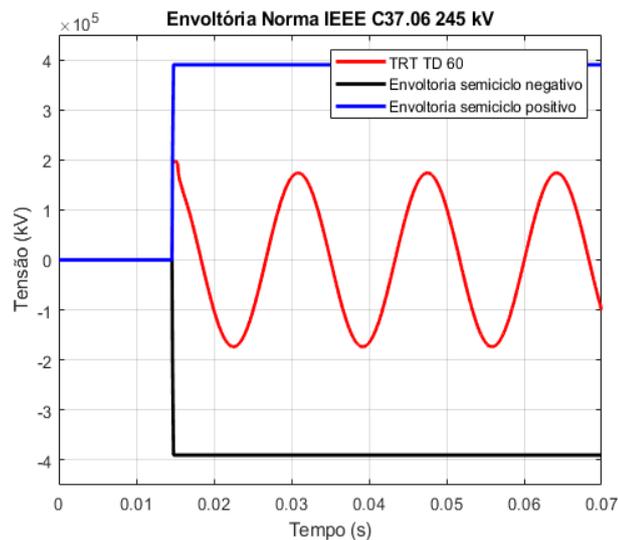
### 3.5 Curto-circuito na linha 6-8 (regime de operação T60)

Na avaliação deste caso, foram alocados dois disjuntores nas extremidades da linha 6-8, um próximo à barra 6 (início do trecho) e outro próximo a barra 8 (final do trecho). Neste caso, o disjuntor analisado é o 6, que está no início do trecho. A falta está localizada próxima ao fim do trecho. Para este disjuntor, os critérios de comparação foram criados a partir da Tabela 1 para regime de operação T60, respeitando a norma da IEEE C37.06.

#### 3.5.1 Falta monofásica para modelagem de linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos.

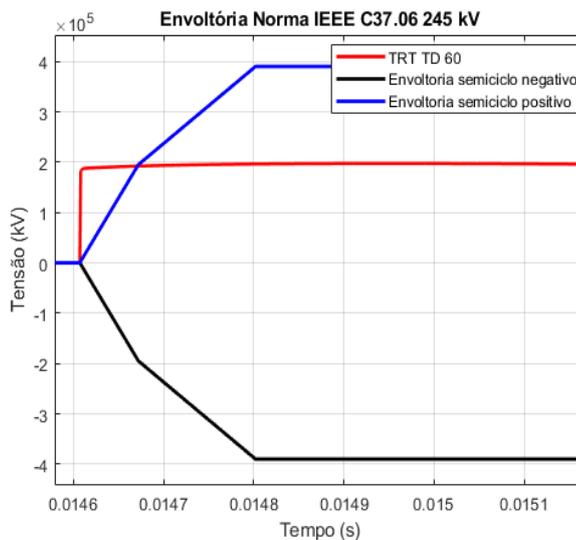
Para modelagem de linha curta, com uma falta monofásica no final do trecho, o disjuntor avaliado foi o 6. Neste caso, ocorre superação por TCTRT, seus valores de TRT ultrapassam a norma representada pela envoltória, causando superação no disjuntor.

Figura 21.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

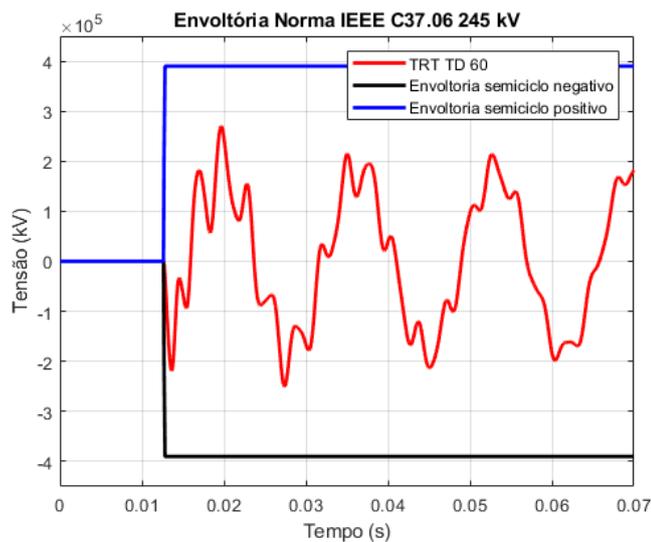
Figura 21.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

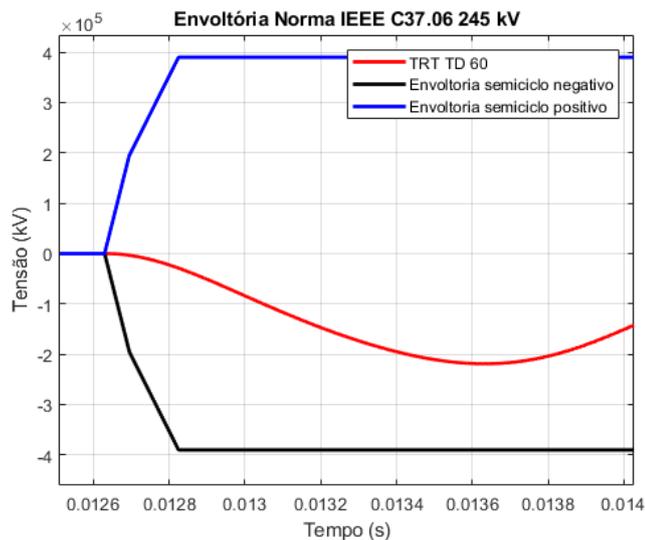
As figuras 22.a e 22.b dizem respeito à TRT do disjuntor 9 para um curto-circuito monofásico comparado à sua envoltória, para uma modelagem de linha pi. É possível perceber a partir da análise dessas figuras que a TRT não ultrapassa os valores de pico e de TCTRT, não havendo superação.

Figura 22.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

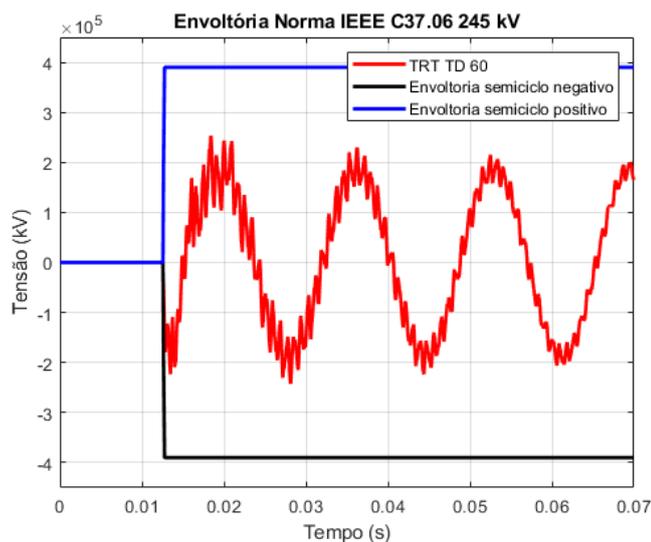
Figura 22.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

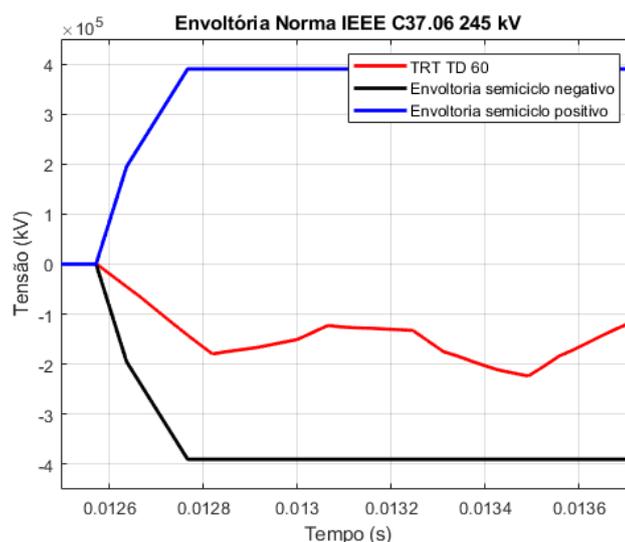
No caso de modelagem de parâmetros distribuídos para o curto-circuito monofásico no fim do trecho, vemos que não ocorre superação no disjuntor 6. As figuras 23.a e 23.b, apresentam os resultados obtidos nas simulações para este caso.

Figura 23.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito monofásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

Figura 23.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória

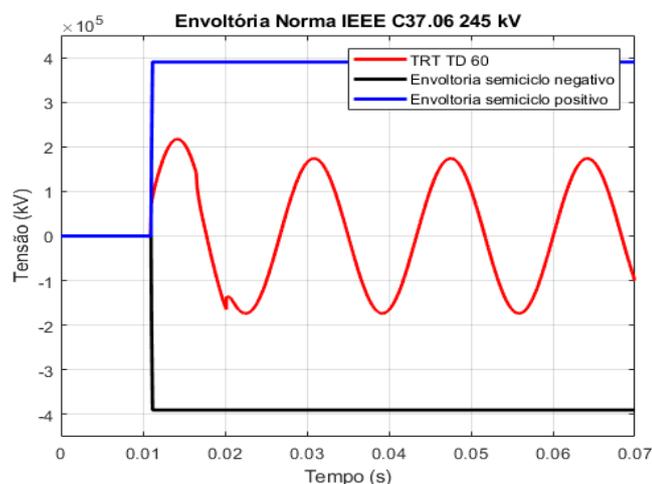


Fonte: (Autor)

### 3.5.2 Falta trifásica para modelagem de Linha curta, linha pi e linha com parâmetros distribuídos.

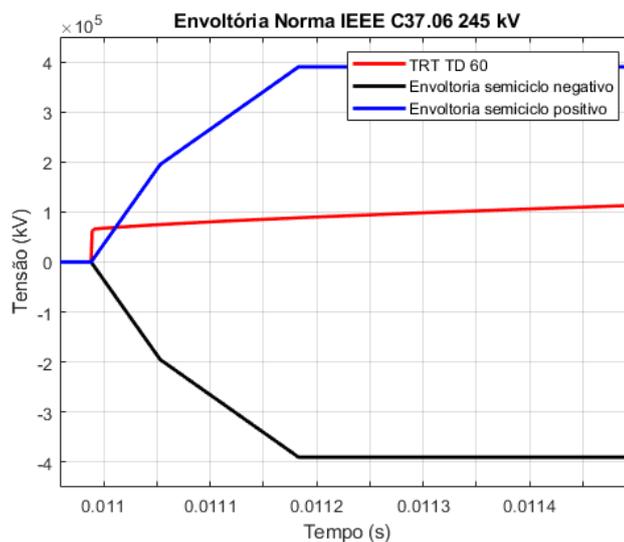
No caso de um curto-circuito trifásico com uma modelagem de linha curta, afim de apresentar a TRT do disjuntor 6 e sua envoltória que é definida pela norma. Na figura 24.a é visto sua TRT, comparado à sua envoltória, o que não conclui nada sobre a superação do disjuntor. Com o detalhe da Figura 24.b, percebe-se que a TRT ultrapassa em valores de taxa de crescimento a envoltória. Logo, gerando a superação do disjuntor 6 para este teste.

Figura 24.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha curta e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

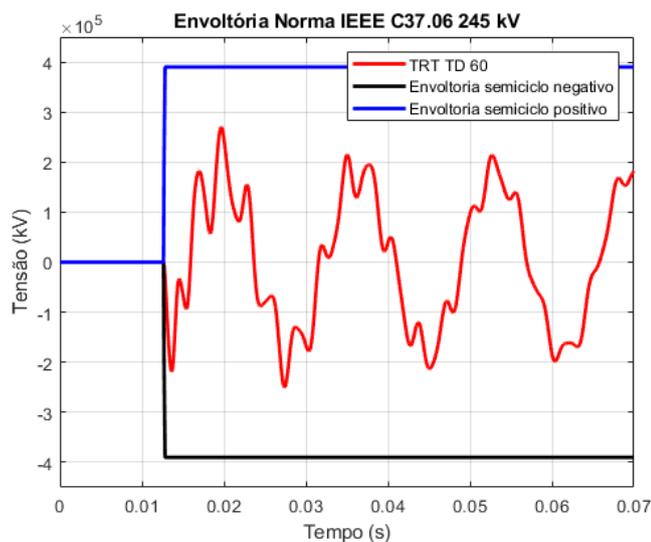
Figura 24.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

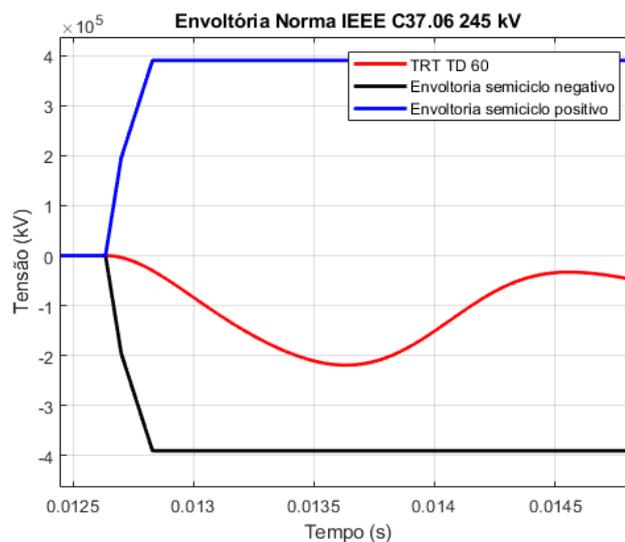
As Figuras 25.a e 25.b foram geradas para TRT do disjuntor 9 para um curto-circuito trifásico comparado à sua envoltória, agora para uma modelagem de linha pi. É possível perceber que a TRT não ultrapassa os valores de pico e de TCTRT, não ocasionando nenhum tipo de superação.

Figura 25.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha pi e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

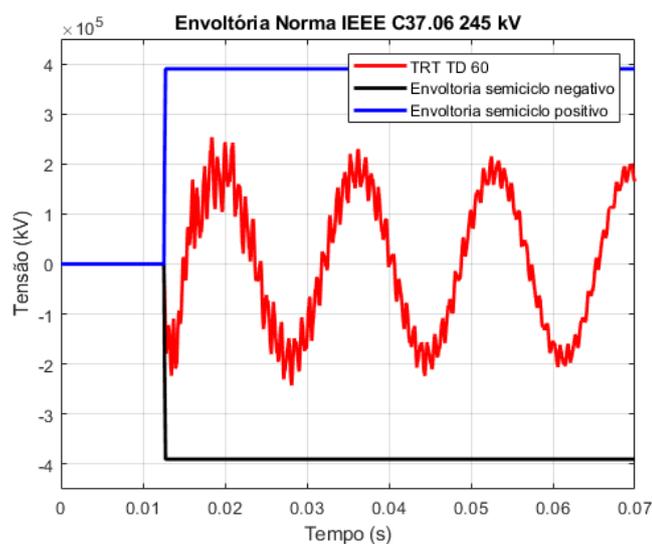
Figura 25.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

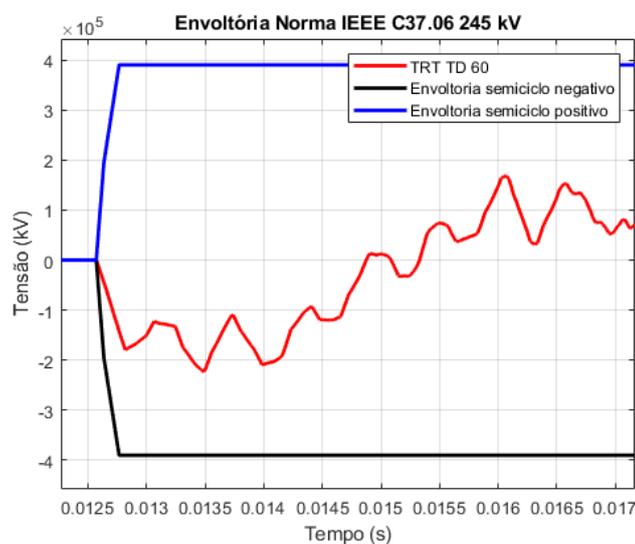
As Figuras 26.a e 26.b tratam do curto-circuito trifásico na linha 6-8 (no fim do trecho). Os gráficos mostram a TRT do disjuntor 6 localizado no início do trecho para uma modelagem de linha com parâmetros distribuídos. Na primeira figura, é apresentada a TRT do disjuntor comparado a sua envoltória e, na segunda, é feita uma aproximação onde é possível analisar que a TRT não ultrapassa nenhum dos parâmetros da envoltória. Logo, não há superação no disjuntor 6 para este caso.

Figura 26.a - TRT do disjuntor 6 para curto-circuito trifásico com modelagem de linha com parâmetros distribuídos e sua envoltória definida pela norma



Fonte: (Autor)

Figura 26.b - Detalhe da Taxa de crescimento e Valor de pico da envoltória



Fonte: (Autor)

Em alguns casos com modelo de linha curta, não foi possível trazer os resultados, devido a TRT apresentar uma instabilidade numérica que é causada pelo software ATP. Os casos analisados nesse trabalho mostraram a TRT extrapolando o limite da norma em poucos casos para a modelagem da linha curta, no geral os disjuntores tiveram um bom funcionamento. Nos casos em que houve superação, sugere-se mudar as características dos disjuntores para que o sistema tenha um bom funcionamento. Nos casos de sistema com modelagem de linha pi e linha com parâmetros distribuídos os resultados não mostraram superação para nenhum disjuntor testado tanto para curto-circuito monofásico quanto para curto-circuito trifásico. O sistema para teste apresentou resultados interessantes a partir dessas variações no modelo de linha que concluiremos no tópico 4.

### 3.6 Considerações finais

Este capítulo atual apresenta a metodologia, simulações e os resultados que foram importantes para conclusão do trabalho. A partir da simulação da TRT para os disjuntores escolhidos através do software ATP, esses resultados foram comparados a sua norma para que fosse feita à análise quanto a superação tanto em valores de pico quanto nos valores da taxa de crescimento. Essa comparação foi realizada através da comparação das curvas da TRT com a envoltória estabelecida por norma IEEE C37.06, analisando as situações quanto a sua superação pela taxa de

crescimento e valor de pico em diferentes modelos de linha de transmissão, para curto-circuito monofásico e trifásico.

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada a implementação de três tipos de modelos de linhas de transmissão como alternativa a fazer uma avaliação das mudanças a respeito da superação, através da TRT obtida em disjuntores de alta tensão. O ATP, software utilizado, facilitou a realização das simulações por ser de fácil manuseio.

Assim como mencionado nas considerações dos resultados, os casos analisados em alguns pontos demonstraram superação no disjuntor. Essa superação se deu devido aos valores que são descritos por norma serem extrapolados.

No modelo de linha curta é interessante analisar que em alguns casos que testamos o disjuntor sofreu uma superação, essa superação se deu por taxa de crescimento (TCTRT). Vimos também que em algumas TRT's a simulação apresentou uma instabilidade numérica que foi causada no software ATP, estes resultados não foram apresentados no trabalho devido a sua imprecisão.

Geralmente, o modelo de linha utilizado é o modelo de linha curta, ou, no máximo, de linha média (modelo pi) em simulações, o modelo de linha longa não é muito utilizado. Neste trabalho, os casos de modelagem de linha pi e linha com parâmetros distribuídos (linha média e linha longa), não mostraram superação para nenhum disjuntor testado tanto para curto-circuito monofásico quanto para curto-circuito trifásico. Uma vantagem perceptível do sistema pi em relação aos outros, é o fato de obter os resultados com muito pouco erro. No entanto o caso dos parâmetros distribuídos, pode-se analisar o fato de suas repostas serem mais precisas que os outros modelos. Com isso, os resultados nos mostram que o transitório das linhas tem uma influência na forma de onda da TRT, o que em alguns casos pode levar o disjuntor a sofrer uma superação.

### 4.1 Sugestões para trabalhos futuros

Após pesquisas nas mais diversas literaturas, de forma a dar continuidade para estudos, devem ser avaliadas possibilidades de novos trabalhos que deem sequência a essa pesquisa. Ficam como sugestões para próximos trabalhos:

- Análise de TRT em um sistema real usando modelagem de linha média e longa;

- Análise de disjuntores reais, conhecendo suas características para aplicação específica da norma;
- Análise aprofundada sobre o efeito que a representação da capacitância das linhas e equipamentos têm sobre a forma de onda da TRT;

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Fernando Rodrigues. **Característica do Disjuntor para abertura de Linha de Transmissão em vazio Metodologia de Estudo**. UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá MG, 2006.
- ALVES, Waschington Fernandes. **Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2007.
- ALVES, Rimon. **Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)**. Belo Horizonte, 2012.
- ARANTES, Ivan Barcelos. **Tecnologia de Chaveamento com disjuntores de média e alta tensão**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 62271-200**: informação e documentação, referências e elaboração. Rio de Janeiro, 2007.
- AZEVÊDO, Wilker Victor. **Contribuições para Análise e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória**. Campina Grande, 2010.
- CAVALCANTE, Rosângela Rodrigues Guido; MOURA, Danielly Formiga Peixoto. **Impacto da análise de disjuntores e religadores quanto a TRT para melhorias da qualidade do serviço**. João Pessoa, PB, 2009.
- COLOMBO, Roberto. **Disjuntores de alta tensão**. São Paulo: Nobel: Siemens S.A., 1986.
- DUFOURNET, Alexander. **Transient Recovery Voltage (TRV) for High Voltage Circuit Breakers**. IEEE Calgary, Canadá. 2008.
- FENOCCHIO, Giovana. **Modelagem de Transformadores de Potência para Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória**. Rio de Janeiro, dezembro de 2013.
- GARZON, Ruben Dário. **High Voltage Circuit Breakers - Design and Applications**. Tennessee - Estados Unidos da América: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- IEEE std C37.011. **IEE application Guide for transiente Recovery Voltage for AC high-voltage Breakes Rated on Symmetricalcurrente basis**. Proceedings of the IEEE, 2005.
- IEEE std. C37.06. - **IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V**. Proceedings of the IEEE, 2009.
- DE MOURA, Thyago. **Avaliação das Solicitações do Disjuntor da Linha de**

**Transmissão de Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

NOBRE, Diana. **Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV as Solicitações de TRT.** Campina Grande, novembro de 1999.

OLIVEIRA PRETO, Patrícia. **Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017

PORTELA, Carlos; ALVIM, Maria. **Soluções não Convencionais em CA Adequadas para Transmissão a Distância muito Longa – Uma Alternativa para o Sistema de Transmissão da Amazônia.** Seminário: Transmissão de Energia Elétrica a Longa Distância. Recife, PE, Outubro, 2007.

SINDER, Daniel. **Métodos de cálculo de tensão de restabelecimento transitória para análise da superação de disjuntores de alta tensão.** Dissertação de mestrado apresentada ao COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

STEVENSON, William. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência** - Editora McGraw- Hill do Brasil- 1986.

WAGNER, Charles; SMITH, Melvin. **Analysis of Transient Recovery Voltage (TRV) Rating Concepts.** IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, November, 1984.

W SERVICE. **Disjuntores.** Disponível em: < <https://www.wservice.com.br/serv/>>. Acesso em: Dezembro, 2020.

ZANETTA, Luis Cera. **Equivalentes de Redes Elétricas para Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos no Programa ATP.** FUSP e CTEEP, São Paulo, 2005.

## ANEXOS

### ANEXO A – DADOS DO SISTEMA DE 9 BARRAS

As Tabelas A.1 a A.4 mostram os dados sistema de 9 barras utilizados nos casos simulados deste trabalho, esses dados foram retirados da fonte (Alves, 2007). Nessas tabelas são apresentados os dados de linha, geradores, transformadores e de carga, respectivamente.

Tabela A1- Dados de linha em pu.

Linha	R <sub>+</sub> (%)	X <sub>+</sub> (%)	B (MVar)	R <sub>0</sub> (%)	X <sub>0</sub> (%)
3-5	1,7	9,2	15,8	5,1	27,6
3-8	1,0	8,5	17,6	3,0	25,5
4-6	0,85	7,2	14,9	2,55	21,6
4-7	0,9	7,9	16,2	2,7	23,7
5-7	3,2	16,1	30,6	9,6	48,3
6-8	1,1	8,4	25,6	3,3	25,2
7-9	1,19	10,08	20,9	3,57	30,24
8-9	3,9	17,0	35,8	11,7	51,0

Fonte: (ALVES, 2007)

Tabela A2 – Dados dos geradores.

Barra	P (MW)	Q (MVar)	
		Geração	Absorção
1	250	122	122
2	200	96	96

Fonte: (ALVES, 2007)

Tabela A3 – Dados dos transformadores.

Transformador	Ligação (kV)	S (MVA)	X <sub>+</sub> (%)	X <sub>0</sub> (%)
1-3	13,8 $\Delta$ /230Yg	300	5,34	5,12
2-4	13,8 $\Delta$ /230Yg	260	7,68	7,33

Fonte: (ALVES, 2007)

Tabela A4 – Dados de carga.

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

Fonte: (ALVES, 2007)

$R_+$  - Resistência de sequência positiva.

$X_+$  - Reatância de sequência positiva.

$R_0$  - Resistência de sequência zero.

$X_0$  - Reatância de sequência zero.

$B$  – Susceptância shunt.

$P$  – Potência ativa.

$Q$  – Potência reativa.

$S$  – Potência aparente.