

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**CRISTIANE GOMES SCHMITT**

**DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA**

**Alegrete - RS**

**2023**

**CRISTIANE GOMES SCHMITT**

**DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA**

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**

**2023**

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) .

S355d Schmitt, Cristiane Gomes

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA /  
Cristiane Gomes Schmitt.

43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2023.

"Orientação: Chrystian Dalla Lana da Silva".

1. Tensão de restabelecimento transitória. 2. Sistema  
elétrico de potência. 3. Curto-Circuito. 4. Disjuntor. I.  
Título.

**CRISTIANE GOMES SCHMITT**

**DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO  
NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA**

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: 17 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Eng. Fabiano Aguiar de Oliveira  
UNIPAMPA

---



Assinado eletronicamente por **CHRYSIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/01/2023, às 09:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/01/2023, às 09:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **FABIANO AGUIAR DE OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 18/01/2023, às 09:38, 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 **1028275** e o código CRC **03FBB207**.

---

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

Esse trabalho é dedicado especialmente aos meus pais Elizandra e Sergio e para meu futuro esposo Douglas, por estarem sempre ao meu lado e por sempre me apoiarem nessa etapa tão importante.

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de dedicar essa conquista às pessoas que estiveram ao meu lado e contribuíram de alguma forma para essa realização.

Agradeço, em especial, a pessoa que esteve ao meu lado em todos os momentos e me ajudou emocionalmente nesses últimos anos, meu futuro esposo, Douglas.

Aos meus pais Sergio e Elizandra que apoiaram as minhas escolhas e sempre me incentivaram para a realização dos meus objetivos. A minha irmã Rafaela por me motivar em momentos difíceis e aos meus sogros que me apoiaram.

A minha segunda família que conheci ao longo dessa caminhada Ana, Elandro, Caique, Tia Fatima e Vó Marieta, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e ajudando.

Ao meu orientador professor Chrystian, que sempre esteve a disposição para ajudar com minhas dúvidas muito obrigada.

Agradeço à UNIPAMPA e a todos professores e servidores que conheci durante essa caminhada.

“O mundo não se divide em pessoas boas e más, todos temos luz e trevas dentro de nós, o que importa é o lado o qual decidimos agir. Isso é o que realmente somos”.

Sirius Black – Harry Potter e a Ordem da Fênix



## RESUMO

A análise de tensão de restabelecimento transitória (TRT) vem sendo cada vez mais importante devido ao aumento dos sistemas elétricos de potência (SEP). Esses estudos são necessários para maior confiabilidade dos sistemas, pois ajuda nos dimensionamentos de equipamentos de SEP de modo a prevenir falhas futuras. Por isso, este trabalho buscou determinar a tensão de reestabelecimento transitória utilizando simulações no domínio da frequência. Para facilitar a análise de dados da TRT utilizou-se técnicas de simulação, com os softwares ATPdraw, HarmZs e Matlab. Foram apresentados resultados para os estudos de alguns casos em que ocorreu a simulações de curto-circuitos monofásicos e trifásicos e por fim aplicando conceitos conhecidos. Observa-se, nos casos estudados, que não se obteve os resultados desejados, ou seja, uma representação da onda da TRT. Assim, conclui-se que um sistema complexo exige um estudo mais aprofundado e detalhado para que os resultados encontrados sejam os desejados.

Palavras-Chave: tensão de restabelecimento transitória, sistema elétrico de potência curto-circuito, disjuntor.

## **ABSTRACT**

Transient restoration voltage (TRV) analysis has become increasingly important due to the increase of electrical power systems (EPS) size. These studies are necessary for greater reliability of the systems, as it helps in the sizing of EPS equipment in order to prevent future failures. Therefore, this work sought to determine the transient recovery voltage using simulations in the frequency domain. To facilitate the analysis of TRV data, simulation techniques were used, with ATPdraw, HarmZs and Matlab software. Results were presented for the studies of some cases in which simulations of single-phase and three-phase short circuits occurred and finally applying known concepts. It is observed, in the cases studied, that the desired results were not obtained, that is, a representation of the TRV wave. Thus, it is concluded that a complex system requires a more in-depth and detailed study so that the results found are the desired ones.

Keywords: transient reset voltage, electrical power system, short circuit, circuit breaker.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de disjuntor a SF6 do tipo pressão única. ....	19
Figura 2 - Processo de interrupção de corrente alternada .....	20
Figura 3 - Exemplo onde não ocorre superação. ....	22
Figura 4 - Exemplo onde ocorre superação. ....	23
Figura 5 – Sistema Teste .....	26
Figura 6 – Condições de simulação em ATPdraw.....	26
Figura 7 – Corrente de curto-circuito monofásico na linha 6-4.....	28
Figura 8 – Impedância obtida da linha 6-4. ....	28
Figura 9 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC monofásico na linha 6-4.....	29
Figura 10 – Resultado da tensão para o CC monofásico na linha 6-4 .....	29
Figura 11 – Corrente de curto-circuito trifásico na linha 6-4.....	30
Figura 12 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC trifásico na linha 6-4.....	31
Figura 13 – Resultado da tensão para o CC trifásico na linha 6-4 .....	31
Figura 14 – Corrente de curto-circuito monofásico na linha 5-7.....	32
Figura 15 – Impedância da linha 5-7. ....	32
Figura 16 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC monofásico na linha 5-7....	33
Figura 17 – Resultado da tensão para o CC monofásico na linha 5-7 .....	33
Figura 18 – Corrente de curto-circuito trifásico na linha 5-7.....	34
Figura 19 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC trifásico na linha 5-7.....	34
Figura 20 – Resultado da tensão para o CC trifásico na linha 5-7 .....	35
Figura 21 – Corrente de curto-circuito monofásico na linha 9-8. ....	35
Figura 22 – Impedância da linha 9-8. ....	36
Figura 23 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC monofásico na linha 9-8....	36
Figura 24 – Resultado da tensão para o CC monofásico na linha 9-8. ....	37
Figura 25 – Corrente de curto-circuito trifásico na linha 9-8. ....	37
Figura 26 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC trifásico na linha 9-8.....	38
Figura 27 – Resultado da tensão para o CC trifásico na linha 9-8 .....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das Cargas.....	42
Tabela 2 – Dados das Linhas.....	42
Tabela 3 – Dados dos Geradores .....	42
Tabela 4 – Dados dos transformadores .....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP - *Alternative Transient Program*

CC – Corrente Contínua.

COORD – Coordenador

FFT – Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)

Icc - Corrente de Curto-Circuito

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IFFT - Transformada Rápida de Fourier Inversa (Inverse Fast Fourier Transform)

SEP - Sistema Elétrico de Potência

SF6 - Hexafluoreto de Enxofre

TRT - Tensão de Restabelecimento Transitória,

R+ - Resistência de sequência positiva.

X+ - Reatância de sequência positiva.

Ro – Resistência de sequência zero.

Xo – Reatância de sequência zero.

B – Susceptância shunt.

P – Potência ativa.

Q – Potência reativa.

S – Potência aparente.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 OBJETIVO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 ESTRUTURA .....</b>	<b>16</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Disjuntores.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Definição .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2 Características de disjuntores .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3 Função de um disjuntor .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.4 Principais componentes de um Disjuntor .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.5 Funcionamento do Disjuntor .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Tensão de restabelecimento transitória (TRT) .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1 Descrição e características do fenômeno.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2 Superação de disjuntores por TRT .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT) .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Considerações Finais .....</b>	<b>24</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Determinação da TRT.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Sistema Teste .....</b>	<b>25</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Casos Analisados .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.1 Caso I – Curtos-Circuitos monofásico e trifásico em 50% da linha 6-4.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.2 Caso II – Curto-Circuito monofásico e trifásico linha 5-7 .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.3 Caso III – Curto-Circuito monofásico e trifásico na linha 9-8.....</b>	<b>35</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXO: TABELAS ESPECIFICAÇÕES PARÂMETROS.....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Disjuntores são dispositivos de proteção para instalações elétricas. Quando há um aumento da corrente elétrica, é esse dispositivo que atua no sistema elétrico de potência, através dos relés de proteção, interrompendo o funcionamento do circuito, dessa forma protegendo e evitando danos ao sistema elétrico.

Nos sistemas de alta tensão, o disjuntor é acionado quando existe o recebimento de alguma corrente de sobrecarga ou curto-circuito. Nesse caso, entre os terminais do dispositivo, ocorre a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), que é um transitório na diferença de potencial, o qual aparece entre os terminais do disjuntor, no momento em que a corrente fica nula.

### 1.1 Objetivo

A fim de determinar a TRT em disjuntores de alta tensão, para facilitar a determinação da TRT algumas simulações foram feitas, utilizando *softwares* como: ATPdraw, HarmZs e Matlab. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo:

- Determinar a tensão de reestabelecimento transitória utilizando simulações no domínio da frequência.

### 1.2 Justificativa

Segundo Rodrigues (2018), a crescente expansão do desenvolvimento da tecnologia, interligando sistemas elétricos de forma eficiente. Para isso, surgem dispositivos cada dia mais sensíveis às perturbações, exigindo avaliações de desempenhos dessas grandezas elétricas, estudando tais dispositivos em diversos ambientes e situações, tais como: desequilíbrios, picos e oscilações de tensão, entre outros fatores que são capazes de ocasionar danos aos componentes do sistema. Sobrepondo a isto ainda deve-se considerar o envelhecimento das redes elétricas como um fator importante.

Para que o sistema esteja sempre operante, utiliza-se os disjuntores como um dos principais equipamentos de proteção. Esses dispositivos eletromecânicos são responsáveis pelo isolamento de curtos-circuitos e manobras de chaveamento,

minimizando os efeitos sobre o restante do sistema elétrico para possíveis falhas que possam ocorrer. Quando a corrente elétrica ultrapassa as especificações nominais definidas, ocorre a superação do dispositivo.

Em sistemas elétricos, quando um disjuntor interrompe uma corrente elétrica proveniente de um curto-circuito ou sobrecarga, surge entre os seus terminais, uma diferença de potencial, a qual caracteriza-se como um fenômeno chamado de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT). Dessa forma, a TRT é caracterizada por ser um transitório eletromagnético, que ocorre no momento em que a corrente elétrica tende a zero (GARZON, 2012).

Dessa forma, como a superação por TRT de um disjuntor pode causar danos irreversíveis ao sistema elétrica, esse tema exige diversos estudos para avaliar o comportamento das grandezas elétrica, buscando a minimização dos efeitos nos equipamentos do SEP.

### **1.3 Estrutura**

O Capítulo 1 mostra a introdução, que abrange a definição do tema, objetivo e justificativa do trabalho. O Capítulo 2 apresenta fundamentação teórica, onde os assuntos abordados são disjuntores e TRT, importantes para o desenvolvimento do trabalho com base em estudos e publicações referenciadas. O capítulo 3 mostra a metodologia, onde são especificados os métodos e ferramentas utilizadas para a análise dos dados. O capítulo 4 mostra apresentação de resultados, através de gráficos, para uma melhor visualização dos resultados. O capítulo 5 apresenta as considerações finais, com análise dos resultados e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e os anexos.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste Capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos em relação aos disjuntores, assim como a TRT e como ela surge entre os terminais de um disjuntor, as envoltórias relacionadas às normas técnicas e seus parâmetros de definição. Por fim, é abordada a superação de disjuntores.

### **2.1 Disjuntores**

Para fazer a análise a respeito da tensão de restabelecimento transitória é fundamental definir se um disjuntor se encontra adequado para suportar a corrente elétrica e atuar no sistema. Dessa forma, é imprescindível conhecer o funcionamento do disjuntor, o processo de análise de superação da TRT, do mesmo modo que as curvas envoltórias pré-estabelecidas por normas técnicas.

#### **2.1.1 Definição**

Disjuntores são equipamentos de proteção e manobra que buscam estabelecer, conduzir, interromper e suportar correntes elétricas, seja em condições normais, seja em condições adversas. São fundamentais para qualquer sistema que envolve energia. Todos os sistemas elétricos devem ter instalados esses dispositivos, mesmo numa rede de baixa tensão e complexidade, conforme Sampaio (2012).

Ainda segundo Garzon (2002), disjuntores são dispositivos eletromecânicos, que tem como função o transporte e interrupção de correntes sob condições normais, além da condução das correntes em condições anormais durante um intervalo de tempo, podendo interromper a corrente, como no caso de um curto-circuito.

Dessa forma, entende-se que disjuntores são dispositivos de segurança capazes de interromper uma falta no sistema elétrico, quando for necessário. Para que as funções de proteção de um disjuntor não se percam nas adversidades, como a falta de energia elétrica, eles são instalados em conjunto com relés específicos, quando forem de média ou alta tensão. Os relés monitoram os sinais das grandezas elétricas, acionando o mecanismo de abertura dos disjuntores sempre que suas lógicas de atuação forem satisfeitas, acionando o mecanismo de abertura dos

disjuntores sempre que suas logicas de atuação forem satisfeitas. Sem o comando do relé, os disjuntores se tornam apenas chaves de manobras (SAMPAIO, 12).

### **2.1.2 Características de disjuntores**

As características básicas dos disjuntores são praticamente as mesmas, variando basicamente as classes de tensão e corrente. Como todo equipamento, os disjuntores têm uma vida útil. Normalmente, esse tempo depende da erosão do material dos contatos, que normalmente são construídos de cobre, ligas de prata ou materiais altamente condutores. Esses contatos são acionados para interromper uma corrente de curto-circuito, e, nos casos de disjuntores de alta tensão, podem ser substituídos (W Service, 2022).

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 (SAMPAIO, 2012).

### **2.1.3 Função de um disjuntor**

Segundo Sampaio (2012), o disjuntor tem como principal função atuar com precisão quando ocorre uma falha no sistema. Isso pode ocorrer no interior de sua câmara de extinção ou com o auxílio de dispositivos pilotos que operam o mecanismo de abertura. Ao ser detectado o problema pelo relé, os contatos são abertos, através de energias mecânicas ou eletromagnéticas.

Para Rabito, Paloma e Silvestri (2011), as principais funções de um disjuntor são:

- Limitar os danos causados aos equipamentos do sistema elétrico ao interromper com rapidez a corrente de curto-circuito (I<sub>cc</sub>);
- Capacidade de interromper, estabelecer e conduzir correntes nominais de carga, correntes de magnetização de transformadores e reatores, além de correntes capacitivas de banco de capacitores e linhas a vazio;
- Suportar a tensão nominal quando os contatos estiverem abertos;
- Apresentar impedância infinita na posição aberta, tendo a capacidade de fechar em qualquer momento sem causar danos aos contatos, inclusive sob curto-circuito;

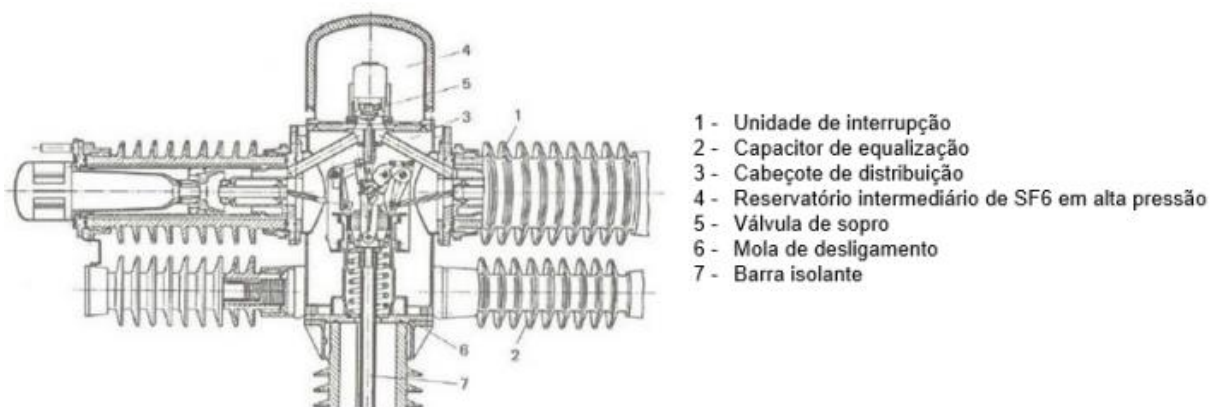
- Apresentar impedância desprezível na posição fechada, com a capacidade de interromper a corrente especificada sem causar sobretensões elevadas;
- Realizar movimento de abertura tão curto quanto 2 ciclos, mesmo estando vários meses na posição fechado;
- Suportar os efeitos do arco elétrico e os efeitos eletromagnéticos e mecânicos gerados pelo primeiro ciclo da lcc. Além disso, suportar os efeitos térmicos da corrente estabelecida na posição fechada;
- Permitir o fechamento do circuito elétrico para condições normais de carga, assim que o defeito for eliminado;

#### 2.1.4 Principais componentes de um Disjuntor

Cada parte de um disjuntor é projetada de acordo com sua função específica, que se adequa ao seu funcionamento. Para Sampaio (2012), entre todos os componentes de um disjuntor, destaca-se 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 aspectos construtivos, 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 SF6 do tipo pressão única, onde os componentes mais importantes estão destacados e numerados.

Figura 1 – Componentes de disjuntor a SF6 do tipo pressão única.

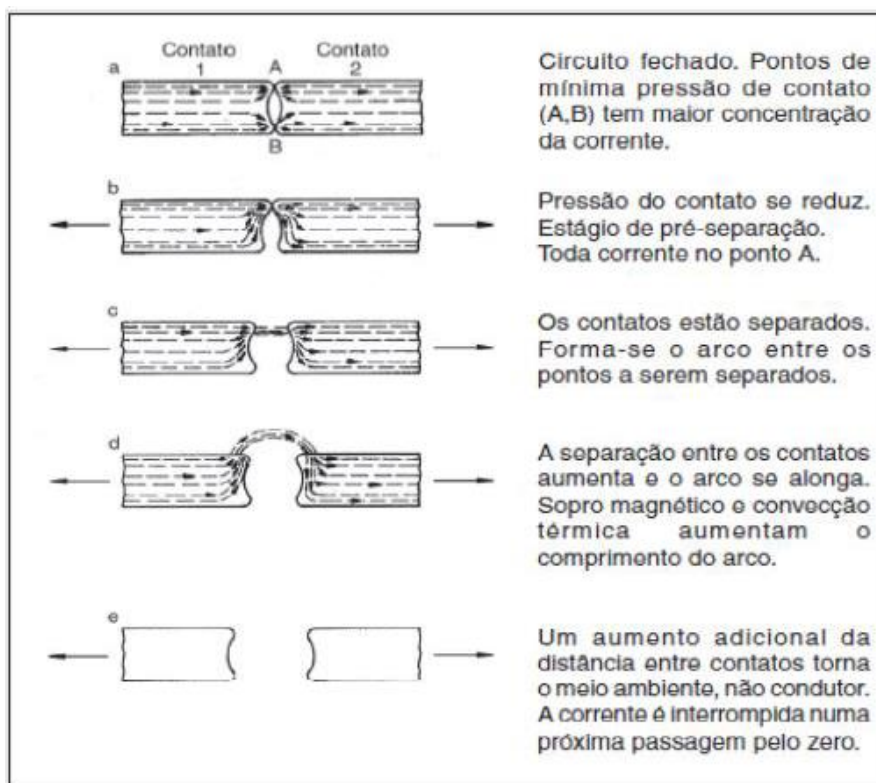


### 2.1.5 Funcionamento do Disjuntor

Para Sampaio (2012), o funcionamento do disjuntor como um dispositivo de segurança é através dos relés de proteção. Ao ocorrer uma falha, esse relé é responsável por detectar e emitir um comando a partir do circuito de controle do disjuntor para proteger os equipamentos do sistema. A partir desse comando, o disjuntor é acionado, abrindo seus contatos para eliminar o defeito e proteger o sistema. 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 (RABITO; PALOMA; SILVESTRI, 2021). A Figura 2 acima apresenta o processo e o passo a passo de como ocorre essa interrupção.

Figura 2 - Processo de interrupção de corrente alternada



Fonte: W SERVICE, 2006.

## **2.2 Tensão de restabelecimento transitória (TRT)**

Segundo Alves (2006), 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 não sejam extrapolados. Esses valores são definidos por uma norma apropriada.

### **2.2.1 Descrição e características do fenômeno**

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. Dessa forma, o sistema reage a esta interrupção de corrente na forma de oscilação transitória, o que dá origem à TRT (Alves, 2006).

Segundo Alves (2012), quando ocorre a interrupção, surge uma tensão entre os contatos, provocando 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, enquanto a fase 2 é caracterizada apenas por uma onda de frequência fundamental, onde se sucede o pico da TRT. Outro ponto importante é que a TRT depende também do circuito onde está sendo realizada a interrupção, podendo ser resistivo, indutivo, capacitivo ou uma combinação entre eles. Elementos concentrados e distribuídos nos levarão a reprodução de diferentes formas de ondas.

### **2.2.2 Superação de disjuntores por TRT**

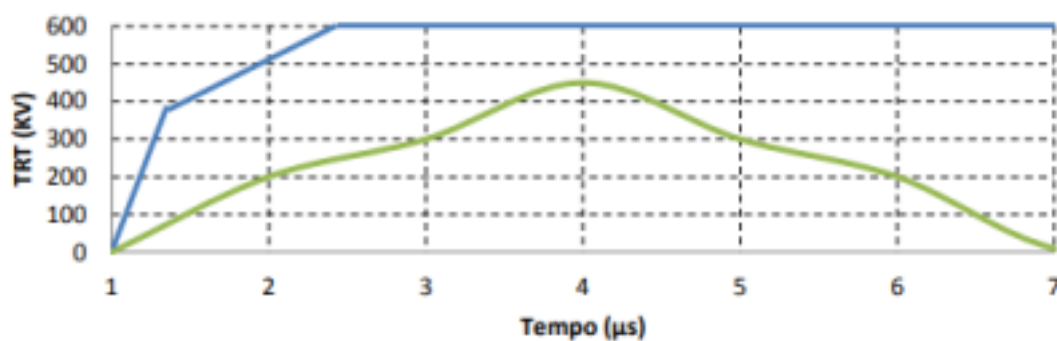
Para Alves (2006), os equipamentos de manobra são dimensionados para suportar correntes de carga e de curto-circuito nominais. No cenário de uma expansão no sistema, esses equipamentos podem sofrer um aumento na solicitação elétrica, causando na maioria dos casos a sua superação. A superação por TRT 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).

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 3 e 4 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 3 - Exemplo onde não ocorre superação.



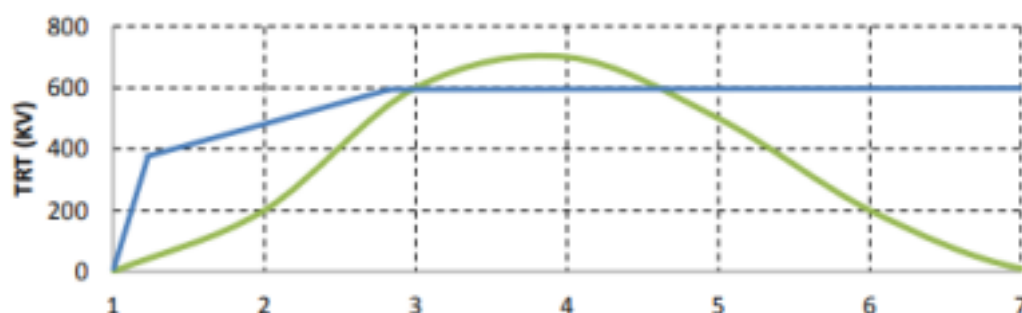
Fonte: Alves, 2012

Legenda:

Gráfico em azul envoltória;

Gráfico em verde TRT verificada;

Figura 4 - Exemplo onde ocorre superação.



Fonte: Alves, 2012

Legenda:

Gráfico em azul envoltória;

Gráfico em verde TRT verificada;

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 à rede para diversas frequências e, também, devido a sua facilidade de detalhamento na representação dos elementos que compõem o sistema.

### 2.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Como uma proposta para a análise dos dados, utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT). A FFT é um método de medição importante na ciência para fazer a medição de sinais. Ele converte um sinal em componentes espectrais individuais e assim fornece informações de frequência sobre o sinal proporcionando uma análise mais visual e prática. As FFTs são usadas para análise de falhas, controle de qualidade e monitoramento de condições de máquinas ou sistemas.

Esse algoritmo calcula, de maneira eficiente, a Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) e sua inversa (IFFT), com o intuito de acelerar os cálculos dessas integrais. Normalmente é feito em softwares de cálculo numérico que possuem a ferramenta de cálculo de convoluções (ZHU E MING DA *apud* TELES, 2021).

De forma simplificada, uma transformada rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo que calcula a transformada discreta de Fourier (DFT) de alguma sequência. Já a transformada discreta de Fourier é uma ferramenta para converter tipos específicos de sequências de funções em outros tipos de representações. Ou seja, ela transforma a estrutura do ciclo de uma forma de onda em componentes senoidais (DEFINIRTEC, 2022). Uma transformada rápida de Fourier pode ser usada em vários tipos de processamento de sinal, podendo ser útil na leitura de coisas como ondas sonoras ou para qualquer tecnologia de processamento de imagem. Com ela, é possível resolver vários tipos de equações ou mostrar vários tipos de atividade de frequência de maneiras úteis.

## **2.4 Considerações Finais**

No intuito de entender o processo de simulação da tensão de restabelecimento transitória e a verificação se é possível determinar a TRT através do domínio da frequência. Até aqui, foi apresentado a parte teórica dos conceitos gerais importantes para a determinação da TRT.



### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado detalhes do sistema teste utilizado as condições de simulações e os *softwares* que se utilizou.

#### 3.1 Determinação da TRT

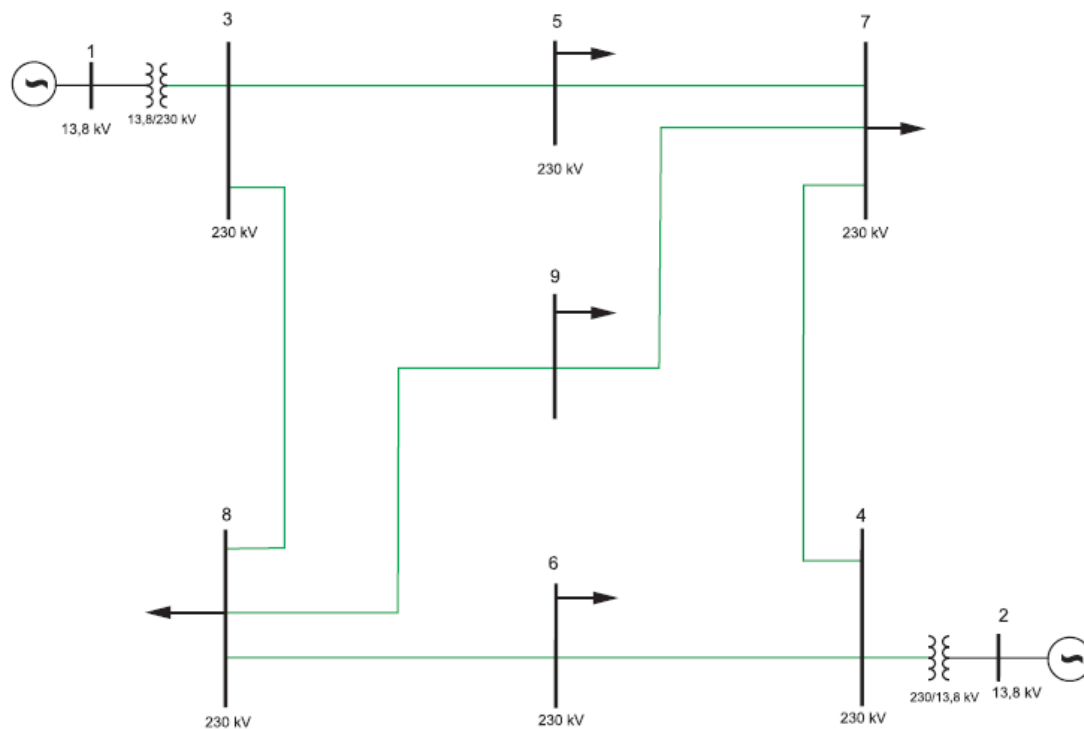
Para a realização desse trabalho utilizou-se um sistema teste para a determinação da TRT para curtos-circuitos (CC) trifásicos e monofásicos em diferentes linhas do sistema. A análise foi realizada através de três *software*:

- O ATPdraw para a simulação de um sistema de nove barras conforme Alves (2007). Dessa análise, foram obtidas as formas de onda de CC;
- O Harmzs, para a simulação realizada deste mesmo sistema, obteve-se respostas no domínio da frequência;
- O Matlab utilizou-se para processamento dos resultados obtidos pelos softwares citados acima para a determinação da TRT.

#### 3.2 Sistema Teste

O sistema teste está representado na Figura 5, onde o mesmo é utilizado nas simulações através dos softwares já citados. As especificações se encontram nas tabelas em Anexo ao trabalho.

Figura 5 – Sistema Teste



Fonte: Alves, 2012.

Para obter os valores das simulações algumas condições foram estipuladas conforme a Figura 6.

Figura 6 – Condições de simulação em ATPdraw

delta T:	1E-5
I <sub>max</sub> :	0.3
X <sub>opt</sub> :	60
C <sub>opt</sub> :	60

Fonte: Elaborado pelo Autor.

## **4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS**

Nesse capítulo será apresentado o que foi realizado nas simulações e as respostas que foram obtidas através do auxílio de gráficos.

### **4.1 Casos Analisados**

Para obter os valores de TRT, utilizou-se o sistema teste apresentado na Figura 5 e, através de simulações no ATPDraw e no HarmZs alguns casos foram analisados com as seguintes condições.

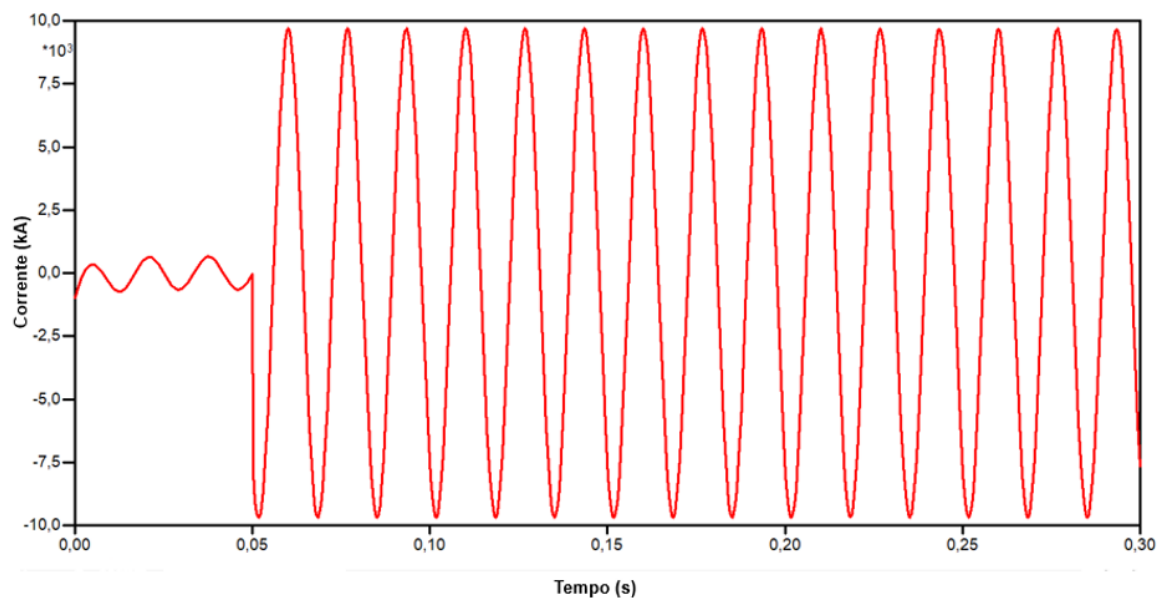
- Curto-Circuito monofásico e trifásico em 50% da linha 6-4;
- Curto-Circuito monofásico e trifásico em 50% da linha 5-7;
- Curto-Circuito monofásico e trifásico em 50% da linha 9-8;

Com a finalidade de chegar a um resultado de TRT, foi simulado o sistema teste 9 barras no ATPdraw a fim de obter as correntes de curto-circuito monofásico e trifásico. O mesmo sistema teste foi simulado no HarmZs a fim de encontrar as impedâncias em resposta em frequência do sistema teste.

#### **4.1.1 Caso I – Curtos-Circuitos monofásico e trifásico em 50% da linha 6-4**

Neste primeiro caso, a primeira parte da simulação realizada foi feita com um curto-circuito monofásico na fase A em 50% da linha 6-4 e a medição foi feita em relação ao disjuntor da barra 4 com os resultados representados na Figura 7.

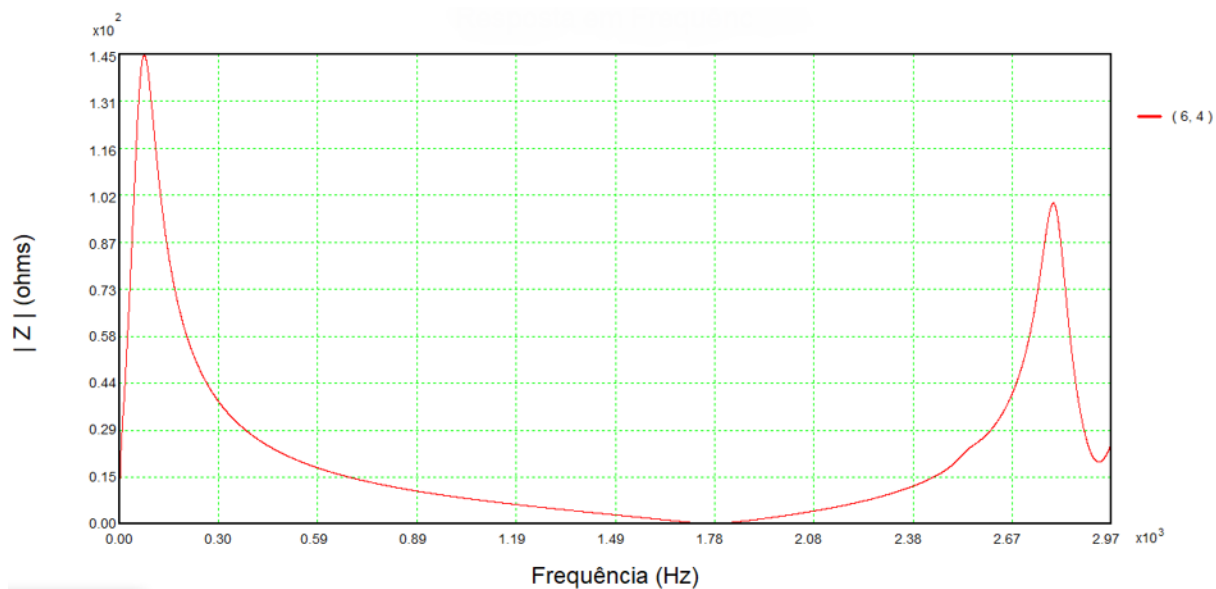
Figura 7 – Corrente de curto-circuito monofásico na linha 6-4.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Em seguida utilizando o HarmZs obteve-se a resposta da impedância da linha 6-4 como demonstrado na Figura 8.

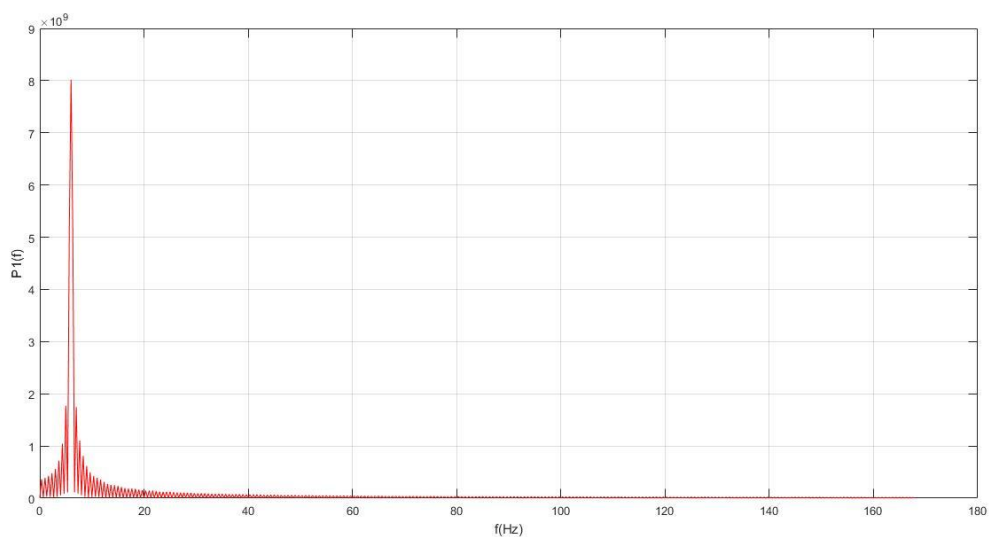
Figura 8 – Impedância obtida da linha 6-4.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Para determinar a TRT, os dados obtidos nos *softwares* citados foram exportados para o matlab, conforme Figura 9, mostrando o sinal da corrente após aplicar a fft.

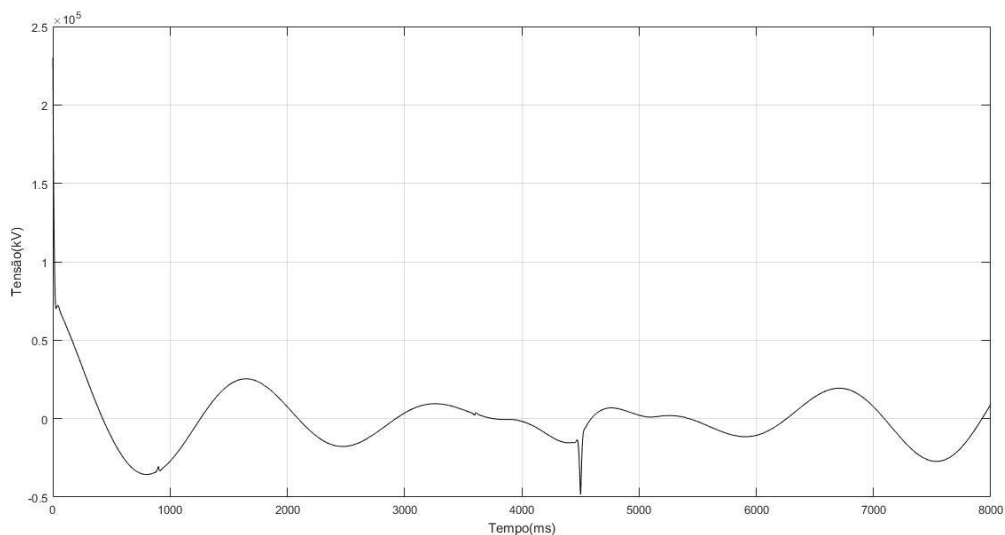
Figura 9 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC monofásico na linha 6-4



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Por fim, multiplicando os dados obtidos da impedância com a corrente após aplicar a fft, resultando na tensão representada na Figura 10.

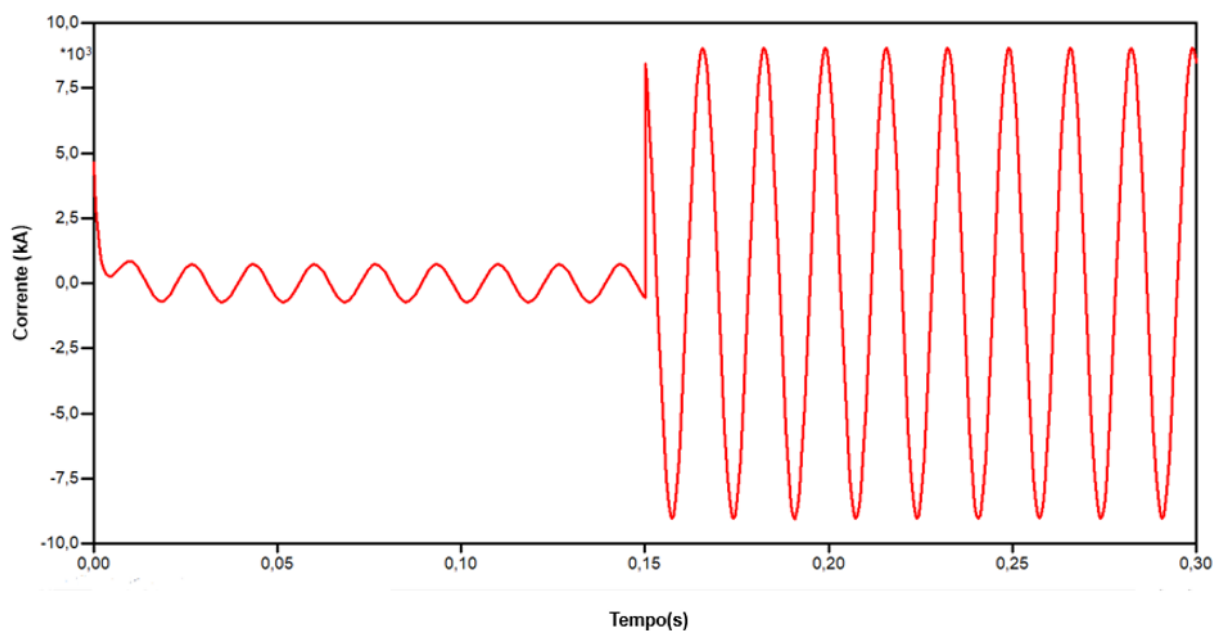
Figura 10 – Resultado da tensão para o CC monofásico na linha 6-4



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Após os dados obtidos anteriormente na mesma linha realizou-se um curto-circuito trifásico em 50% da linha 6-4 onde a medição foi feita no disjuntor da barra 4 onde a Figura 11 mostra a forma de onda de corrente.

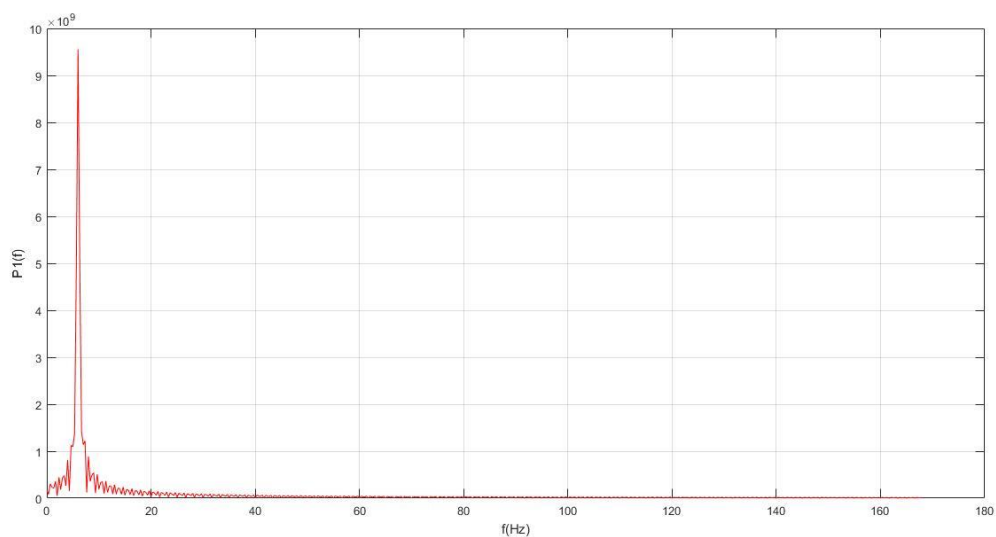
Figura 11 – Corrente de curto-circuito trifásico na linha 6-4.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

O mesmo processo é seguido para chegar ao resultado da TRT, conforme a Figura 12 mostra a corrente após aplicar a fft.

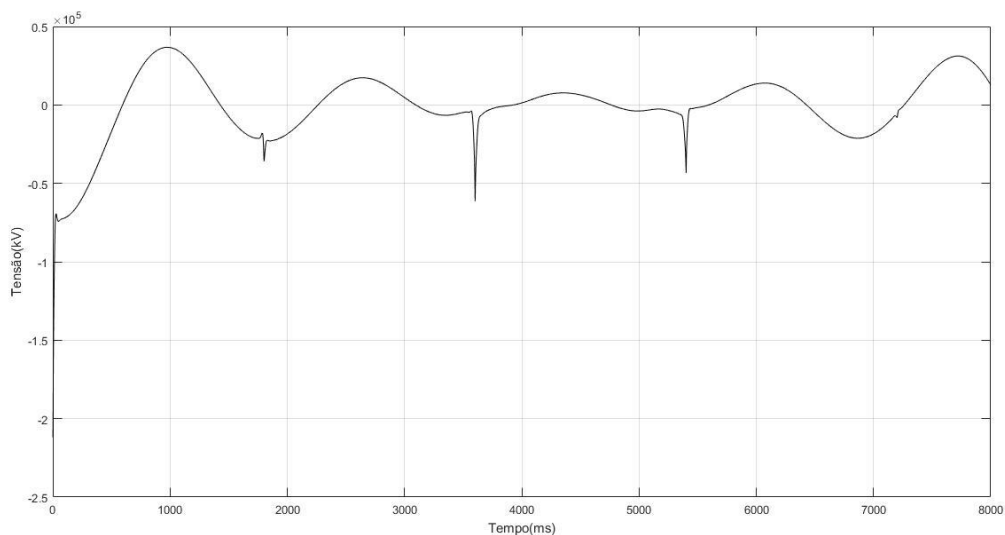
Figura 12 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC trifásico na linha 6-4



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Por fim a Figura 13 mostra o valor encontrado de tensão após a multiplicação entre o valor de impedância e a corrente obtida após aplicar a fft.

Figura 13 – Resultado da tensão para o CC trifásico na linha 6-4

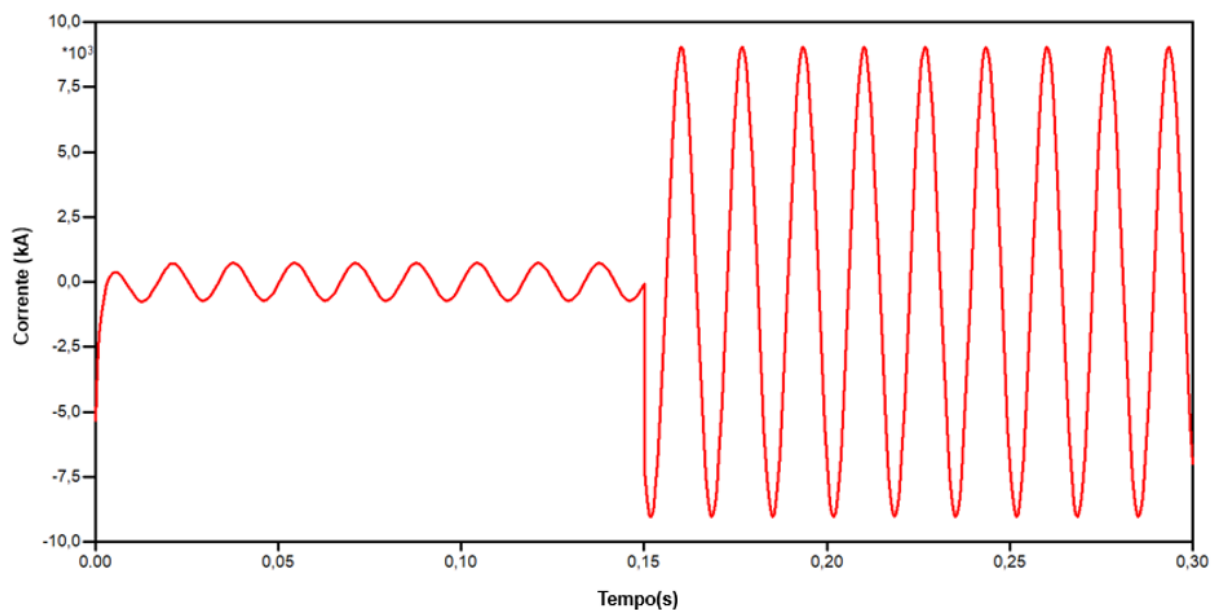


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

#### 4.1.2 Caso II – Curto-Circuito monofásico e trifásico linha 5-7

Assim como no caso anterior, a primeira parte da simulação realizada foi feita com um curto-circuito monofásico na fase C em 50% da linha 5-7 e a medição foi feita em relação ao disjuntor da barra 7, obteve-se resultados conforme Figura 14.

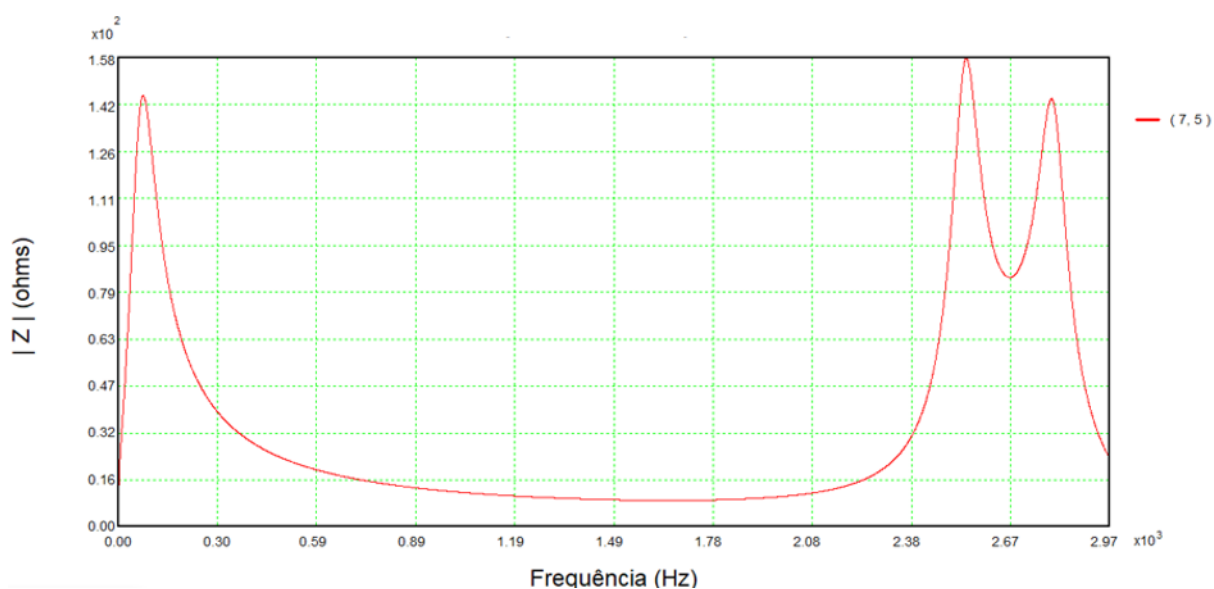
Figura 14 – Corrente de curto-circuito monofásico na linha 5-7.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Em seguida utilizando o HarmZs obteve-se a resposta da impedância como demonstrado na figura 15.

Figura 15 – Impedância da linha 5-7.

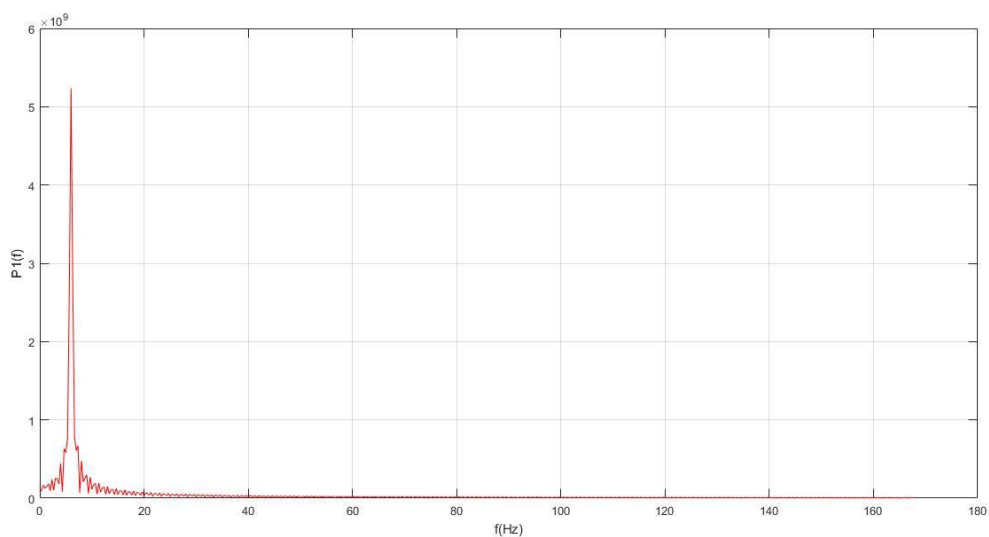


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Para determinar a TRT, os dados obtidos nos softwares citados foram exportados para o matlab. A Figura 16 mostra o sinal da corrente após aplicar a fft.



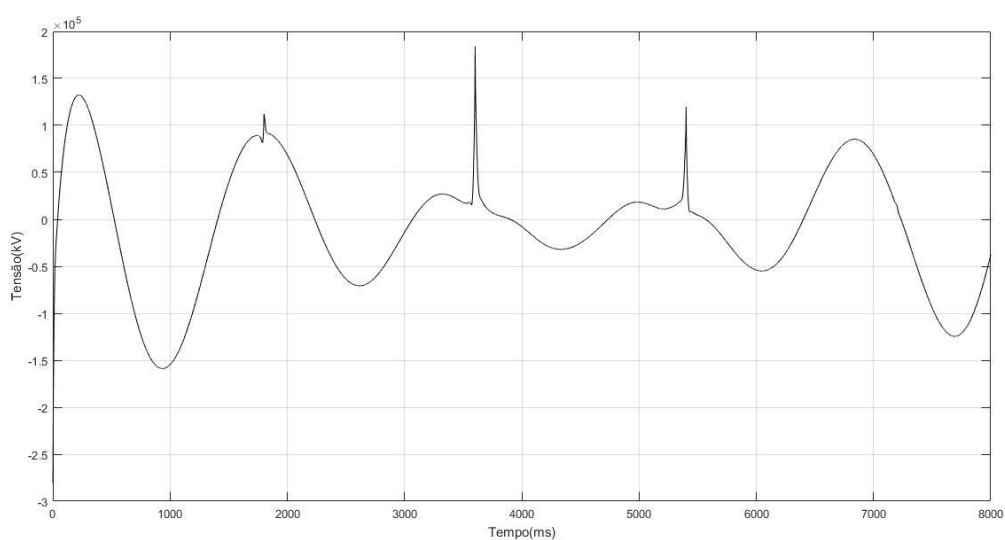
Figura 16 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC monofásico na linha 5-7.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Por fim, obtém-se o resultado da multiplicação dos dados obtidos da impedância com os valores de corrente após aplicar a fft resultando na tensão representada na Figura 17.

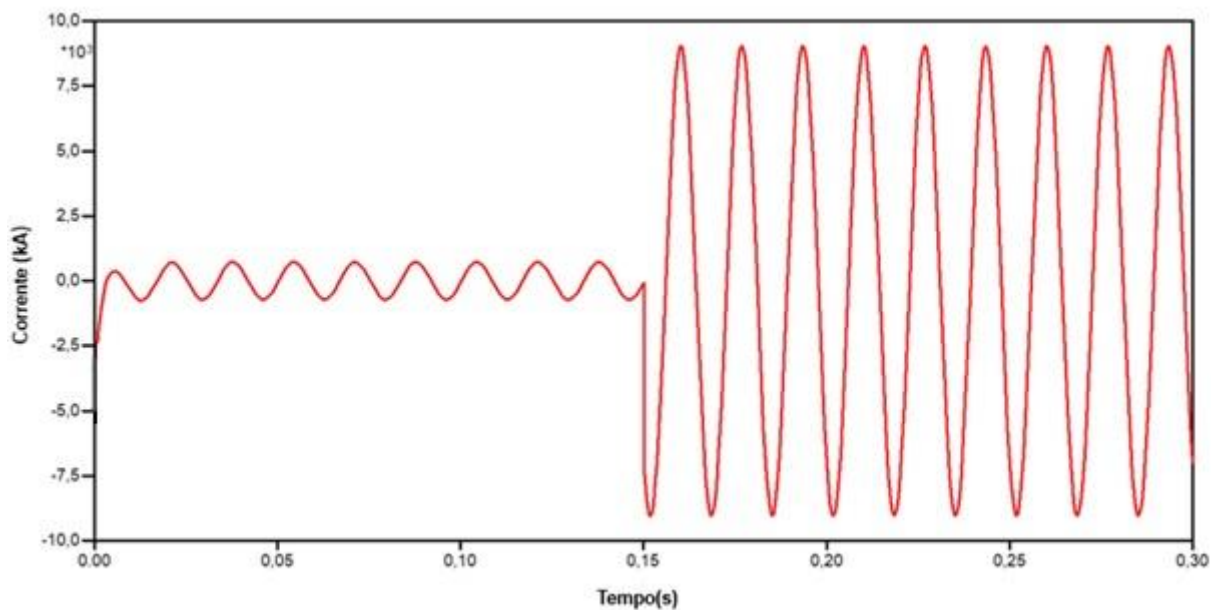
Figura 17 – Resultado da tensão para o CC monofásico na linha 5-7



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Após os dados obtidos anteriormente na mesma linha realizou-se um curto-circuito trifásico 50% da linha 5-7 e a medição foi feita em relação ao disjuntor da barra 7, conforme Figura 18, que mostra o valor de corrente.

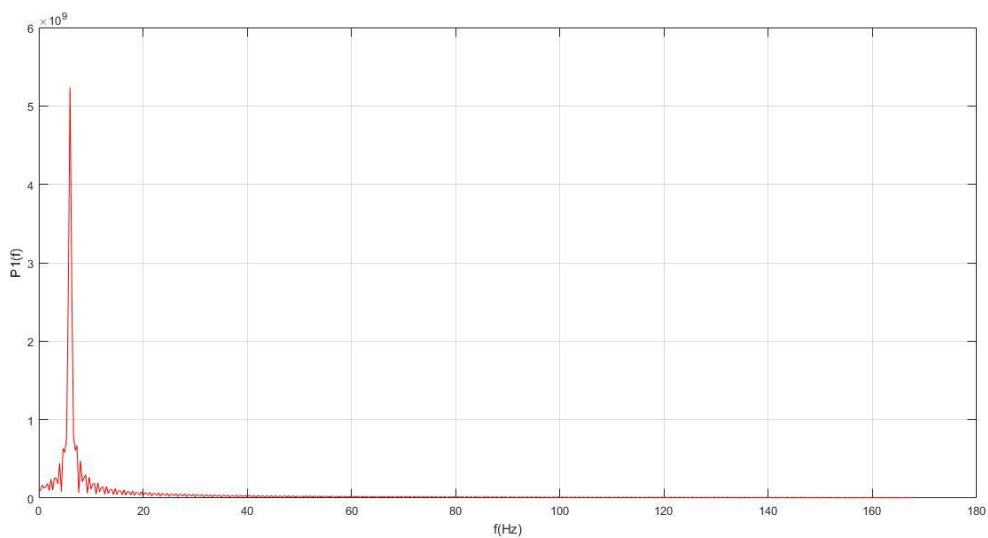
Figura 18 – Corrente de curto-circuito trifásico na linha 5-7.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

O mesmo processo é seguido para chegar ao resultado da TRT onde a Figura 19 mostra a corrente após aplicar a fft.

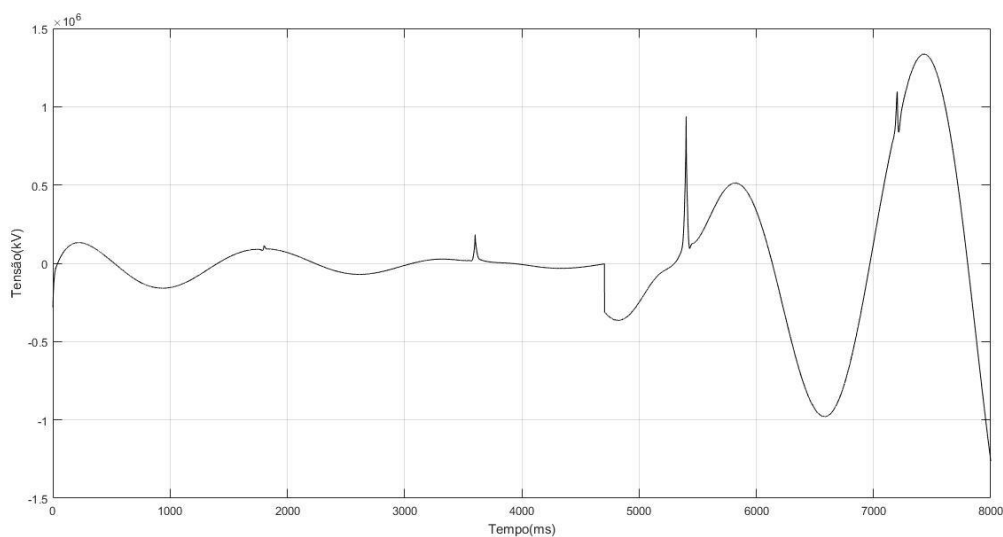
Figura 19 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC trifásico na linha 5-7



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

E por fim a Figura 20 mostra o valor de tensão gerada após multiplicarmos o valor da impedância com a corrente após aplicar fft.

Figura 20 – Resultado da tensão para o CC trifásico na linha 5-7

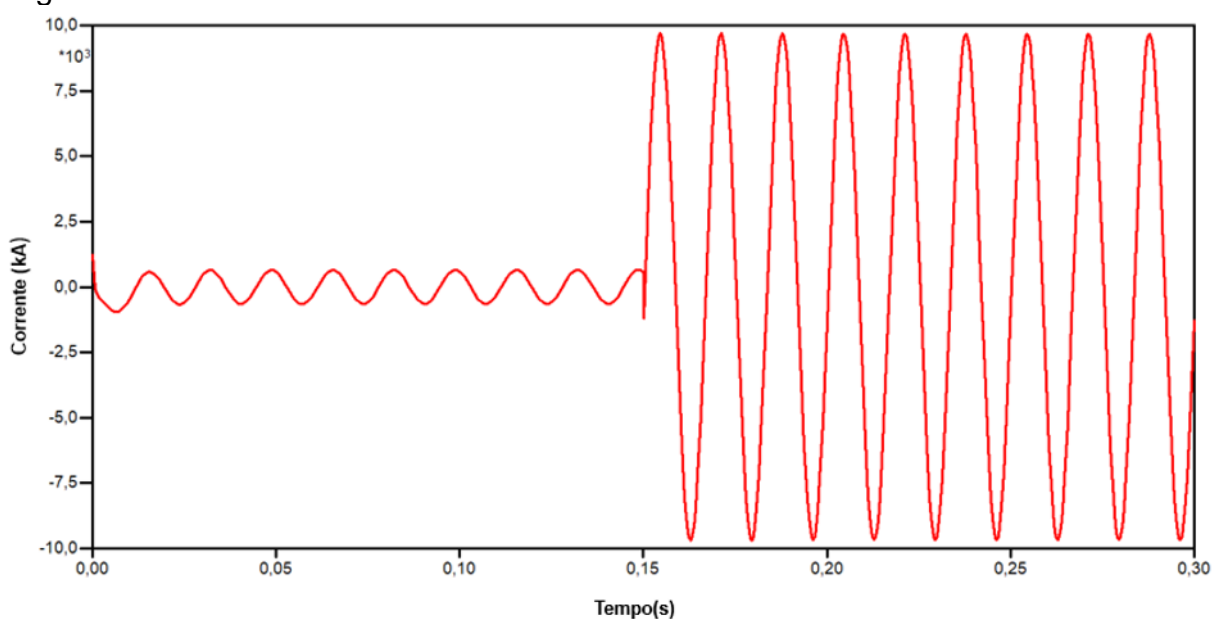


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

#### 4.1.3 Caso III – Curto-Circuito monofásico e trifásico na linha 9-8

Por fim nesse último caso, assim como nos anteriores, a primeira parte da simulação realizada foi feita com um curto-circuito monofásico na fase B em 50% da linha 9-8 onde a medição foi feita em relação ao disjuntor da barra 9 com os resultados representados na Figura 21.

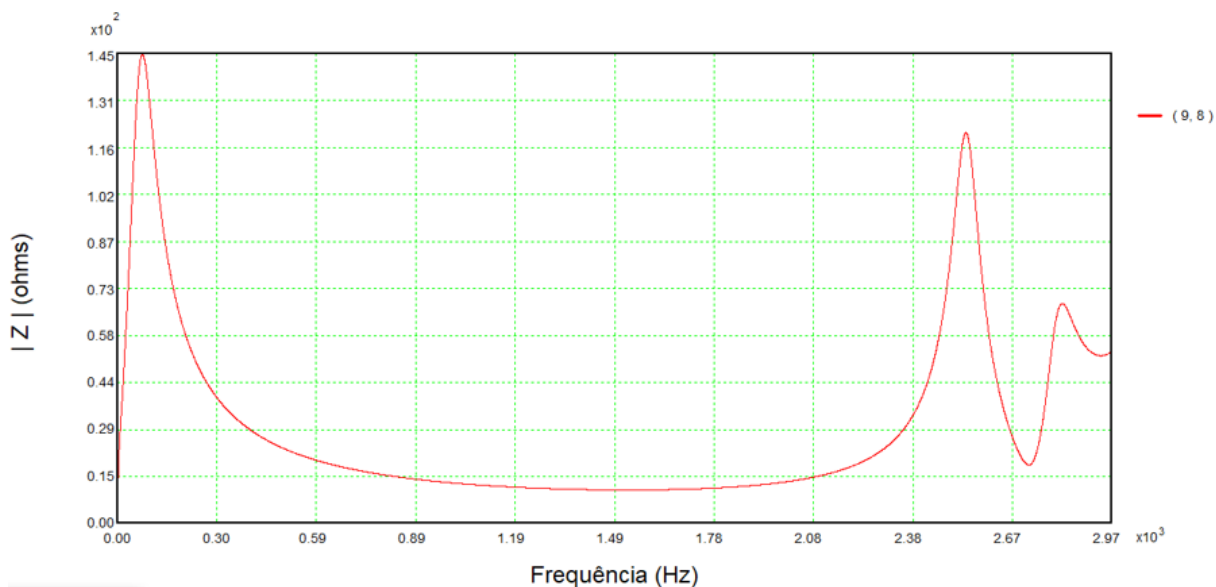
Figura 21 – Corrente de curto-circuito monofásico na linha 9-8.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Em seguida, utilizando o HarmZs obteve-se a resposta da impedância como demonstrado na Figura 22.

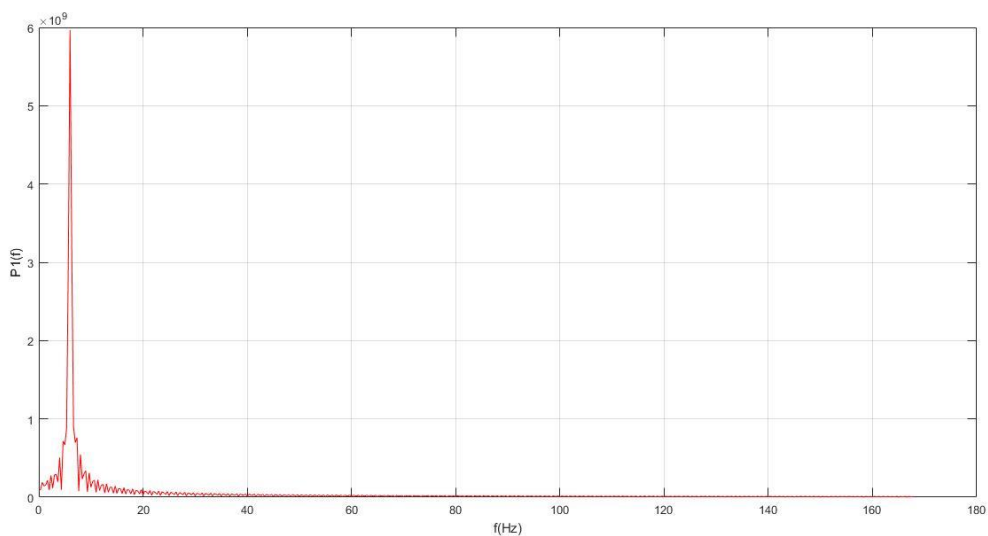
Figura 22 – Impedância da linha 9-8.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Para determinar a TRT, os dados obtidos nos *softwares* citados foram exportados para o matlab, conforme a Figura 23 mostra o sinal da corrente após aplicar a fft.

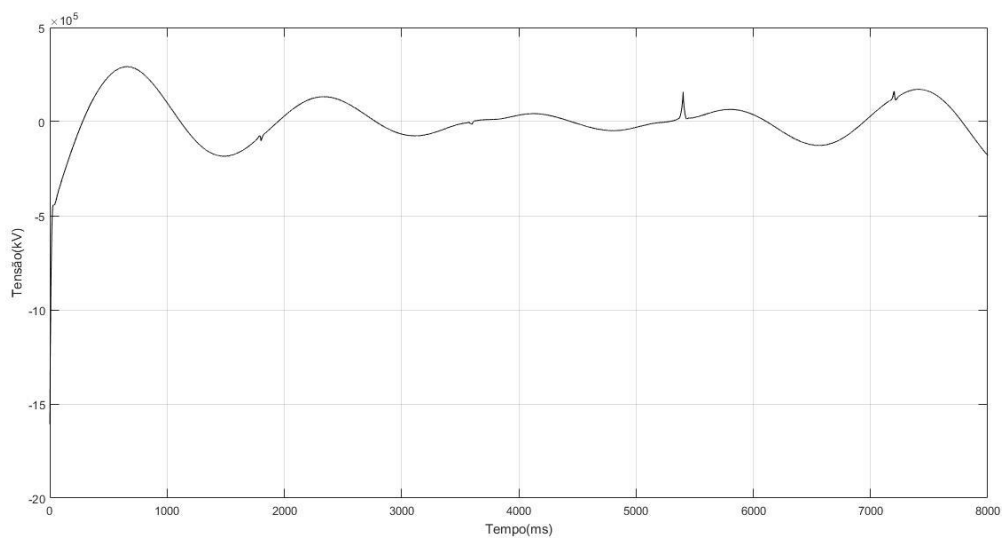
Figura 23 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC monofásico na linha 9-8



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Por fim multiplicamos os dados obtidos da impedância pela corrente após aplicar a fft resultando na tensão representada na Figura 24.

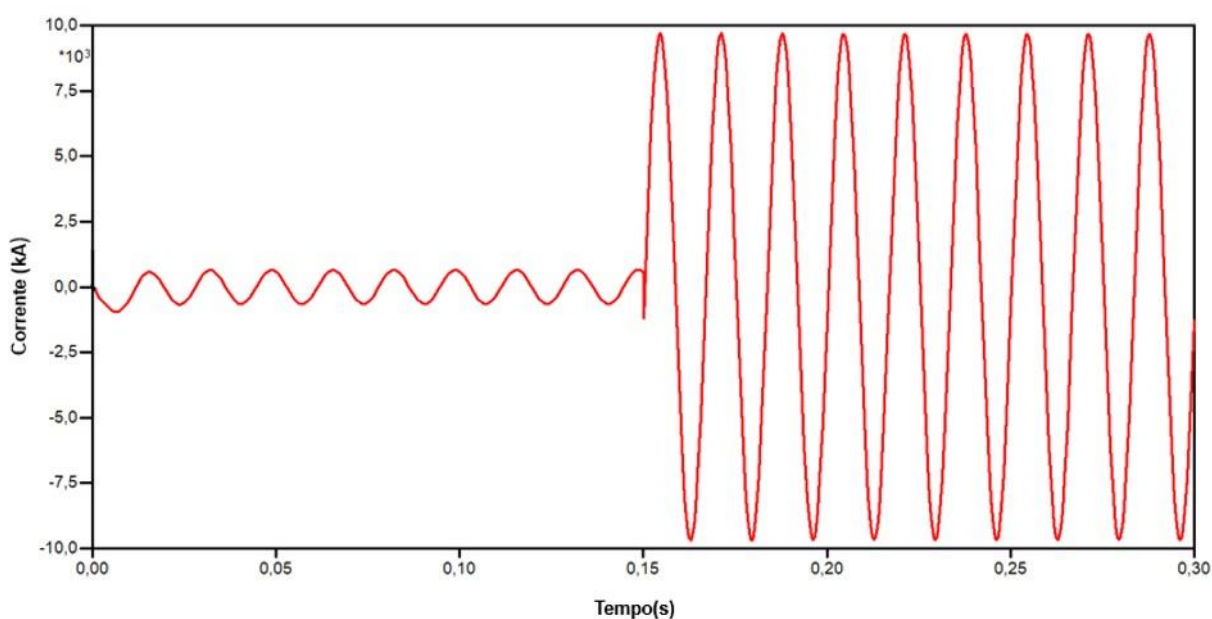
Figura 24 – Resultado da tensão para o CC monofásico na linha 9-8.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Após os dados obtidos anteriormente na mesma linha realizou-se um curto-circuito trifásico em 50 % da linha 9-8, medindo em relação ao disjuntor da barra 9 onde a Figura 25 mostra o valor de corrente.

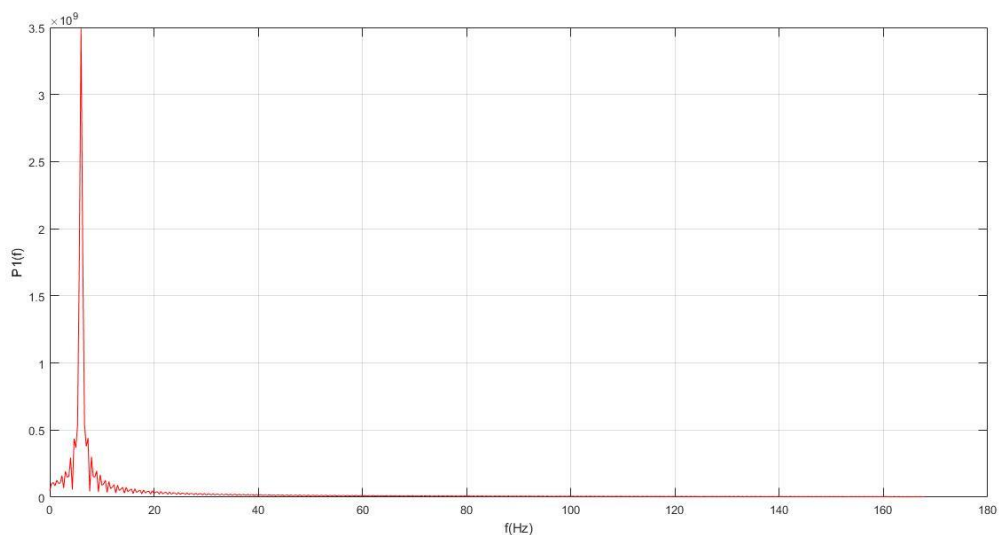
Figura 25 – Corrente de curto-circuito trifásico na linha 9-8.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

O mesmo processo é seguido para chegar ao resultado da TRT onde a figura 26 mostra a corrente após aplicar a fft.

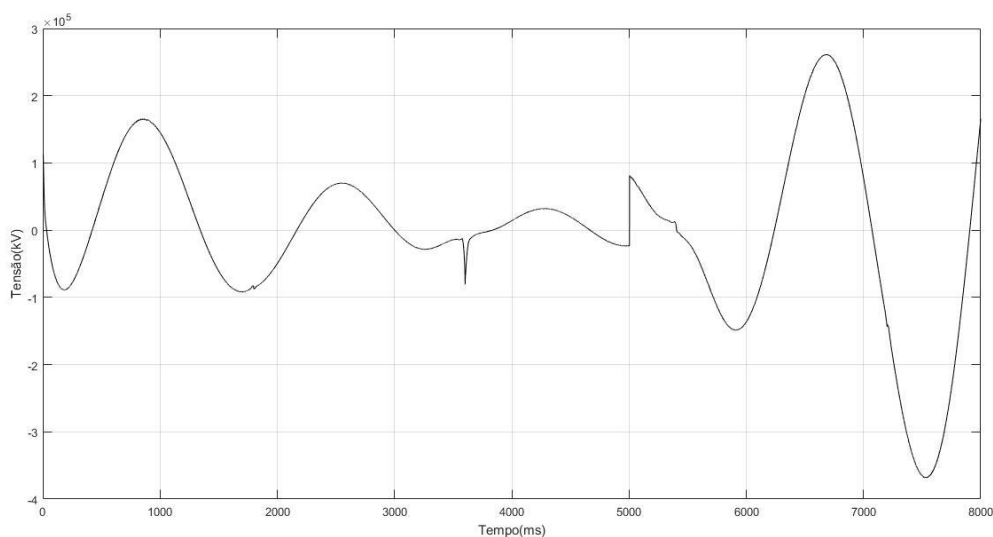
Figura 26 – Sinal resultado após aplicação da fft do CC trifásico na linha 9-8



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

E por fim a Figura 27 mostra o valor de tensão gerada após a multiplicação entre a impedância obtida e a corrente após aplicar fft.

Figura 27 – Resultado da tensão para o CC trifásico na linha 9-8



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Foram apresentadas as simulações os resultados obtidos através de utilização de *software* para uma abordagem de TRT, onde através do *software*

ATPdraw foi possível obter as correntes de CC para tais fins assim como utilizando o HarmZs os dados que obtemos no domínio da frequência e, por fim, determinar a TRT.

Com base nas respostas, observa-se nos gráficos finais que um valor de tensão foi encontrado. Ao final do processo, o pesquisador esperava obter resultados na forma de onda da TRT no disjuntor. Assim, constatou-se que a resposta esperada não alcançou o comportamento desejado.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A análise de TRT vem sendo cada vez mais importante devido ao aumento dos sistemas elétricos de potência, tornando esses estudos necessários para maior confiabilidade dos sistemas, pois os mesmos ajudam nos dimensionamentos de equipamentos de SEP, auxiliando na prevenção falhas futuras.

O presente trabalho utilizou de recursos de softwares para aplicar simulações com a finalidade de determinar a TRT utilizando o domínio da frequência. Foram apresentados resultados para os estudos de alguns casos em que ocorreu a simulação correntes de curto-circuito monofásico e trifásico e por fim aplicando conceitos conhecidos. Observa-se, nos casos estudados, que não se obteve os resultados desejados, ou seja, uma representação da onda da TRT.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Ao realizar pesquisas e revisões bibliográficas deste assunto, alguns conceitos surgem sobre o assunto. Ficam as sugestões para trabalhos futuros sobre o tema:

- Simulação do sistema teste utilizando outros softwares;
- Simular a determinação da TRT no domínio da frequência em casos reais;
- Simular o sistema teste com outras modelagens linhas.



## REFERÊNCIAS

- ALVES, Rimon. **Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)**. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/VRNS9RMMHK/1/monografia\\_rimon\\_alves\\_tensao\\_de\\_restabelecimento\\_transitoria.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/VRNS9RMMHK/1/monografia_rimon_alves_tensao_de_restabelecimento_transitoria.pdf). Belo Horizonte, 2012.
- ALVES, W. F. **Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2007.
- DIFINIRTEC. **Transformada rápida de Fourier (fft)**. Disponível em: <https://definirtec.com/transformada-rapida-de-fourier-fft/>. Acesso em Janeiro, 2022.
- GARZON, Ruben Dário. **High Voltage Circuit Breakers - Design and Applications. Tennessee** - Estados Unidos da América: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- RABITO, Caio; PALOMA, Rodrigo; SILVESTRI, Tatiane. **Especificação de Disjuntores de Alta Tensão com base na Superação por Curto-circuito e Tensão de Restabelecimento Transitória**. Curitiba 2011. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/330/1/CT\\_COELE\\_2011\\_2\\_07.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/330/1/CT_COELE_2011_2_07.pdf)>
- 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.
- TELES, Renata Alves Antunes. **Aplicação da transformada rápida de Fourier em equações integrais no domínio do tempo para a caracterização de propagação radioelétrica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2021.
- W SERVICE. Disjuntores. Disponível em: < <https://www.wservice.com.br/serv/>>. Acesso em: Dezembro, 2022.

## ANEXO: TABELAS ESPECIFICAÇÕES PARÂMETROS

Tabela 1 – Dados das Cargas

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

Fonte: Alves, 2007.

Tabela 2 – Dados das Linhas

Linha	R+ (%)	X+ (%)	B (MVar)	R0 (%)	X0 (%)
3-5	1,7	9,2	15,8	5,1	27,6
3-8	1,0	8,5	17,6	3,2	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 3 – Dados dos Geradores

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

Fonte: Alves, 2007.

Tabela 4 – Dados dos transformadores

Transformador	Ligação (kV)	S (MVA)	X+ (%)	X0 (%)
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.