

**Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis  
Departamento de Engenharia Elétrica**

**Géssica Maria Ribeiro Prudêncio**

**Análise de Coordenação de Relés Digitais de Sobrecorrente  
Utilizando Simulação Computacional**

**Paraíba - PB  
Novembro - 2016**

**GÉSSICA MARIA RIBEIRO PRUDÊNCIO**

**ANÁLISE DE COORDENAÇÃO DE RELÉS DIGITAIS DE  
SOBRECORRENTE UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado a Coordenação de Engenharia  
Elétrica como um dos pré-requisitos para a  
obtenção do título em Bacharel em  
Engenharia Elétrica sob orientação do Prof.  
Dr. Rogério Gaspar de Almeida.**

**Paraíba - PB  
Novembro - 2016**

PRUDÊNCIO, Gêssica Maria Ribeiro

Análise de Coordenação de Relés Digitais de Sobrecorrente  
Digitais Utilizando Simulação Computacional

99 f. il.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida

Trabalho de Conclusão de Curso, 2016

1. Proteção de Sistemas Elétricos 2. Relé de Sobrecorrente  
Digital. 2. Coordenação entre Relés

**Gêssica Maria Ribeiro Prudêncio**

**Análise de Coordenação de Relés Digitais de Sobrecorrente Utilizando  
Simulação Computacional**

**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido a Coordenação de  
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para à  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Data de Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_**

**Nota: \_\_\_\_\_**

**Aprovado por:**

---

**Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Orientador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Alexandre Castro (Membro)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Yuri Molina Rodrigues (Membro)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

**Paraíba – PB**  
**Novembro - 2016**

## AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre estar ao meu lado em todas as batalhas e, principalmente, por colocar anjos em minha vida que possibilitaram a realização desse sonho.

Ao meu estimado professor orientador Dr. Rogério Gaspar por todo apoio, incentivo, dedicação, paciência, a quem jamais terei como descrever o tamanho da minha gratidão e admiração, não só pelo excelente professor, mas também pela pessoa extraordinária que é.

Aos professores avaliadores Dr. Alexandre Cezar e Dr. Yuri Molina por terem aceito o convite para fazer parte da banca avaliadora, e por todos os ensinamentos passados nas disciplinas as quais eu tive a honra de ser aluna. Quero aqui estender meu agradecimento a todos os professores dos departamentos de engenharia elétrica, mecânica, matemática e física que contribuíram para minha formação.

A minha mãe Marise Lúcia, a mulher responsável por essa conquista, sem a senhora eu jamais teria conseguido. A minha avó Maria e meu avô Antônio que são os maiores incentivadores e meus exemplos. Ao meu pai Pedro Prudêncio, pelo incentivo, força e carinho.

Ao meu namorado Weyber Lucena que sempre esteve ao meu lado me dando carinho, incentivo, sem dúvida ele é um dos grandes responsáveis por eu ter conseguido esta vitória, agradeço a minha sogra Ligia, por toda assistência e carinho prestados a mim, assim como meus cunhados que foram de fundamental importância em todos os momentos.

Aos meus sobrinhos por me proporcionar tanta felicidade e amor, a minhas irmãs, tios, primas, em especial Bianca e Marcelly por toda amizade e compreensão nos momentos difíceis.

Aos engenheiros João Eugenio e Joao Serafim, orientadores do meu estágio por todo o apoio concedido, bem como toda a equipe CONCENGE.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para esta realização, muito obrigada!

## RESUMO

Devido a necessidade do desenvolvimento de modelos dinâmicos para o estudo de proteção de sistemas elétricos este trabalho aborda a avaliação do desempenho e a validação da coordenação de relés digitais de sobrecorrente em um ambiente computacional, realizando a caracterização de um relé de sobrecorrente digital através do seu comportamento operacional, bem como a avaliação do mesmo para diferentes prerrogativas de simulação da rede elétrica para um modelo implementado em *MATLAB/SIMULINK*<sup>®</sup>. Para tanto, foi utilizado como método para coleta de dados a pesquisa bibliográfica, através do estudo levantado no referencial teórico sobre a Modelagem e Análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica, percebendo assim a importância de se ter modelos com a maior precisão possível com destaque para o relé de sobrecorrente temporizado que requer uma coordenação para que o seu comportamento não interfira na operação confiável e seletiva do sistema elétrico. Finalmente, por meio de todo o estudo realizado foi possível confirmar que o modelo implementado apresenta o comportamento esperado e que as técnicas de coordenação são válidas.

**Palavras-Chaves:** Proteção de Sistemas Elétricos. Relés de Sobrecorrente Digital. Coordenação.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vetores assimétricos.....	21
Figura 2.2 – Representação através dos vetores simétricos equilibrados.....	22
Figura 2.3 – Representação de um gerador trifásico aterrado .....	23
Figura 2.4 – Rede de sequência positiva .....	24
Figura 2.5 – Rede de sequência negativa .....	24
Figura 2.6 – Representação da rede de sequência zero .....	25
Figura 2.7 – Curto-circuito trifásico.....	26
Figura 2.8 – Rede de sequência para uma falta trifásica .....	27
Figura 2.9 – Curto-circuito fase-terra.....	28
Figura 2.10 – Diagrama de sequência para curto-circuito monofásico .....	29
Figura 2.11 – Curto-circuito fase-fase.....	30
Figura 2.12 – Rede de sequência para curto bifásico sem contato com terra.....	31
Figura 2.13 – Curto-circuito fase-fase-terra .....	32
Figura 2.14 – Diagrama de sequência para curto fase-fase-terra .....	33
Figura 2.15 – Esquema de proteção do conjunto relé e disjuntor no sistema elétrico.....	34
Figura 2.16 – Esquema de ligação entre relés a montante e a jusante com falta a 85% da linha BC.....	41
Figura 2.17 – Taxa de deslocamento do disco com corrente de magnitude variável .....	43
Figura 2.18 – Curva inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51 .....	44
Figura 2.19 – Curva moderadamente inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51 .....	45
Figura 2.20 – Curva Muito Inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51 .....	45
Figura 2.21 – Curva Extremamente Inversa Norma IEC para Relé de sobrecorrente 51.....	46
Figura 2.22 – Proteção e coordenação de relés de sobrecorrente .....	47
Figura 2.23 – O modelo funcional de um relé de sobrecorrente de tempo definido .....	48
Figura 2.24 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente .....	49
Figura 3.1 – Relé 50/51 .....	50
Figura 3.2 – Máscara para o relé trifásico .....	51
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente unidade instantanea .....	51
Figura 3.4 – Definição dos parâmetros do bloco Fourier .....	52

Figura 3.5 – Definição da função para o cálculo do Multiplo.....	53
Figura 3.6 – Definição dos parâmetros do bloco Saturação .....	53
Figura 3.7 – Definição do bloco Função 2 .....	54
Figura 3.8 – Definição dos parâmetros do bloco Relay .....	55
Figura 3.9 – Lógica inserida ao modelo original do relé.....	55
Figura 3.10 – Unidade instantânea .....	56
Figura 3.11 – Parâmetros do bloco On/Off Delay.....	57
Figura 3.12 – Configuração para o relé trifásico .....	58
Figura 3.13 – Parâmetros do bloco RTC .....	58
Figura 3.14 – Parâmetros do filtro.....	59
Figura 3.15 – Lógica contida no bloco Comando do trip.....	60
Figura 3.16 – Parâmetros do bloco Switch.....	60
Figura 3.17 – Mascara do Relé de Sobrecorrente Trifásico .....	61
Figura 4.1 – Topologia da rede teste .....	64
Figura 4.2 – Trecho protegido do sistema .....	65
Figura 4.3 – Análise do gráfico para determinar o Dial .....	69
Figura 4.4 – Trip do relé 50/51 da barra 9.....	71
Figura 4.5 – Correntes na linha de transmissão 9-12 .....	71
Figura 4.6 – Trip do relé 50/51 da barra 12.....	72
Figura 4.7 – Correntes na linha de transmissão 12-13 .....	72
Figura 4.8 – Trip do relé 50/51 da barra 9.....	74
Figura 4.9 – Corrente da linha de transmissão 9-12.....	74
Figura 4.10 – Corrente da linha de transmissão 12-13.....	75
Figura 4.11 – Trip do relé da barra 12.....	76
Figura 4.12 – Trip relé da barra 9.....	77
Figura 4.13 – Corrente na linha de transmissão 12-13.....	78
Figura 4.14 – Corrente na linha de transmissão 9-12.....	78
Figura 4.15 – Trip do relé da barra 9.....	79
Figura 4.16 – Corrente da linha 12-13.....	80
Figura 4.17 – Corrente da linha de transmissão 9-12.....	80
Figura 4.18 – Trip do relé 50/51 da barra 12.....	82
Figura 4.19 – Trip do relé 50/51 da barra 9.....	83
Figura 4.20 – Correntes na linha de transmissão 12-13 .....	83
Figura 4.21 – Correntes na linha de transmissão 9-12 .....	84



Figura 4.22 – Trip do relé 50/51 da barra 9.....	85
Figura 4.23 – Corrente da linha de transmissão 9-12.....	86
Figura 4.24 – Corrente da linha de transmissão 12-13.....	86
Figura 4.25 – Trip da barra 12.....	88
Figura 4.26 – Trip do relé 50/51 da barra 9.....	89
Figura 4.27 – Corrente na linha de transmissão 12-13.....	89
Figura 4.28 – Corrente na linha de transmissão 9-12.....	90
Figura 4.29 – Trip do relé 50/51 da barra 9.....	91
Figura 4.30 – Corrente da linha de transmissão 9-12.....	92
Figura 4.31 – Corrente da linha de transmissão 12-13.....	92
Figura 7.1 – Diagrama unifilar da rede teste.....	96
Figura 7.2 – Parâmetros da linha de transmissão localizada entre a barra 12 e o curto.....	97
Figura 7.3 – Parâmetros da linha de transmissão localizada entre o curto e a barra 13.....	97
Figura 7.4 – Modelagem do curto-circuito.....	98
Figura 7.5 – Parâmetros de ajuste das linhas de transmissão.....	98
Figura 7.6 – Modelagem do curto-circuito.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficiente da equação tempo x corrente normalizada .....	42
Tabela 4.1 – Correntes de curto-circuito .....	63
Tabela 4.2 – Dados utilizados para o dimensionamento do TC .....	66

## LISTA DE SIGLAS

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

ANSI: American National Standards Institute

FEM: Força Eletromotriz

TC: Transformador de Corrente

RTC: Relação de Transformação de Corrente

TP: Transformador de Potencial

LT: Linha de Transmissão

FS: Fator de Sobrecorrente

**LISTA DE NOMECLATURA ANSI**

- 21 - relé de distância
- 50 - relé de sobrecorrente instantâneo
- 51 - relé de sobrecorrente temporizado
- 67 - relé de sobrecorrente direcional
- 87 - relé diferencial
- 52 - disjuntor de corrente alternada

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. Considerações preliminares .....	15
1.2. Motivação .....	16
1.3. Metodologia Adotada .....	16
1.4. Objetivos.....	17
1.4.1. Objetivo Geral .....	17
1.4.2. Objetivos específicos.....	17
1.5. Organização do documento .....	18
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
2.1. Principais Falhas nas Redes Elétricas.....	19
2.1.1. Tipos de curto-circuito.....	20
2.2. Princípios da Proteção .....	33
2.2.1. Transformador de corrente e Transformador de potencial .....	34
2.2.2. Relés de proteção.....	35
2.2.3. Disjuntor de Proteção .....	37
2.2.4. Seletividade e Coordenação.....	38
2.3. O Relé Digital.....	39
2.3.1. Características Operacionais do Relé Digital de Sobrecorrente .....	40
2.3.1.1. Unidades Instantânea e Temporizada do Relé de Sobrecorrente .....	40
2.3.1.2. Curvas das Unidades Temporizadas do Relé de Sobrecorrente Digital .....	43
2.3.2. Regras de Coordenação de Relés de Sobrecorrente .....	46
2.3.3. Modelos Desenvolvidos para Simulação Computacional .....	47
<b>3. MODELIZAÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>50</b>
3.1. Modelo do Relé Digital de Sobrecorrente com unidade instantânea e temporizada – 50/51 .....	50
3.1.1. Unidade temporizada (51) .....	51
3.1.2. Unidade Instantânea (50).....	56

3.2. Modelo do relé 50/51 para sistemas trifásicos .....	57
<b>4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS DO MODELO DO RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE 50/51.....</b>	<b>62</b>
4.1. Caracterização da Rede Teste.....	62
4.1.1. Cálculo das correntes de curto-circuito da Rede Teste.....	62
4.1.2. Definição dos TCs e ajustes dos Relés 50/51 para o Trecho Protegido .....	63
4.1.2.1. Relação de Transformação dos TC's.....	66
4.1.2.2. Ajustes dos relés 50/51 .....	66
4.2. Procedimento de Coordenação dos Relé de sobrecorrente 51.....	67
4.3. Avaliação do desempenho do Relé Digital 50/51 para Curtos-circuitos.....	69
4.3.1. Curto-Circuito Trifásico Franco a 85% da Linha.....	70
4.3.2. Curto-Circuito Trifásico Franco a 50% da Linha.....	75
4.3.3. Curto-Circuito Monofásico Franco a 85% da Linha .....	81
4.3.4. Curto-Circuito Monofásico Franco a 50% da Linha .....	87
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>93</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
<b>7. APÊNDICE .....</b>	<b>96</b>
7.1. Dados da rede .....	96
7.2. Dados para a simulação .....	96

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações preliminares

A proteção dos Sistemas Elétricos de Potência é feita basicamente por esquemas que possuem o relé como o principal elemento. Este equipamento detecta falhas existentes, dispara alarmes de sinalização para o operador, e dependendo do caso, promove a abertura de disjuntores mais próximos ao defeito, de modo a isolá-lo. Com essas características se pode verificar o quão importante é este equipamento para a proteção e para o sistema como um todo.

Atualmente, os avanços tecnológicos, sobretudo, no âmbito dos circuitos digitais e da microeletrônica, têm promovido o crescente projeto, e, por conseguinte, a utilização de relés digitais na proteção dos sistemas elétricos, pelo qual, se destaca o relé digital de sobrecorrente.

Os relés digitais de sobrecorrente, usualmente conhecidos como relés 50/51, estão ganhando espaço em todo o cenário elétrico por sua capacidade de detectar correntes acima do permitido de forma eficaz e simples, e por se tratarem de equipamentos dotados de microprocessadores e microcontroladores, apresentam sofisticados recursos de comunicação e controle. Com efeito, para que esses equipamentos possam ser analisados, sem a necessidade de estar em atividade real no sistema, uma ferramenta de análise computacional é uma imprescindível alternativa, pois, tomando como base as características reais do relé, é presumível se obter um modelo computacional com semelhante desempenho do equipamento real.

Segundo Kindermann (2012), os relés devem operar o mais rápido possível, dentro da sua seletividade de proteção. Deve existir assim uma estratégia de proteção de modo que o relé mais próximo ao defeito atue prioritariamente visando minimizar o impacto na rede em um determinado cenário de falta. Por outro lado, esta estratégia de proteção deve ser coordenada, ou seja, para qualquer corrente de curto-circuito, há uma escada de tempo no sentido do relé de vanguarda para os relés de retaguarda, de modo a garantir e permitir a seletividade no desligamento do sistema.

Em geral, a ênfase dada no estudo de proteção de sistema elétrico envolvendo a filosofia de proteção anteriormente mencionada, basicamente, aborda o dimensionamento dos

equipamentos de proteção (como transformador de corrente e transformador de potencial) e os ajustes dos tempos de atuação dos relés.

A cerca de 10 ou 20 anos raros estudos nessa área do conhecimento envolvendo simulação computacional eram tratados, entretanto, com o lançamento do SimPowerSystems (inicialmente denominado Power System Blockset) para uso com a plataforma *MATLAB/SIMULINK*<sup>®</sup> tem aumentado consideravelmente à popularidade desta plataforma no ambiente acadêmico. Tais mudanças têm propiciado novas perspectivas para o ensino da teoria de sistemas de proteção de redes de energia elétrica, assim como para a realização de pesquisas neste tema (SALLES,2007).

## **1.2. Motivação**

Com base no contexto acima citado, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso se fundamenta na necessidade de realização de estudos envolvendo o desempenho e coordenação de relés digitais de sobrecorrente a partir de simulação computacional de forma a contribuir para o melhor entendimento destes dispositivos, no âmbito da área do conhecimento de proteção de sistemas elétrico.

## **1.3. Metodologia Adotada**

Esse estudo tem por finalidade realizar uma pesquisa aplicada, uma vez que utilizará conhecimento da pesquisa básica para resolver problemas.

Para um melhor tratamento dos objetivos e melhor apreciação desta pesquisa, observou-se que ela é classificada como pesquisa exploratória e descritiva.

A pesquisa bibliográfica foi realizada fazendo o uso de materiais já publicados como livros, artigos científicos, além disso o Estudo de caso foi o procedimento realizado uma vez que envolve o estudo profundo e exaustivo da modelização do relé de sobrecorrente de maneira a apresentar de forma ampla e detalhada a fim de obter melhor apreciação do conteúdo apresentado no trabalho.

O uso da plataforma *MATLAB/SIMULINK*<sup>®</sup> foi utilizado para a modelização da rede elétrica, bem como o modelo do relé de sobrecorrente digital 50/51



Para o desenvolvimento do modelo do relé digital de sobrecorrente para simulação computacional, terá como base o modelo apresentado por (Salles, 2009). Por conseguinte, a estrutura da rede elétrica terá como base exemplares apresentados em (SAADAT, 1999) e a filosofia de coordenação dos relés adotará as regras apresentadas por (Kindermann, 2012).

## **1.4. Objetivos**

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso estão divididos em objetivo geral e específicos conforme se descreve a seguir.

### **1.4.1. Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho e coordenação de relés digitais de sobrecorrente em um ambiente computacional.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar o relé digital de sobrecorrente de modo a se determinar seu modelo matemático para simulação computacional;
- Implementar o modelo do relé digital de sobrecorrente em ambiente computacional *MATLAB/SIMULINK*<sup>®</sup>;
- Implementar a rede elétrica que possibilite a análise do modelo do relé obtido;
- Avaliar o desempenho do modelo implementado em *MATLAB/SIMULINK*<sup>®</sup> em diferentes cenários de simulação computacional de uma rede elétrica;
- Definir estratégias de coordenação para os relés de sobrecorrente para os diferentes cenários de simulação da rede elétrica.

## **1.5. Organização do documento**

O documento é organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 apresenta a introdução com os principais objetivos e a motivação para a realização desse trabalho.

Capítulo 2 aborda de forma sucinta todo o conteúdo bibliográfico referente a filosofia de proteção, dando ênfase ao cálculo das correntes curto-circuito, assim como a metodologia para realizar a coordenação dos relés de sobrecorrente inseridos em um sistema.

O capítulo 3 apresenta o procedimento realizado para obtenção dos modelos simulados, inclusive com as características operacionais de cada bloco.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, de forma a validar todo o estudo realizado.

O capítulo 5 apresenta a conclusão, definindo quais os objetivos foram alcançados.

O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

O capítulo 7 apresenta Apêndices.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo será abordado todo o embasamento teórico referente a filosofia de proteção aplicada aos sistemas elétricos de potência. Além disso, apresenta as estratégias de coordenação que serviram como base para a construção desse trabalho.

### **2.1. Principais Falhas nas Redes Elétricas**

Por possuir alto grau de complexidade e extensão acentuada, o sistema elétrico está susceptível a perturbações ou falhas que modificam os seus parâmetros elétricos ou até, em casos mais graves, interrompem o fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Estas perturbações podem ser ocasionadas pelos mais diversos motivos como fenômenos da natureza, erro humano, falhas na proteção, entre outros.

Na opinião de Sato (2015), o curto-circuito é umas das ocorrências de maior impacto para a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Segundo o autor, este tipo de ocorrência impõe mudanças bruscas e violentas na operação normal do sistema, devido ao fato de ocorrer um fluxo elevado de potência, com uma liberação localizada de uma considerável quantidade de energia. Ainda segundo o autor, não é exagero afirmar que o curto-circuito pode provocar danos graves nas instalações elétricas, particularmente, nos enrolamentos dos transformadores e geradores. Este tipo de perturbação no sistema elétrico será abordado com maior detalhe no tópico 2.2 deste capítulo, sendo importante salientar que, por se tratar da falha mais danosa, o curto-circuito requer um estudo apurado das suas possíveis dimensões e efeitos.

Do ponto de vista de Mamede (2013), além do curto-circuito, outro fator de anormalidade no sistema elétrico é a sobrecarga. Esta, por sua vez, se caracteriza como a elevação moderada da corrente, acima dos valores admitidos no projeto e, geralmente, ocorre devido a procedimentos incorretos na operação, seja pela permissão de acréscimo de uma nova carga ao circuito ou pelo aumento de carga no eixo dos motores.

Com relação ao tempo de duração, as perturbações no sistema elétrico podem ocorrer de forma instantânea, onde os procedimentos e estratégias da operação da proteção seriam suficientes para normalizar o sistema, ou podem ocorrer de forma permanente, sendo necessário, nestes casos, a intervenção humana realizando a manutenção da parte danificada.

Estas anomalias são intrínsecas ao funcionamento do sistema elétrico, com isso, se torna imprescindível um sistema de proteção eficiente que venha a impedir que se propaguem por um longo período de tempo. Para que o sistema de proteção seja dimensionado é necessário um estudo detalhado das correntes de curto-circuito.

### **2.1.1. Tipos de curto-circuito**

Os curtos circuitos (também conhecidos como faltas) podem ser entendidos como a alteração do percurso original da corrente elétrica em decorrência da diminuição abrupta da impedância vista no ponto da falta, e podem causar danos aos equipamentos, transtornos à população e prejuízos às concessionárias de energia elétrica. Sua dimensão é variável, mas existem técnicas e métodos para se ter uma base da magnitude que a corrente de curto pode alcançar.

Na visão de Sato (2015), a magnitude da corrente de curto-circuito depende de vários fatores, tais como: o tipo de curto-circuito, a capacidade que o sistema de geração possui, a topologia da rede elétrica, qual o tipo de aterramento do neutro dos equipamentos, entre outros.

Segundo Kindermann (1992), a análise de curto-circuito é imprescindível tanto para o planejamento quanto para a operação de um sistema elétrico, pois visam:

- Conhecer a dimensão do seu valor.
- Dimensionar a linha de transmissão em relação a seu limite suportável de elevação da temperatura devido ao curto-circuito.
- Dimensionar o disjuntor quanto à secção dos seus contatos e capacidade disruptiva da sua câmara de extinção do arco-elétrico.
- Dimensionar o transformador de corrente (TC) quanto ao nível de saturação da sua curva de magnetização definido pela sua classe de exatidão.
- Efetuar a coordenação de relés.

Para que seja possível o cálculo das correntes de curto-circuito usa-se o método de componentes simétricas e redes de sequência positiva, negativa e zero. A dedução deste método é descrita a seguir:

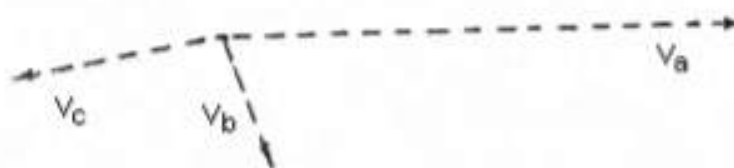
- **Componentes simétricas**

Componentes simétricas pode ser entendida como a técnica que decompõe um sistema de ‘n’ fatores desequilibrados, em um sistema de ‘n’ fatores equilibrados. Esta técnica foi desenvolvida pelo engenheiro eletricitista Charles Le-Geyt Fortescue (1876-1936).

Para sistema elétrico trifásico ( $n=3$ ), o Teorema de Fortescue pode ser anunciado da seguinte forma: “*cada um dos três fasores, de um sistema trifásico desequilibrado, pode ser decomposto da soma vetorial de outros três vetores pertencentes a três sistemas equilibrados trifásicos. Os três sistemas equilibrados são assim denominados: sistemas de sequência positiva, de sequência zero e de sequência negativa*” (FISCHER, 2002).

Por exemplo, dado um sistema trifásico em que  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são tensões das fases a, b e c, respectivamente, defasados como mostra a Figura 2.1.

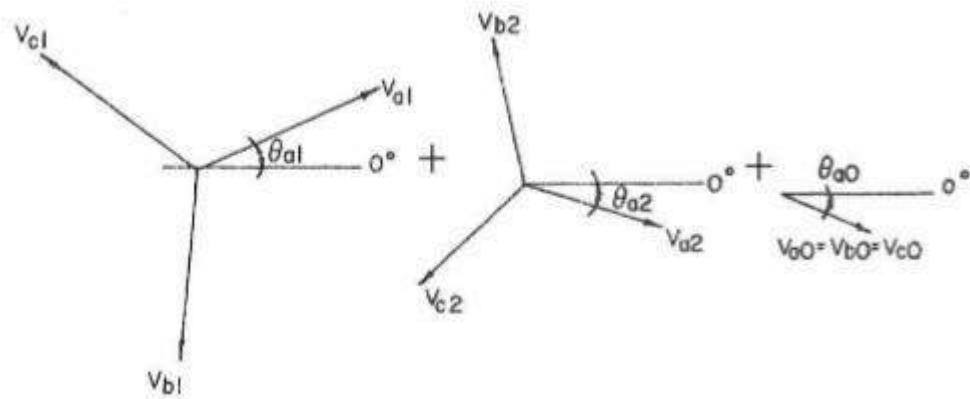
Figura 2.1 – Vetores assimétricos



Fonte: (ANDERSON, 1995)

Estes mesmos vetores podem ser representados como mostra a Figura 2.2, em que os vetores de sequência positiva (subscrito ‘1’) possuem a mesma sequência de fase dos fasores originais, e são defasados entre si por  $120^\circ$ ; os vetores de sequência negativa (subscrito ‘2’) possuem sequência de fase opostas aos fasores originais e estão defasados entre si por  $120^\circ$ ; e os vetores de sequência zero (subscrito ‘0’) que são fasores que possuem a mesma amplitude e mesma defasagem.

Figura 2.2 – Representação através dos vetores simétricos equilibrados



Fonte: (ANDERSON, 1995)

Desta forma, os vetores  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  podem ser descritos como mostra as equações de 2.1 a 2.3:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.3)$$

Para simplificar os cálculos, adota-se o operador 'a', cujo valor é  $e^{\frac{j2\pi}{3}}$ . Portanto, os vetores  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  escritos em função de  $V_{a1}$ ,  $V_{a2}$  e  $V_{a0}$  podem ser escritos da forma matricial como apresentado na equação 2.4:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Por outro lado, se o interesse for nas tensões de sequência positiva, negativa e zero, aplica-se a propriedade da matriz inversa na equação 2.4 e encontra-se a equação 2.5:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

As definições de componentes simétricas para correntes elétricas são feitas da mesma maneira, obtêm-se então as equações descritas em (2.6):

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

As equações para as componentes das correntes de sequência positiva, negativa e zero serão obtidas utilizando a propriedade da matriz inversa, encontra-se a equação (2.7):

$$\begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Estas equações serão a base para o desenvolvimento das equações que determinam as correntes de curto-circuito. Entretanto, a análise necessita também das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero dos demais elementos que constituem a rede elétrica (linhas, transformadores, geradores, etc) dando origem a circuitos representativos do sistema elétrico em componentes simétricas de acordo com o tipo de curto-circuito.

### • Redes de sequência

Como descrito por (KINDERMANN, 1992), o gerador é o elemento mais importante do sistema elétrico. O autor afirma que, dentro das suas limitações, este é o elemento que fornece a energia exigida pela carga, mantendo os níveis de tensão dentro de uma faixa estreita de modo a não comprometer os elementos a jusante e a montante, garantindo, assim, a continuidade e estabilidade do sistema. Além disso, na ocorrência de um curto, o gerador síncrono é o elemento ativo do suprimento da corrente associada ao curto.

Com base no exposto pode-se concluir que as deduções encontradas para os terminais do gerador síncrono, por ser o único elemento ativo do sistema elétrico no momento do curto-circuito, serão as mesmas para o local onde ocorrer o defeito no sistema. Vale salientar que o motor possui o mesmo comportamento que o gerador no momento do curto, ou seja, ele irá suprir a corrente de falta, entretanto, todas as deduções são iguais por se tratar da mesma máquina.

A Figura 2.3 apresenta o gerador síncrono aterrado, sendo  $Z_n$  a impedância de aterramento.

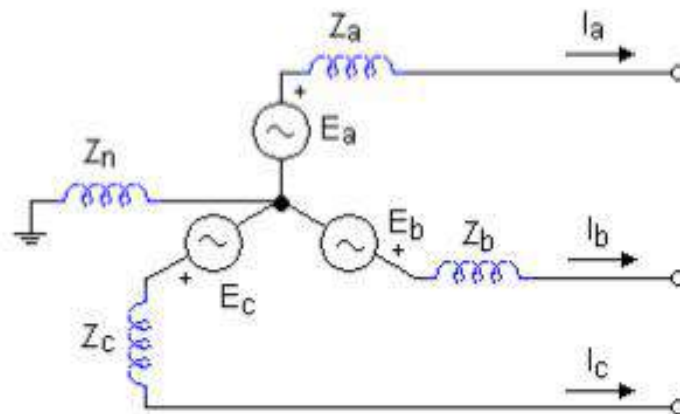
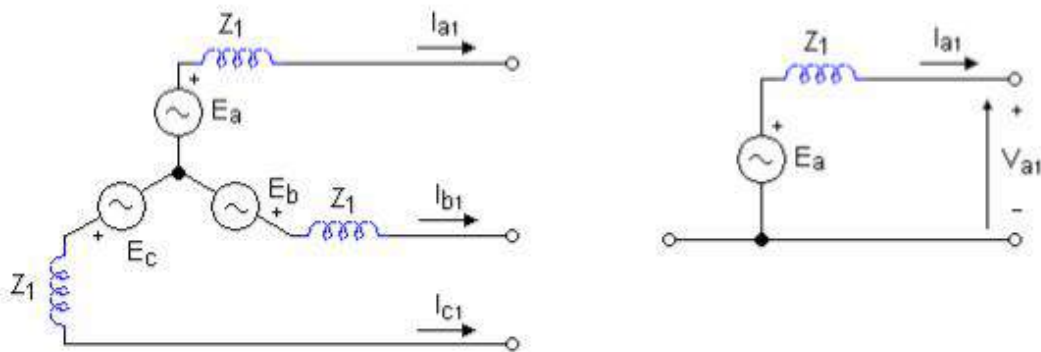


Figura 2.3 – Representação de um gerador trifásico aterrado

Conforme se verifica da Figura 2.3, os enrolamentos de armadura são representados pelas bobinas que estão em série com as fontes de tensão, estas por sua vez representam a Força Eletromotriz (FEM) produzida pelo gerador. A rede de sequência positiva está apresentada na Figura 2.4, sendo  $Z_1$  a impedância de sequência positiva.

Figura 2.4 – Rede de sequência positiva



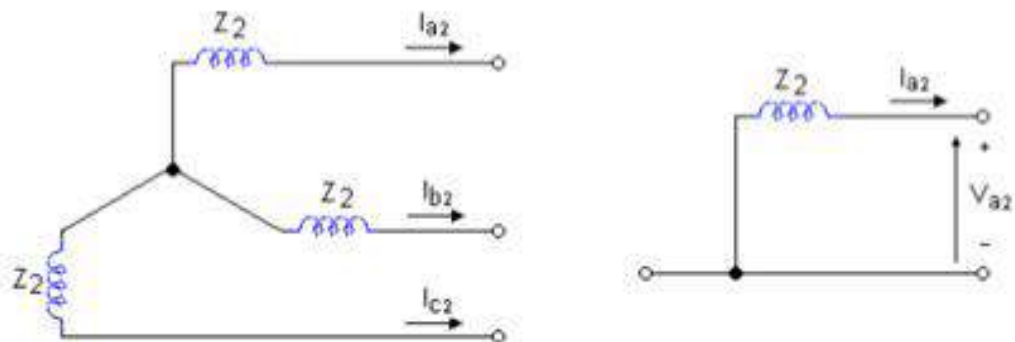
Fonte: (CARLOS, 2007)

Analisando o circuito monofásico, a tensão de sequência positiva será dada pela equação (2.8):

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} * Z_1 \quad (2.8)$$

Na Figura 2.5 é mostrada a rede de sequência negativa, sendo  $Z_2$  a impedância de sequência negativa:

Figura 2.5 – Rede de sequência negativa



Fonte: (CARLOS, 2007)

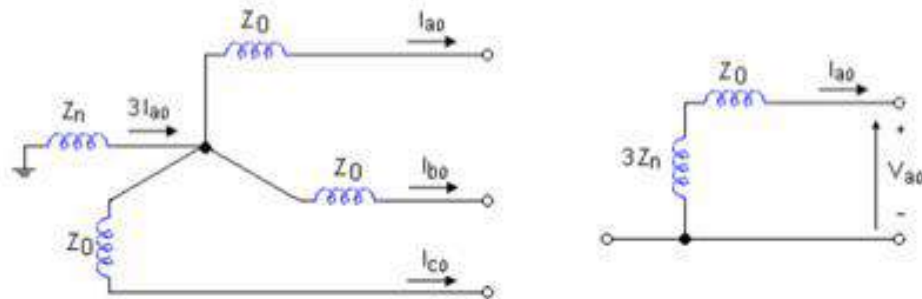
Analisando o circuito monofásico da Figura 2.5, a tensão de sequência negativa será dada pela equação (2.9):

$$V_{a2} = -I_{a2} * Z_2 \quad (2.9)$$



Na Figura 2.6 é mostrada os circuitos trifásico e monofásico da rede de sequência zero, sendo  $Z_0$  a impedância de sequência zero.

Figura 2.6 – Representação da rede de sequência zero



Fonte: (CARLOS, 2007)

A partir do circuito monofásico, pode-se escrever a equação (2.10) para determinar a tensão de sequência zero:

$$V_{a_0} = -I_{a_1} * (Z_0 + 3Z_n) \quad (2.10)$$

Pode-se então obter a matriz apresentada na equação (2.11), em que  $V_f$  é a tensão antes da falta:

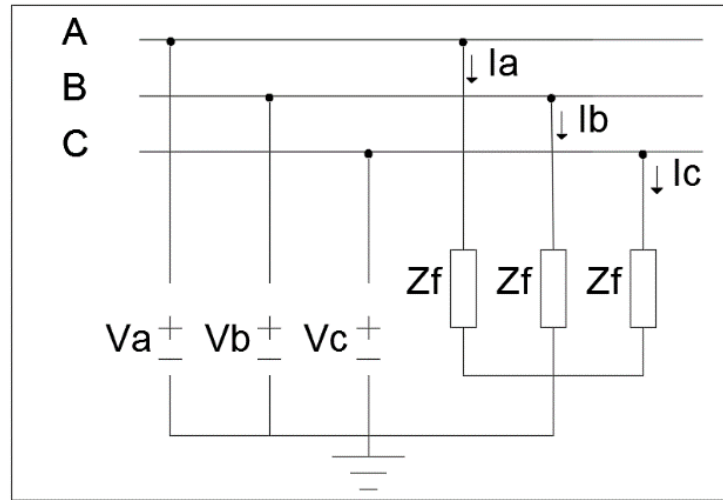
$$\begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (3Z_n + Z_0) & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Como dito anteriormente, este equacionamento será de fundamental importância para os cálculos das correntes de curto que serão apresentados a seguir:

a) Curto-circuito trifásico:

O curto-circuito trifásico é apresentado na Figura 2.7. Ele possui a característica de ser equilibrado, ou seja, apresenta simetria entre as fases antes e após a falta. É o tipo de curto-circuito que menos apresenta ocorrências, segundo (SATO, 2015), apenas 5% dos curtos registrados são de cunho trifásico, entretanto, pelo seu alto grau de severidade é o mais analisado.

Figura 2.7 – Curto-circuito trifásico.



Fonte: Autora

Observando o circuito trifásico, pode-se escrever as equações (2.12) a (2.14) para determinar as tensões de cada fase:

$$Va = Z_f \times Ia \quad (2.12)$$

$$Vb = Z_f \times Ib \quad (2.13)$$

$$Vc = Z_f \times Ic \quad (2.14)$$

Substituindo as igualdades pelas equações (2.4) e (2.6), tem-se:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Realizando as manipulações matemáticas:

$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_f & Z_f & Z_f \\ Z_f & a^2 Z_f & a Z_f \\ Z_f & a Z_f & a^2 Z_f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 3Z_f & (1 + a^2 + a)Z_f & (1 + a^2 + a)Z_f \\ (1 + a^2 + a)Z_f & 1 + 2a^3 Z_f & (1 + a^2 + a^4)Z_f \\ (1 + a^2 + a)Z_f & (1 + a^2 + a^4)Z_f & 1 + 2a^3 Z_f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Leva-se em conta o fato de que:  $(1 + a^2 + a) = 0$ ,  $a^3 = 1$ ,  $a^4 = a$ . Logo:

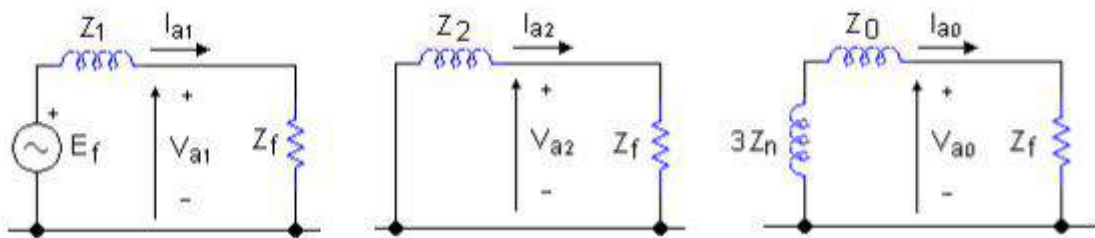
$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 3Z_f & 0 & 0 \\ 0 & 3Z_f & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Pode-se concluir que os circuitos são independentes, e representados pela Figura 2.8

Figura 2.8 – Rede de seqüência para uma falta trifásica



Fonte: (CARLOS, 2007)

Como os circuitos de seqüência negativa e zero não possuem alimentação, pode-se concluir que a equação (2.18) é verdadeira, e que a corrente de seqüência positiva será dada pela equação (2.19).

$$Ia_0 = Ia_2 = 0 \quad (2.18)$$

$$Ia_1 = \frac{E_f}{Z_f} \quad (2.19)$$

Portanto, substituindo pela equação 2.6 tem-se:

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ Ia_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Conclui-se que as correntes de curto são dadas pelas equações 2.21 a 2.23:

$$I_a = \frac{E_f}{Z_f} \quad (2.21)$$

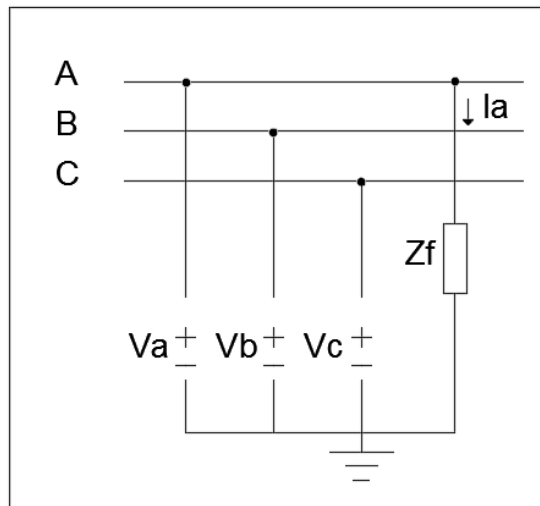
$$I_b = a^2 \frac{E_f}{Z_f} \quad (2.22)$$

$$I_c = a \frac{E_f}{Z_f} \quad (2.23)$$

b) Curto Fase-Terra (Monofásico):

Este é o tipo de curto que mais ocorre, 70% dos casos segundo (SATO, 2015). A Figura 2.9 mostra a configuração deste tipo de curto:

Figura 2.9 – Curto-circuito fase-terra.



Fonte: Autora

Para este caso, a característica do defeito impõe que  $I_b$  e  $I_c$  são nulas, portanto a equação (2.24) é verdadeira:

$$\begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Além disso, a tensão na fase A é dado por:

$$V_a = I_a \times Z_f \quad (2.25)$$

Como  $I_{a_0}$ ,  $I_{a_1}$  e  $I_{a_2}$  são as componentes de seqüência das correntes de falta, tem-se:

$$\begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times Ia \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

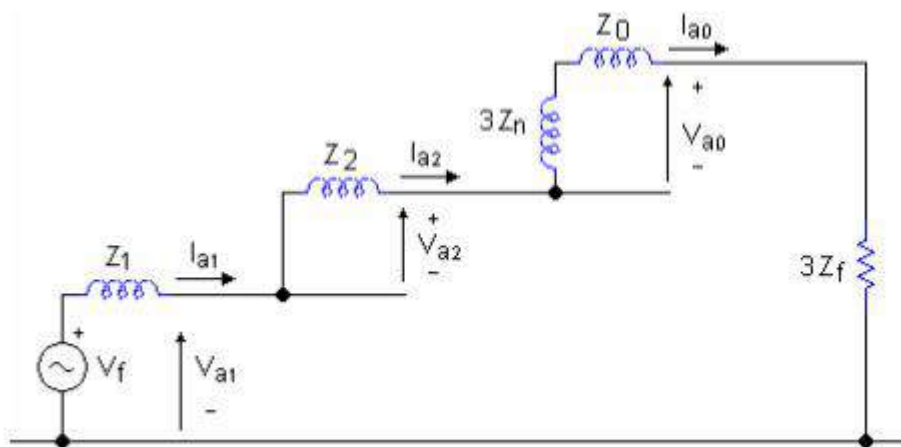
Ou seja, as correntes de seqüência positiva, negativa e zero são iguais.

Para a tensão:

$$Va_0 + Va_1 + Va_2 = 3Ia_1 \times Z_f \quad (2.27)$$

Portanto, observa-se que estas equações indicam um circuito em série como mostra a figura 2.10:

Figura 2.10 – Diagrama de seqüência para curto-circuito monofásico



Fonte: (CARLOS, 2007)

As correntes de seqüência positiva, negativa e zero serão:

$$Ia_0 = Ia_1 = Ia_2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f + 3Z_n} \quad (28)$$

A corrente de falta é:

$$Ia = \frac{3V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f + 3Z_n} \quad (29)$$

c) Fase-Fase (Bifásico sem o terra):

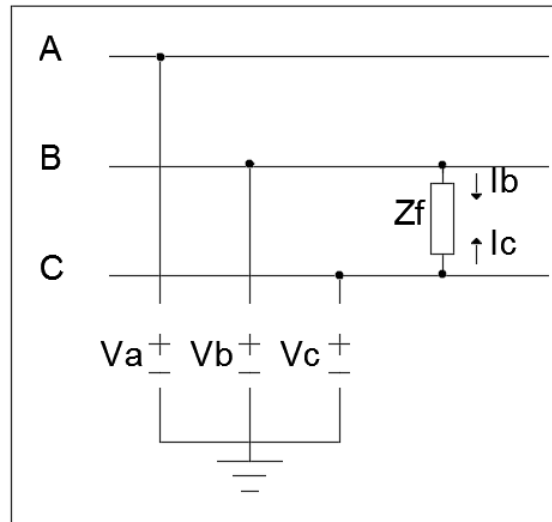
A Figura 2.11 apresenta a configuração estabelecida por esse tipo de falta. O circuito impõe as seguintes condições:

$$I_a = 0 \quad (2.30)$$

$$V_b = V_c \quad (2.31)$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (2.32)$$

Figura 2.11 – Curto-circuito fase-fase.



Fonte: Autora

Substituindo na Equação 2.7, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I a_0 \\ I a_1 \\ I a_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ I b \\ -I b \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Devido ao fato de não haver contato com o terra conclui-se que  $I a_0 = 0$ , e realizando as multiplicações obtêm-se:

$$I a_1 = \frac{I b}{3} (a - a^2) \quad (2.34)$$

$$I a_2 = \frac{I b}{3} (a^2 - a) \quad (2.35)$$

$$I a_2 = -\frac{I b}{3} (a - a^2) \quad (2.36)$$

Portanto:

$$Ia_1 = -Ia_2 \quad (2.37)$$

Para as tensões:

$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Va \\ Vb \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$Va_1 = \frac{1}{3} (Va + aVb + a^2Vb) \quad (2.39)$$

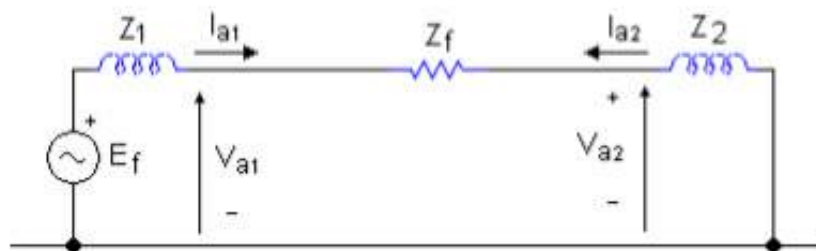
$$Va_2 = \frac{1}{3} (Va + a^2Vb + aVb) \quad (2.40)$$

As expressões (2.41) e (2.42) são iguais, portanto:

$$Va_1 = Va_2 \quad (2.41)$$

As equações indicam que o circuito para esta falta é o circuito indicado pela Figura 2.12

Figura 2.12 – Rede de sequência para curto bifásico sem contato com terra



Fonte: CARLOS, 2007

A equação para a corrente de sequência positiva é:

$$Ia_1 = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.42)$$

Portanto, as correntes de curto são dadas por:

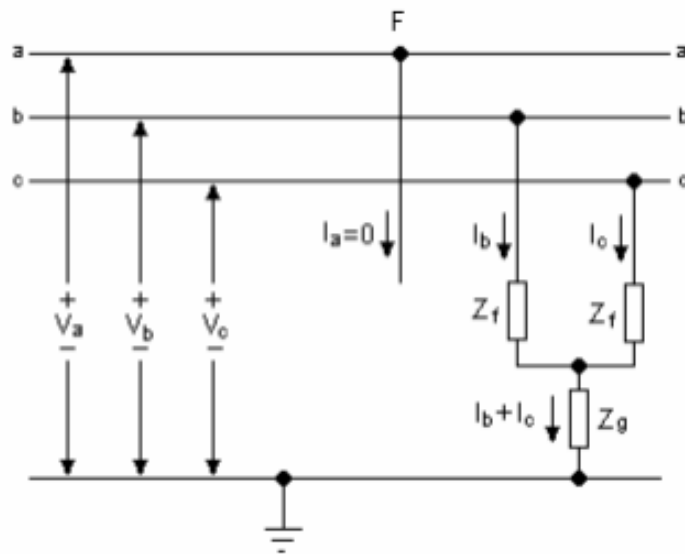
$$I_b = \frac{V_f (a^2 - a)}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.43)$$

$$I_c = \frac{V_f(a - a^2)}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.44)$$

d) Fase-Fase-Terra (Bifásico com o terra):

Este tipo de curto não apresenta grande número de ocorrências, segundo (SATO 2015), apenas 10% das ocorrências. A Figura 2.13 ilustra este tipo de curto.

Figura 2.13 – Curto-circuito fase-fase-terra



Fonte: (CARLOS, 2007)

As condições que este tipo de curto impõe são:

$$I_a = 0 \quad (2.45)$$

$$V_b = Z_f I_b + Z_g (I_b + I_c) \quad (2.46)$$

$$V_b = V_{a_0} + a^2 V_{a_1} + a V_{a_2} \quad (2.47)$$

$$V_c = V_{a_0} + a V_{a_1} + a^2 V_{a_2} \quad (2.48)$$

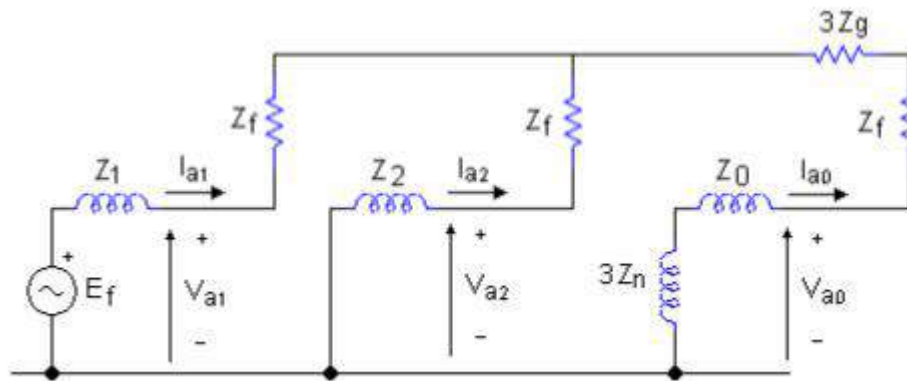
Subtraindo as equações, rearranjando e realizando as equações matemáticas obtêm-se, segundo Anderson (1995):

$$V_{a_0} - Z_f I_{a_0} - 3Z_g I_{a_0} = V_{a_1} - Z_f I_{a_2} \quad (2.49)$$

A equação (2.49) define o circuito correspondente apresentado na Figura 2.14



Figura 2.14 – Diagrama de sequência para curto fase-fase-terra



Fonte: (CARLOS, 2007)

Por outro lado, a corrente de sequência positiva é dada pela equação (2.50) ainda segundo Anderson (1995):

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f + \frac{(Z_2 + Z_f)(Z_0 + 3Z_n + Z_f + 3Z_g)}{Z_0 + Z_2 + 3Z_n + 3Z_g + 2Z_f}} \quad (2.50)$$

## 2.2. Princípios da Proteção

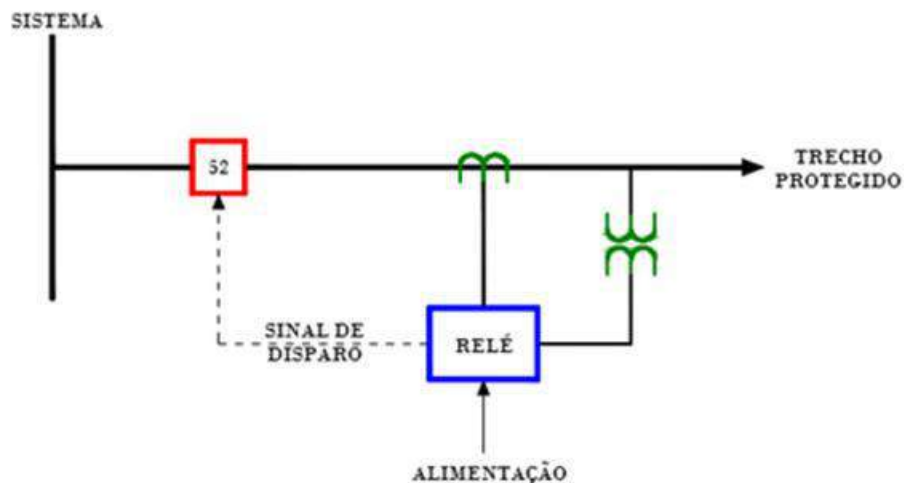
Segundo Mamede (2013), os elementos da proteção possuem duas funções principais: Garantir a desconexão do sistema elétrico que esteja submetido a anormalidades que causem a operação fora dos limites previstos; Viabilizar as informações necessárias para os operadores de modo a facilitar a localização dos defeitos e a sua consequente recuperação. A proteção será projetada basicamente por relés e fusíveis incorporados a um disjuntor que é o responsável pelo desligamento da parte afetada com a fonte supridora.

Para Sato (2015) os elementos da proteção diminuem a área de abrangência de uma falta e restabelecem o fornecimento de energia elétrica quando perturbações graves causam o blecaute devido ao fato de o sistema de proteção ser provido de procedimentos operativos preestabelecidos e automatismos adequados como o relé, que junto com equipamentos ligados, convenientemente, ao sistema, tem a função de detectar situações intoleráveis ou indesejáveis dentro de uma zona preestabelecida e isolar as partes afetadas .

Sato (2015) argumenta também que os elementos da proteção permitem que as condições do sistema de potência sejam monitoradas constantemente pelo sistema de medidas analógicas que são os transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP).

As correntes e as tensões transformadas alimentam um sistema de decisões lógicas (relé de proteção), que compara o valor medido com o valor previamente ajustado no relé. A operação do relé ocorrerá sempre que o valor medido exceder o valor ajustado, atuando sobre um disjuntor. Na Figura 2.15 é apresentada a configuração utilizada para a estratégia de proteção:

Figura 2.15 – Esquema de proteção do conjunto relé e disjuntor no sistema elétrico



Fonte: (COVRE, 2001)

Para que fique claro, cita-se como exemplo, um raio que incida sobre uma linha de transmissão (LT) do sistema de distribuição ocasionando uma corrente elevada, necessariamente, a corrente anormal irá passar pelo TC, sendo referida para o seu secundário onde está conectado o relé de sobrecorrente que será sensibilizado e, imediatamente, ou temporizadamente, envia o sinal para o disjuntor realizar a manobra de abertura do circuito.

### 2.2.1. Transformador de corrente e Transformador de potencial

O transformador de corrente nada mais é que um transformador utilizado com a função de medição da corrente e isolamento dos equipamentos de medição e proteção encontrados no seu secundário. Esta medição pode ser utilizada para duas finalidades diferentes que são: faturamento e proteção com diferenças nas características de saturação e erro de precisão.

Segundo Kindermann (2012), o TC é um transformador com a incumbência de reproduzir, proporcionalmente, em seu circuito secundário, a corrente que passa pelo seu primário com a posição fasorial mantida, conhecida e adequada para uso dos equipamentos de

medição, controle e proteção. Ainda segundo este autor, com o objetivo de padronizar os equipamentos, a corrente nominal apresentada pelo lado secundário do TC é de 5A, e na Europa é de 1A, de modo que as transformações dos TCs sejam denotadas por  $\frac{x}{5}$ . Segundo a norma NBR 6856 da ABNT as correntes primárias podem ser de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 e 8000A. Os valores sublinhados são usados segundo a norma ANSI.

De forma simples, os TCs devem ser selecionados de acordo com dois critérios: O primeiro é o critério de carga em que corrente nominal do TC deve ser no mínimo a corrente de operação do sistema em condições normais; O outro critério é o critério de curto-circuito, em que é necessário que se tenha os valores das correntes de curto-circuito monofásicos, bifásicos e trifásico, apresentadas na secção anterior, onde será utilizado o maior valor apresentado e, por conseguinte, determina-se através da equação (2.51) o valor mínimo nominal do TC segundo esse critério:

$$I_n = \frac{ICC_{max}}{FS} \quad (2.51)$$

Na equação (2.51), o termo FS consiste no Fator de sobrecorrente. Este valor, segundo as normas ANSI e ABNT, é 20.

Com base nesses dois critérios, a corrente nominal do TC será determinada com base no maior valor encontrado e que esteja de acordo com os valores disponíveis segundo as normas ABNT e ANSI.

Quanto ao transformador de potencial, este apresenta função semelhante ao TC, entretanto a grandeza medida será a tensão. Os TPs apresentam como padrão de tensão no seu secundário o valor de 115V. Já a tensão em seu primário é determinada com base na tensão nominal da rede elétrica.

### 2.2.2. Relés de proteção

Os sistemas de proteção estão associados aos equipamentos existentes no sistema elétrico, ou seja: geradores, transformadores, linhas, barramentos, motores, capacitores, entre outros. Geralmente, cada equipamento possui seu sistema de proteção com funções

específicas, que o desconectará da rede em caso de defeito. Desta forma, o sistema de proteção é dividido em zonas, que são definidas pela localização dos disjuntores ou, mais precisamente, dos transformadores de corrente responsáveis pela medição da grandeza a ser monitorada (BLACKBURN, 2006).

Como mencionado anteriormente, a presença de anomalias na rede interfere na magnitude da tensão e da corrente. Porém, esses acontecimentos também modificam outros parâmetros como:

- Frequência;
- Potência ativa e reativa;
- Ângulos dos fasores de tensão e corrente;
- Componentes harmônicas, etc.

Com isso, mesmo os fundamentos de proteção sendo muito semelhantes, é necessário que existam tipos de relés específicos para cada filosofia de equipamento. A seguir se descreve, o que se considera, os principais relés e suas respectivas numerações que são utilizados na proteção de sistemas elétricos.

- Relé de sobrecorrente (50/51):

Como o próprio nome diz, este relé atua quando estiver passando por ele um valor de corrente superior ao seu valor de ajuste. Trata-se de uma proteção essencial em todos os seguimentos do sistema elétrico.

- Relé diferencial de corrente (87):

Este relé tem por princípio comparar a corrente de entrada com a corrente de saída de algum equipamento que se deseja realizar a proteção. Caso o valor de corrente encontrado na comparação seja maior que a corrente de ajuste do relé, o mesmo irá disparar abrindo o disjuntor.

- Relé direcional (67):

O relé direcional é utilizado para monitorar o relé de sobrecorrente em sistemas onde existe geração em ambas as extremidades, ou em casos em que o sistema apresenta arranjo em anel, visto que não seria possível a coordenação apenas com o relé de sobrecorrente para esses casos.

O relé direcional, que monitora o relé de sobrecorrente, confere característica radial ao sistema em anel. Ou seja, o sistema em anel se comporta como dois sistemas radiais em sentidos opostos (KINDERMANN, 2012). Este relé, em específico, apresenta dois conjuntos de bobinas em quadratura, e possui a característica de necessitar de duas grandezas para a sua atuação, uma de operação e outra de polarização.

- Relé de distância (21):

Este relé possui a propriedade de conseguir verificar mudanças nas impedâncias das linhas de transmissão. O mesmo necessita de dois parâmetros elétricos para conseguir operar que são a corrente de linha e a tensão de fase. Podem ser de três tipos:

- o Relé de distância de impedância
- o Relé de distância de admitância
- o Relé de distância de reatância

Na visão de (COURY, 2008), os relés são os responsáveis pela lógica de atuação, ou seja, a partir dos sinais provenientes dos transformadores de corrente e potencial tomam a decisão de atuar ou não atuar. A atuação dos relés de proteção se caracteriza pelo envio do sinal de abertura a um disjuntor (disparo) e é definida pelo tipo de função que o relé está executando e seus ajustes, determinados de acordo com a filosofia de proteção adotada e a topologia da rede elétrica que se deseja proteger.

### **2.2.3. Disjuntor de Proteção**

O disjuntor de proteção pode ser definido como um equipamento eletromecânico com a finalidade de interromper a corrente elétrica que passa por ele assim que receber a ordem de um relé ou de um comando manual realizado pelo operador. Além disso, diferente de um fusível, o disjuntor possui a propriedade de se rearmar e reestabeler a corrente do circuito que foi interrompida. Portanto, o disjuntor é um equipamento de manobra e de proteção.

A medida que o disjuntor realiza a manobra de abertura, no seu interior, surge um arco elétrico que precisa ser extinto. Dos mais variados tipos de disjuntores que estão presentes no mercado atualmente, a forma com que o mesmo irá extinguir o arco-elétrico define o seu tipo construtivo. Os tipos mais comuns são segundo Garzon (2002):

- Disjuntor a óleo
- Disjuntor a sopro magnético
- Disjuntor a vácuo
- Disjuntor a Sf<sub>6</sub>
- Disjuntor a ar comprimido

Outra característica dos disjuntores é a forma de armazenamento de energia necessária para a abertura do mesmo. Os tipos de acionamentos são (Mamede, 2005):

- Sistema de mola
- Sistema de solenoide
- Sistema de ar comprimido
- Sistema hidráulico

Os principais parâmetros elétricos de um disjuntor são (Mamede, 2005):

- Tensão nominal
- Nível de isolamento
- Tensão de restabelecimento
- Corrente nominal
- Corrente de interrupção
- Corrente de interrupção simétrica nominal
- Corrente suportável de curta duração, etc.

Os parâmetros devem ser especificados para garantir a operação correta do disjuntor. Além disso, o número de operações que podem ser realizadas pelo disjuntor, segundo a ANSI, deve ser em função da tensão e da corrente nominal do mesmo.

#### **2.2.4. Seletividade e Coordenação**

A filosofia adotada nos sistemas de proteção possui, em resumo, a prioridade de, no momento em que ocorra uma falha, o dispositivo mais próximo ao curto deve atuar primeiro, para que sistema isole apenas a parte afetada, mantendo o maior número de cargas sendo alimentadas. Entretanto, caso ocorra algum defeito nesse dispositivo, deve existir uma proteção secundária para realizar a isolação da parte defeituosa.

Segundo Mamede (2005), seletividade pode ser entendida como a característica que um sistema de proteção deve ter para que, ao ser submetido a correntes anormais, faça atuar os dispositivos de proteção de maneira a desenergizar somente a parte do circuito afetada.

A coordenação, no âmbito da filosofia de proteção, é a estratégia usada para garantir redundância para a proteção, pois o sistema de proteção está susceptível a falhas. Portanto, deve existir uma escada de tempo para que, caso o relé de vanguarda falhe, o relé de retaguarda atue.

Para isso é necessário que exista um tempo mínimo de diferença entre os dois relés mais próximos da cadeia de proteção para garantir a coordenação. Este tempo é denominado de Tempo de coordenação ( $\Delta t$ ). Para que haja a coordenação correta, o tempo de coordenação deve obedecer a equação (2.52) (Kindermann, 2012).

$$t_{\text{relé a montante}} - t_{\text{relé a jusante}} \geq \Delta t \quad (2.52)$$

Onde:

$t_{\text{relé a montante}}$  é o tempo do relé a montante

$t_{\text{relé a jusante}}$  é o tempo do relé a jusante

$\Delta t$  é o tempo de coordenação

O tempo de coordenação depende do tipo do relé utilizado e do tipo de disjuntor envolvido. É um valor exclusivamente definido por fabricantes e por técnicos de proteção. Os valores estão apresentados na equação (2.55) (Kindermann, 2012).

$$\Delta t = \left\{ \begin{array}{l} 0,4s \text{ a } 0,5s \text{ para relés eletromecânicos} \\ 0,3s \text{ a } 0,35s \text{ para relés eletrônicos} \\ 0,25s \text{ a } 0,3s \text{ para relés digitais} \end{array} \right\} \quad (2.53)$$

O autor apresenta como uma nota informando que apesar de os relés digitais apresentarem tempo de coordenação menor, na prática, as empresas de energia elétrica adotam o tempo de 0,5s para que se tenha a garantia de que o relé da barra a montante não interfira na atuação do relé da barra a jusante. Neste trabalho será adotado  $\Delta t = 0,5s$ .

### 2.3. O Relé Digital

Os relés digitais estão ganhando espaço no cenário atual devido ao seu alto grau de armazenamento de informações e por conseguir interagir com outros dispositivos eletrônicos inteligentes. Além disso são considerados compactos e fáceis de operar quando o operador está preparado para esta função.

Os relés de digitais multifuncionais apresentam em um único equipamento diversas funções, como (Mamede, 2013):

- 50/51 – Sobrecorrente de fase com elemento instantâneo e temporizado;
- 50/51N – Sobrecorrente de terra com elemento instantâneo e temporizado;
- 51GS – Sobrecorrente de terra sensível com elemento temporizado;
- 67/67N – Sobrecorrente direcional de fase e terra;

- 27 – Subtensão;
- 59 – Sobretensão;
- 59N- Sobretensão de sequência zero;
- 32 – Direcional de potência (ativa e reativa);
- 81 – Frequência;
- 25 – Verificação de sincronismo.

Essa multifuncionalidade é interessante pois esses relés possuem a propriedade de armazenamento de dados, deixando o sistema mais robusto e informativo.

Neste trabalho, o estudo lida com o relé digital de sobrecorrente, cujas principais características operacionais são abordadas a seguir.

### **2.3.1. Características Operacionais do Relé Digital de Sobrecorrente**

Segundo Mamede (2013), o relé de sobrecorrente digital possui um funcionamento simples, basicamente o relé irá receber a corrente vinda do TC, essa corrente é transformada novamente por transformadores existentes no seu interior, de modo a obter a corrente adequada para a entrada do conversor analógico/digital, onde a corrente é transformada em valores digitais e serão analisadas pelo processador. Ainda segundo o autor, as correntes de ajuste do relé são armazenadas em memórias não voláteis de modo a assegurar que mesmo estando sem tensão auxiliar por um longo período de tempo, os dados permanecerão íntegros.

#### **2.3.1.1. Unidades Instantânea e Temporizada do Relé de Sobrecorrente**

- **Unidade Instantânea (50)**

A unidade instantânea, também conhecida como a unidade 50 do relé de sobrecorrente, irá atuar, como o próprio nome sugere, instantaneamente no momento em que a corrente que passa por ele for maior que a do seu ajuste.

Como bem descreve Kinderman (2012), a corrente de ajuste para a unidade instantânea deve ser calculada considerando um curto a 85% da linha de transmissão protegida, a folga de 15% é para garantir a seletividade do relé, ou seja, para que o relé não alcance o relé a jusante, devido a existência de incertezas nos parâmetros usados na modelagem do circuito, como erros dos TCs decorrentes da saturação do mesmo e erros do



próprio relé. Portanto, para qualquer curto-circuito trifásico entre o ponto da instalação do relé e o ponto referente a 85% da linha, atuará a unidade instantânea.

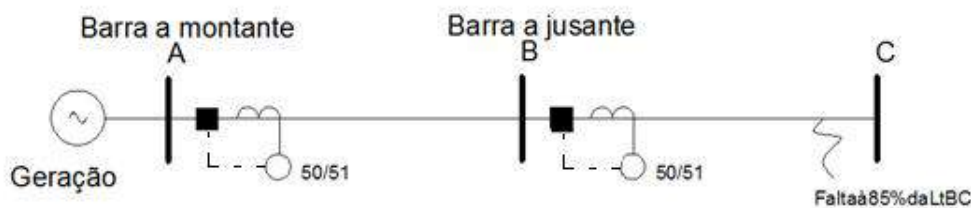
A corrente de ajuste para esta unidade é definida pela equação (2.54):

$$I_{ajuste_{50}} \geq \frac{I_{cc_{3\phi}} \text{ a } 85\% \text{ do circuito protegido}}{RTC} \quad (2.54)$$

Sendo RTC a relação de transformação do TC. A corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha transmissão B-C mostrada na figura 2.16 é determinada através da equação (2.55):

$$I_{cc_{3\phi} \text{ B a } 85\%} = \frac{(I_{cc_{3\phi B}}) \times (I_{cc_{3\phi C}})}{(0.85 \times I_{cc_{3\phi B}}) + (0.15 \times I_{cc_{3\phi C}})} \quad (2.55)$$

Figura 2.16 – Esquema de ligação entre relés a montante e a jusante com falta a 85% da linha BC



Fonte: Autora

- **Unidade temporizada**

Esta unidade, também conhecida como unidade 51, atua de acordo com um determinado tempo pré-estabelecido, tendo em conta a filosofia de coordenação abordada no subtópico 2.2.4.

Tomando como base os ensinamentos de Mamede (2013) de forma geral, a unidade de sobrecorrente temporizado opera quando o valor da corrente que passa pelos seus contatos superar 1,05 do valor da corrente ajustado. Neste momento, a função de temporização se inicia por meio de um contador de tempo que realiza a integração dos valores medidos. Caso a corrente volte ao valor inferior a corrente de partida, o relé retoma a posição inicial.

Segundo Kinderman (2012), a corrente de ajuste do relé deve obedecer a equação 2.56:

$$I_{ajuste_{51}} \geq \frac{1,5 \times I_{nominal}}{RTC} \quad (2.56)$$

A temporização é obtida pela equação (2.57) de acordo com a curva de atuação (MAMEDE, 2013):

$$T = \frac{\beta \cdot D}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^\alpha - 1} + L \cdot D \quad (2.57)$$

Sendo:

D = Dial de tempo

$\beta$ =Coeficiente( vide tabela 2.1)

I=Corrente passante no relé

$I_p$ =Ajuste da corrente de operação

$\alpha$ =Coeficiente (vide tabela 2.1)

L=Coeficiente (vide tabela 2.1)

Tabela 2.1 – Coeficiente da equação tempo x corrente normalizada

Tipo de Curva	Norma	$\beta$	$\alpha$	L
Normal Inversa	IEC 255-3	0,14	0,02	0
Muito Inversa		13,5	1	0
Extremamente Inversa		80	2	0
Inversa de Tempo Longo		120	1	0
Moderadamente Inversa	U.S.	0,0104	0,02	0,0226
Inversa		5,95	2	0,180
Muito Inversa		3,88	2	0,0963
Extremamente Inversa		5,67	2	0,0352

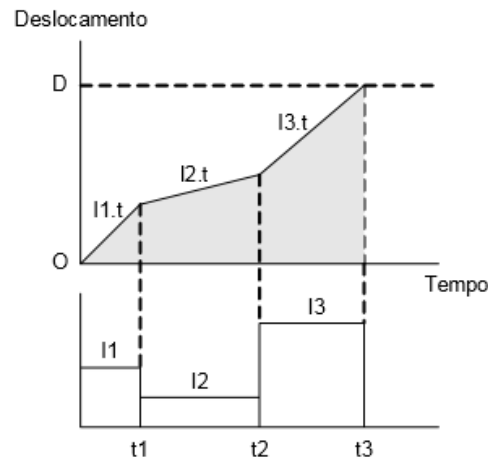
Fonte: (Mamede, 2013)

Para que o relé de sobrecorrente digital apresente um tempo de resposta dinâmica como definido na norma IEEE C37.112 (1996) é necessário que seja realizada a integração da corrente para, como relata Hamilton (2001), reproduzir o comportamento de um relé eletromecânico baseado em disco de indução. Segundo este princípio, para a situação em que

a corrente aplicada ao relé possui amplitude variável, o relé deve integrar os múltiplos segmentos de corrente até que o disco alcance o dial de tempo. A figura 2.17 mostra as áreas que representam a integração dos três segmentos de corrente, a soma dessas áreas corresponde ao deslocamento total do disco. A equação de atuação é definida pela equação (2.58):

$$\int_0^{T_0} \frac{dt}{t(I)} = 1 \quad (2.58)$$

Figura 2.17 – Taxa de deslocamento do disco com corrente de magnitude variável



Fonte: (Sales (2007))

Seguindo este critério, o tempo de atuação ( $T_m$ ) pode ser obtido através da integração do inverso da equação 2.57, como mostra a equação 2.59:

$$\int_0^{T_m} \left[ \frac{\beta \cdot D}{\left( \frac{I(t)}{I_p(t)} \right)^\alpha - 1} + L \cdot D \right]^{-1} dt > 1 \quad (2.59)$$

### 2.3.1.2. Curvas das Unidades Temporizadas do Relé de Sobrecorrente Digital

As curvas temporizadas para o relé digital de sobrecorrente 51 são apresentadas nas figuras 2.18 a 2.21. Essas curvas adotam os coeficientes definidos na Tabela 2.1 e são função do múltiplo do relé, cuja expressão é definida na equação (2.60). Vale ressaltar que as curvas apresentadas foram geradas com o Dial variando de 0,1 a 1, com o passo de 0,1.

$$M = \frac{I_{cc3\phi} \text{ a } 85\% \text{ do circuito protegido}}{RTC \cdot I_{ajuste51}} \quad (2.60)$$

Pode-se assim substituir a equação do múltiplo na equação (2.57), obtendo como resultado a equação (2.61).

$$T = \frac{\beta \cdot D}{(M)^\alpha - 1} + L \cdot D \quad (2.61)$$

Figura 2.18 – Curva inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51

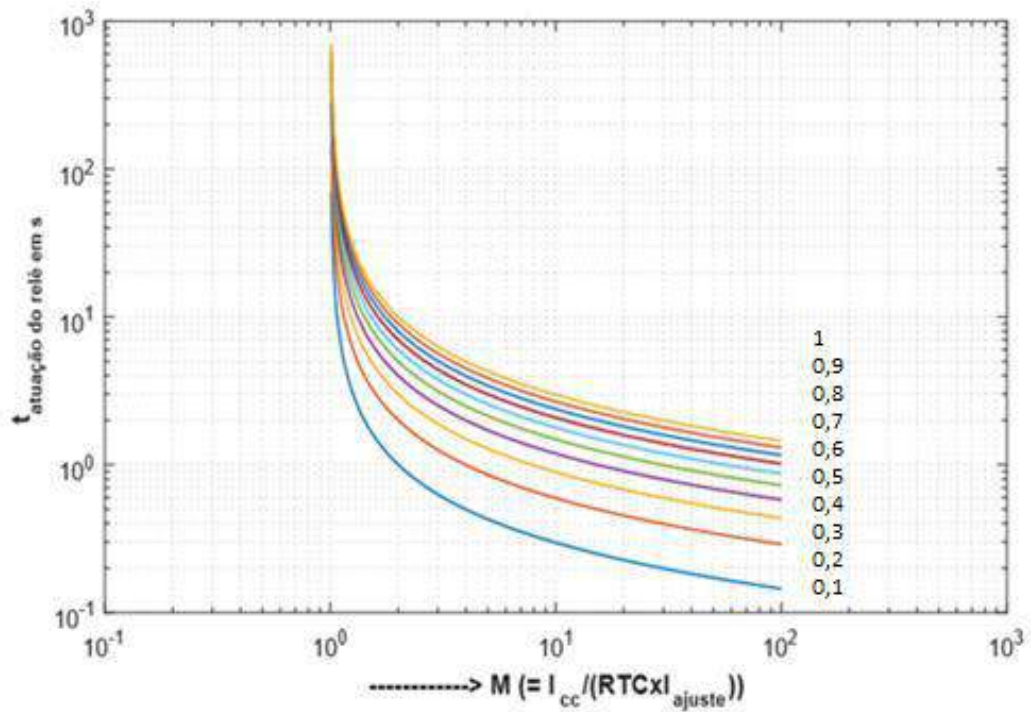


Figura 2.19 – Curva moderadamente inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51

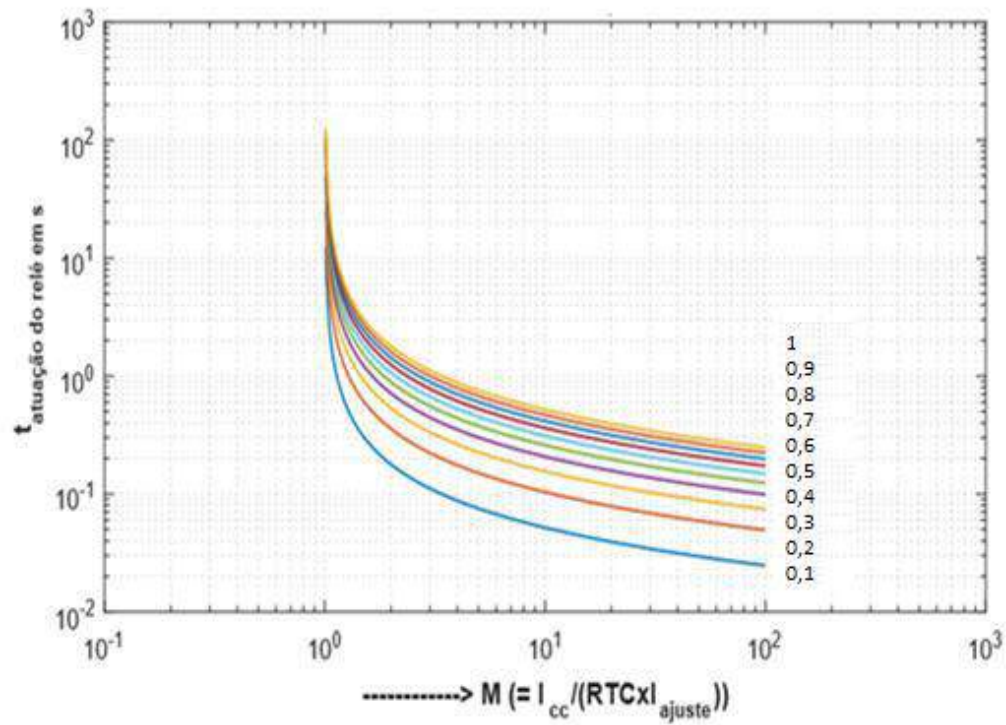


Figura 2.20 – Curva Muito Inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51

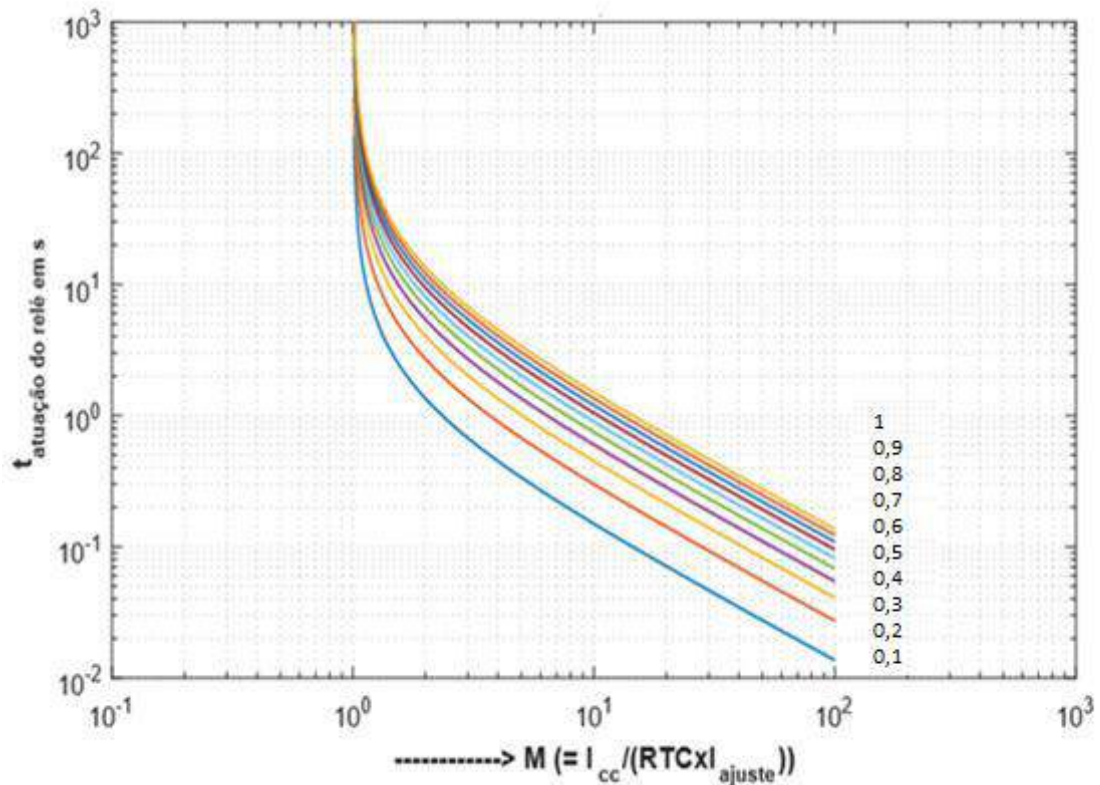
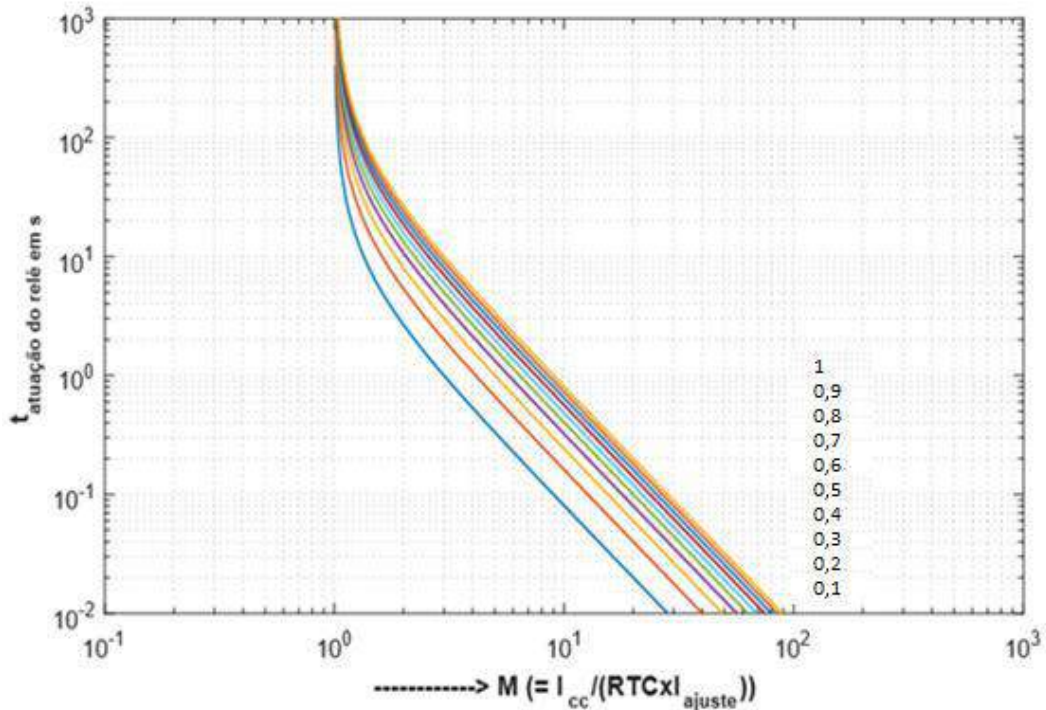


Figura 2.21 – Curva Extremamente Inversa Norma IEC para Relé de sobrecorrente 51



### 2.3.2. Regras de Coordenação de Relés de Sobrecorrente

A coordenação é realizada apenas para a unidade temporizada, para melhor compreensão, o esquema da figura 2.18 será usado como exemplo para demonstração das regras de coordenação para sistemas radiais utilizando as barras A e B.

1. Inicialmente, as correntes de ajuste de atuação dos Relés das barras A e B são determinados utilizando a equação (2.56).
2. De posse das correntes de ajuste, deve-se determinar os múltiplos desses relés utilizando a equação (2.60).
3. Escolhe-se a curva com menor dial para o relé da barra a jusante, neste caso a barra B, e utiliza-se a equação (2.61) para determinar o tempo de atuação deste relé com base na curva adotada.

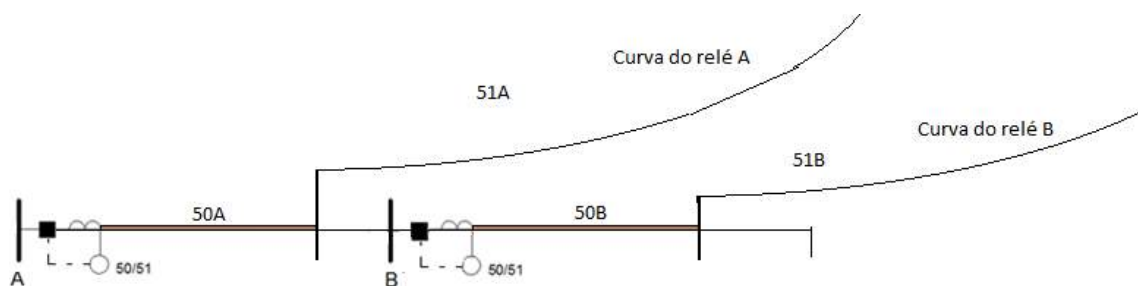
4. Com o tempo de atuação determinado para o relé da barra B, utiliza-se o  $\Delta_t$  como mostra a equação 2.53 para obter o tempo previsto para o relé da barra A pela equação 2.52.
5. Determina-se o Dial que será utilizado verificando a curva que melhor atende as necessidades do tempo. E está concluída a coordenação.

Este procedimento deve ser adotado para todos os relés de sobrecorrente existente no sistema. Em regra, dado a complexidade e tamanho do sistema elétrico, o procedimento na determinação dos tempos de atuação dos relés de sobrecorrente de modo a garantir a correta coordenação dos mesmos é realizada através de softwares computacionais desenvolvidos para esta finalidade (Kindermann, 2012).

Desta forma, 85% da linha de transmissão será protegida pela unidade instantânea e 15% pela unidade temporizada. Vale salientar que em caso de falha do relé de sobrecorrente localizado na barra a jusante, a curva do relé a montante deve cobrir todo o trecho, tanto para falhas na unidade instantânea como na unidade temporizada.

A figura 2.22 apresenta a configuração que melhor se enquadra na filosofia de proteção, pois, para curto-circuito com alta intensidade a unidade instantânea opera e a temporização apresenta um tempo reduzido a medida que a corrente de curto aumenta.

Figura 2.22 – Proteção e coordenação de relés de sobrecorrente



Fonte: Autora (Baseado em Kindermann (2012))

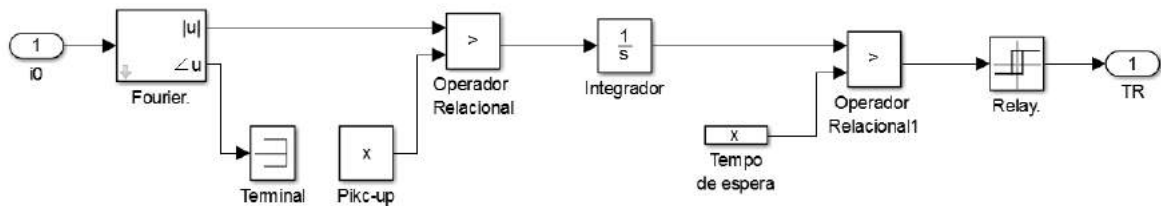
### 2.3.3. Modelos Desenvolvidos para Simulação Computacional

O desenvolvimento de modelos de relés digitais para simulação computacional objetiva contribuir para o melhor entendimento do funcionamento destes equipamentos bem

como da filosofia de coordenação dos mesmos. Pelo fato de não haver muitos modelos desenvolvidos e a maioria seguir linhas muito semelhantes de operação irão ser destacados 2 trabalhos descritos a seguir.

Um dos modelos que comumente é adotado pela comunidade científica para a simulação de relé digital de sobrecorrente consiste no modelo desenvolvido por Kezunovic (2016). Neste modelo, o relé de sobrecorrente apresenta curva de atuação de tempo definido, e foi desenvolvido na plataforma MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup>. Para propósitos de simplificação, o autor demonstra apenas o modelo monofásico. Neste modelo, a corrente é transformada em um fasor, sendo sua magnitude comparada com a corrente de ajuste do relé. A comparação será integrada de modo a refletir o atraso de tempo de atuação do relé. Sendo assim, a saída do integrador será comparada com o tempo limite de modo a definir o sinal de comando (Trip) para acionamento do disjuntor. Este modelo é apresentado na íntegra na Figura 2.23.

Figura 2.23 – O modelo funcional de um relé de sobrecorrente de tempo definido

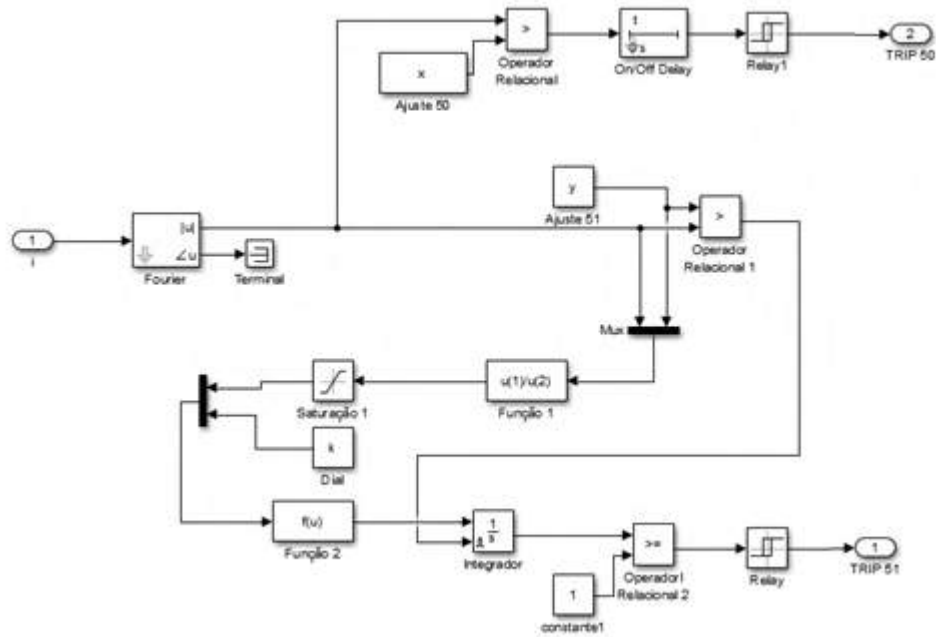


Fonte: (KEZUNOVIC (2016))

Dentre os trabalhos consultados na literatura da especialidade relativos a modelos de relés digitais, pode-se destacar o trabalho apresentado por (SALLES, 2007). O autor desenvolve um modelo de um relé de sobrecorrente bastante completo, contendo as unidades instantânea (50) e temporizada (51) simultaneamente. Este modelo é apresentado na Figura 2.24.



Figura 2.24 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente



Fonte: (Salles, (2007))

Tendo em conta o alto nível de detalhes desenvolvido pelo autor, este modelo foi escolhido e adotado para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. Contudo, para os propósitos pretendidos neste documento, algumas pequenas modificações no modelo do relé ilustrado na Figura 2.20 foram adotadas e serão discutidas e apresentadas em detalhes no capítulo 3.

### 3. MODELIZAÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Este capítulo apresenta o modelo funcional implementado, destacando suas características e os dados de entrada para os blocos utilizados. É importante ressaltar que o modelo implementado utiliza o filtro digital de Fourier de um ciclo para estimar o fasor da corrente devido a sua vasta aplicação em relés de proteção.

#### 3.1. Modelo do Relé Digital de Sobrecorrente com unidade instantânea e temporizada – 50/51

A modelização do relé 50/51 realizada na plataforma MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup> é mostrado na figura 3.1, e apresenta a união da unidade temporizada com a unidade instantânea que serão descritas detalhadamente nos tópicos 3.1.1 e 3.1.2 respectivamente. A partir desse modelo criou-se uma máscara apresentada na figura 3.2.

Figura 3.1 – Relé 50/51

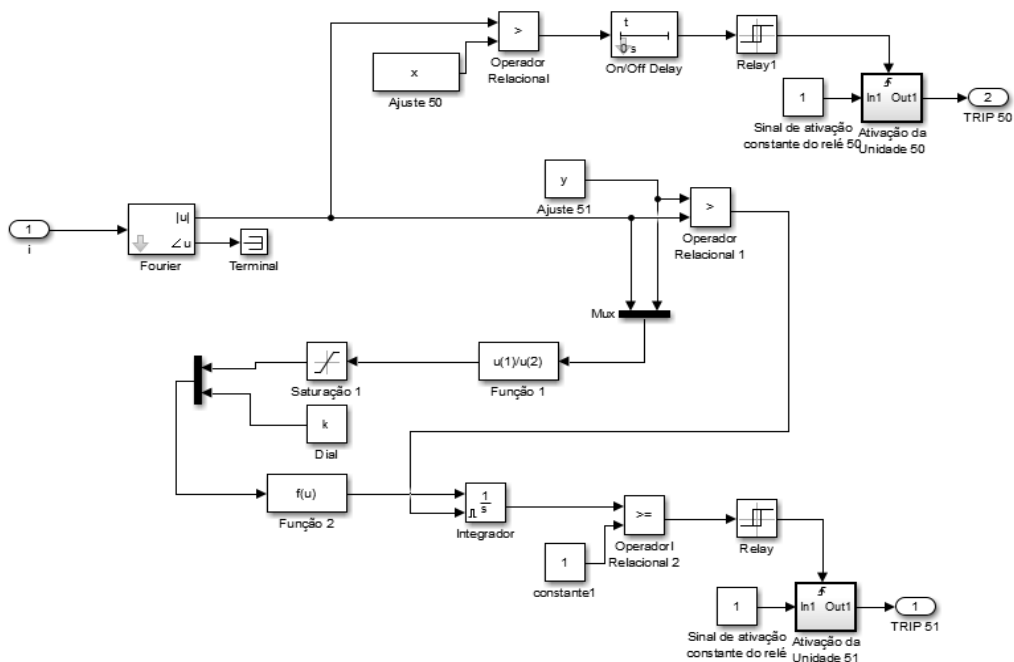
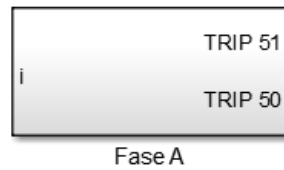


Figura 3.2 – Máscara para o relé trifásico

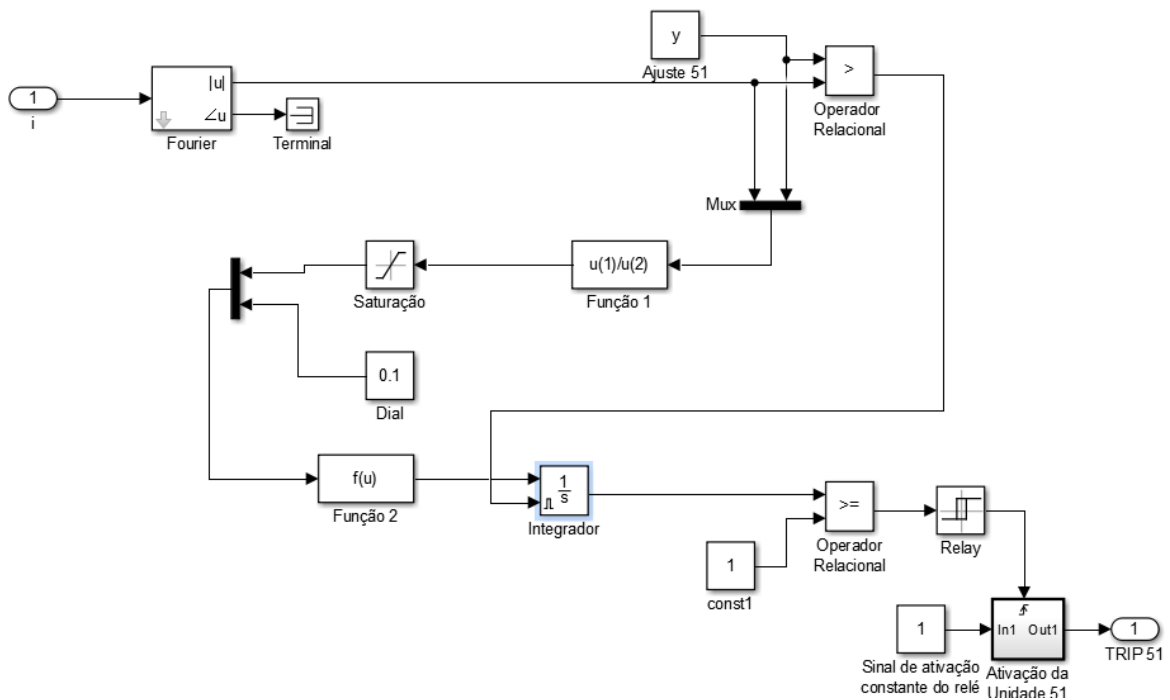


Esta máscara será inserida ao Relé de Sobrecorrente Trifásico que será descrito no tópico 3.2.

### 3.1.1. Unidade temporizada (51)

A figura 3.3 mostra o diagrama de blocos do modelo implementado para a unidade temporizada. A seguir serão descritos todos os blocos e os seus respectivos parâmetros utilizados para a modelização.

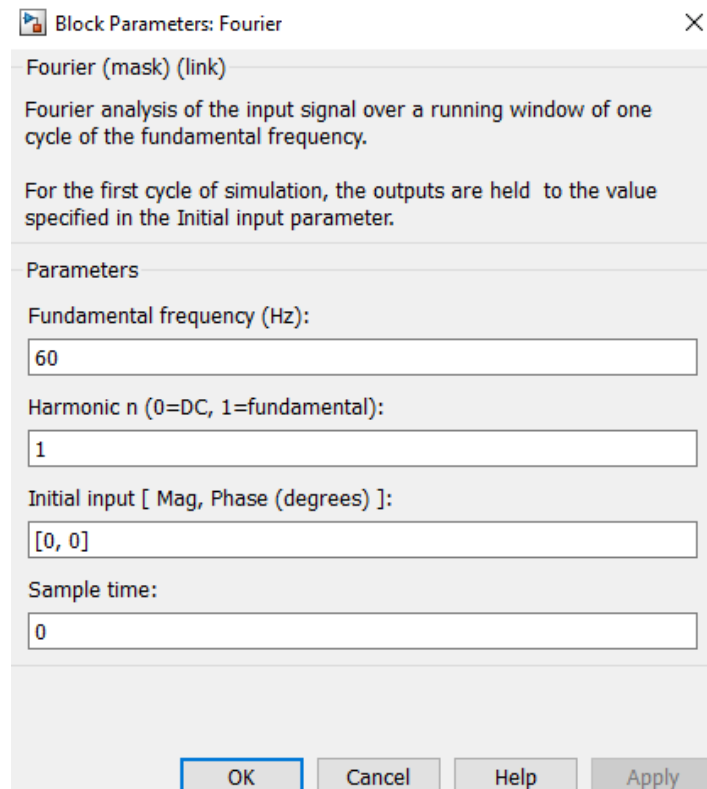
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente unidade instantanea



O bloco  $i$  representa a porta de entrada para o sinal da corrente oriundo do circuito primário.

O bloco *Fourier* é utilizado para converter a corrente amostrada em uma representação do fasor da frequência fundamental, sendo obtido na saída do bloco o módulo da amplitude da corrente de entrada como também a sua fase. A figura 3.4 ilustra os parâmetros utilizados nesse bloco, em que 60hz é a frequência adotada para o sistema utilizado.

Figura 3.4 – Definição dos parâmetros do bloco Fourier



A fase da corrente não será necessária para o cálculo do tempo, portanto, inclui-se o bloco *Terminal* para evitar possíveis mensagens de erro durante a execução da simulação.

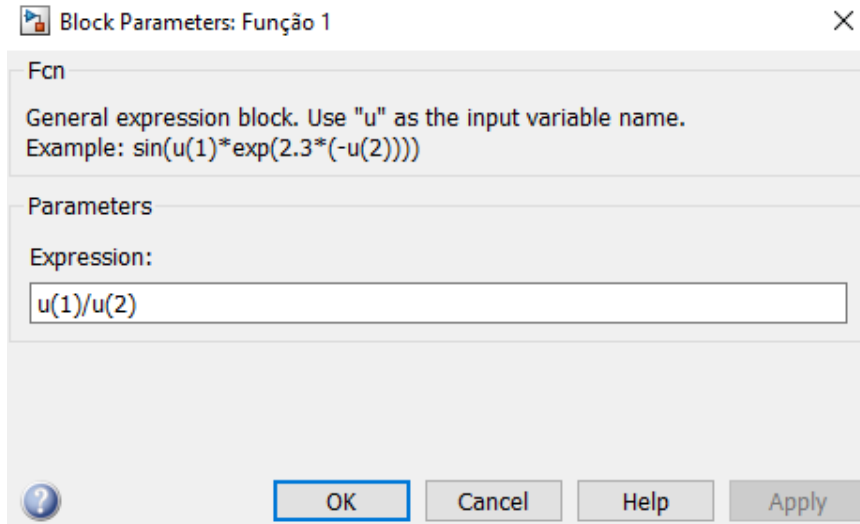
O bloco *Ajuste 51* exprime em sua saída um valor constante especificado pelo parâmetro *Constant value*, que será definido através da equação (2.56) de acordo com o valor de ajuste do relé.

O bloco *Operador relacional 1* tem a função de comparar o valor da corrente vinda do bloco *Fourier*, com a corrente de ajuste do relé. O sinal de comparação 'maior' foi escolhido pois se a magnitude do fasor for maior que a corrente de operação, terá início a integração do fasor corrente, caso contrário ocorrerá o *reset* do bloco *Integrador*.

O bloco Mux de duas entradas foi utilizado para que uma única saída fosse retornada, as entradas são o fasor da corrente do sistema e a corrente de operação do relé, chamadas de u(1) e u(2) respectivamente.

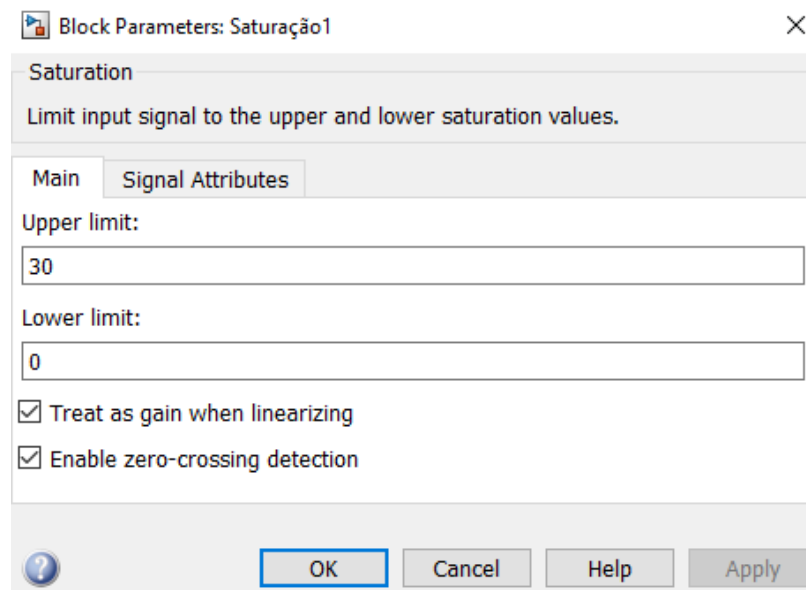
O bloco *Função1* é a função responsável por calcular o múltiplo do relé dado pela equação 2.60, ou seja, a divisão das funções  $u(1)$  por  $u(2)$  vindas do *Mux* como apresenta a figura 3.5.

Figura 3.5 – Definição da função para o cálculo do Múltiplo



O bloco *Saturação 1* limita o múltiplo da corrente de operação. Como mostra a figura 3.6 o valor escolhido foi 30, pois, a partir desse ponto as características da curva de tempo inverso passam a ser de tempo definido.

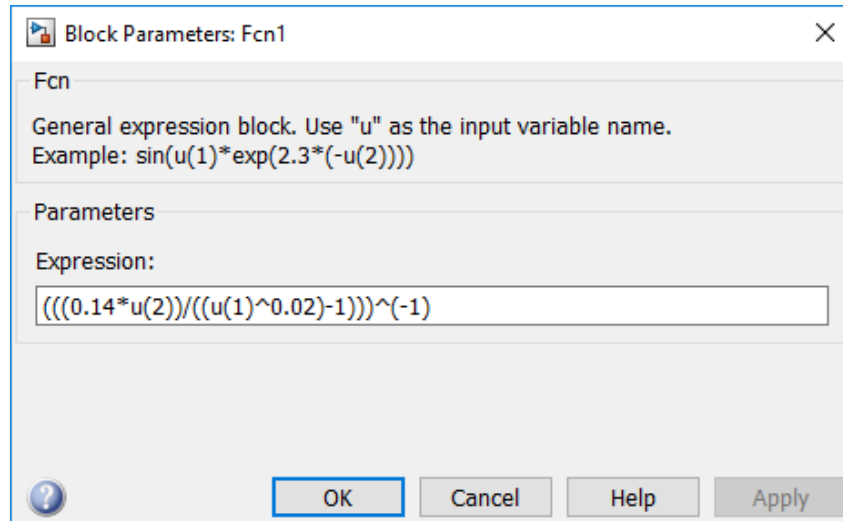
Figura 3.6 – Definição dos parâmetros do bloco Saturação



O bloco *Dial* representa exatamente o dial de tempo da curva escolhida que, junto com o múltiplo calculado anteriormente, entram no bloco *Função 2* que por sua vez é

definido pela equação (2.61) com  $u(2)$  sendo o Dial e  $u(1)$  o múltiplo como mostra a figura 3.7.

Figura 3.7 – Definição do bloco Função 2

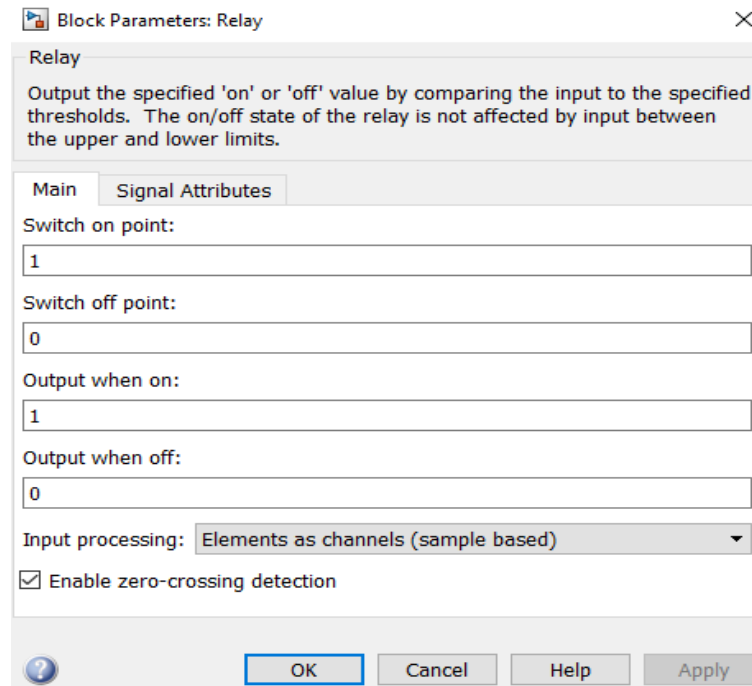


O bloco *Integrador* é acionado a medida que a corrente de operação for maior que a corrente de ajuste do relé como dito anteriormente e resetado quando esta prerrogativa for falsa.

O bloco *Operador relacional 2* faz a comparação entre a saída do integrador e a constante 1, ou seja, caso o sinal seja maior que ou igual a 1, na saída tem-se o sinal lógico alto, caso contrário tem-se sinal logico baixo.

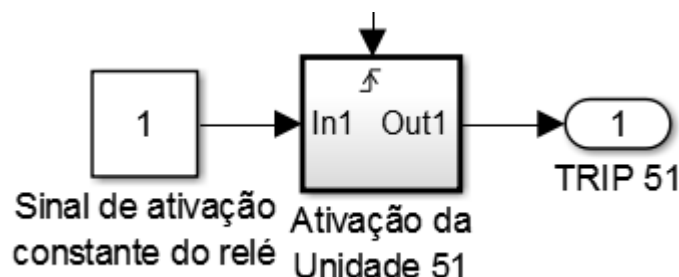
O bloco *Relay* é usado para evitar transientes de comutação, ele mantém a saída em sinal lógico alto até que a entrada decaia abaixo do valor especificado em *Switch off point*. Os parâmetros desse bloco são apresentados na figura 3.8.

Figura 3.8 – Definição dos parâmetros do bloco Relay



É importante ressaltar que um dos objetivos desse trabalho é utilizar o sinal oriundo do relé para realizar a abertura do disjuntor, para que assim, seja possível realizar uma análise do sistema como um todo, observando as correntes encontradas nas linhas do sistema antes e após o acionamento do relé. O bloco *Ativação da Unidade 51* mostrado na figura 3.9 foi inserido ao modelo do relé, sendo uma das modificações feitas nesse trabalho, com a função de: Uma vez o relé atuado, o mesmo apresentará o valor 1 na saída independente das mudanças que venham a ocorrer no sistema que possam causar a sua desativação.

Figura 3.9 – Lógica inserida ao modelo original do relé

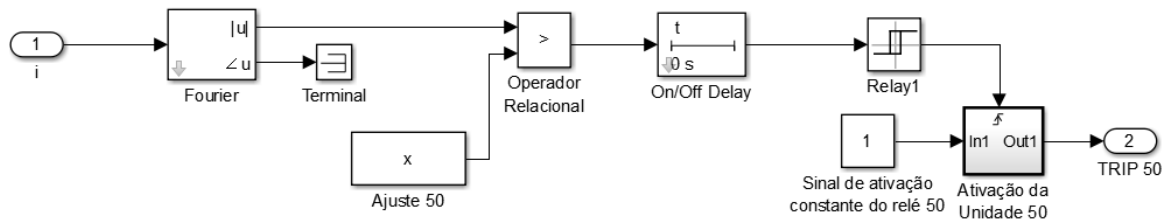


A saída TRIP 51 mostra o sinal de saída através da máscara apresentada na figura 3.2.

### 3.1.2. Unidade Instantânea (50)

Para a unidade de sobrecorrente instantânea o modelo simulado é apresentado na figura 3.10. Trata-se de um modelo simples e de fácil compreensão que será descrito a seguir.

Figura 3.10 – Unidade instantânea



O mesmo sinal vindo do bloco *Fourier* apresentado na seção anterior é comparado com a constante imposta pelo bloco *Ajuste 50* que deve ser definido como o valor equivalente a corrente de ajuste do relé de sobrecorrente instantâneo dada pela equação (2.54). A comparação é realizada pelo bloco *Operador relacional* com o sinal ‘maior que’, sendo assim, quando o valor do fasor da corrente do sistema for maior que a corrente de ajuste do relé, o bloco *On/Off Delay* irá manter a saída em sinal lógico alto, caso essa afirmativa permaneça até o tempo definido em *Time delay*, caso contrário, a saída permanecera em nível lógico baixo. A configuração para o bloco *On/Off Delay* é apresentada na figura 3.11.



Figura 3.11 – Parâmetros do bloco On/Off Delay

Block Parameters: On/Off Delay

On/Off Delay (mask) (link)

Apply a delay on the input signal when the input changes to TRUE (1) or FALSE (0).

On delay: When the input becomes TRUE, the output becomes TRUE after the specified time delay as long as the input is still TRUE. If the input becomes FALSE before the time delay has expired, the output stays FALSE.

Off delay: When the input becomes FALSE, the output becomes FALSE after the specified time delay as long as the input is still FALSE. If the input becomes TRUE before the time delay has expired, the output stays TRUE.

Parameters

Select type: On delay

Time delay (s): 0

Initial condition of previous input: 0

Sample time: 0

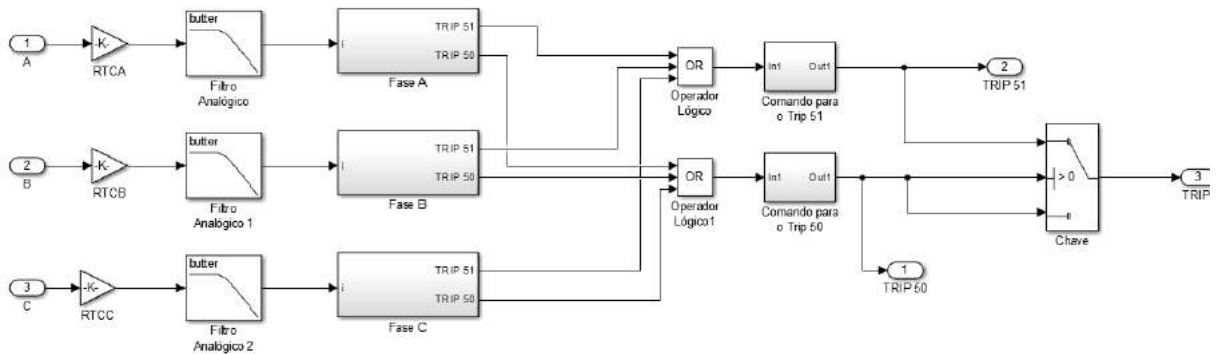
OK Cancel Help Apply

Os blocos *Relay* e *Ativação da Unidade 50* possuem a mesma função e configuração que foi apresentada anteriormente para a unidade temporizada na seção anterior. A saída TRIP 50 mostra a saída para este sistema na máscara apresentada pela figura 3.2.

### 3.2. Modelo do relé 50/51 para sistemas trifásicos

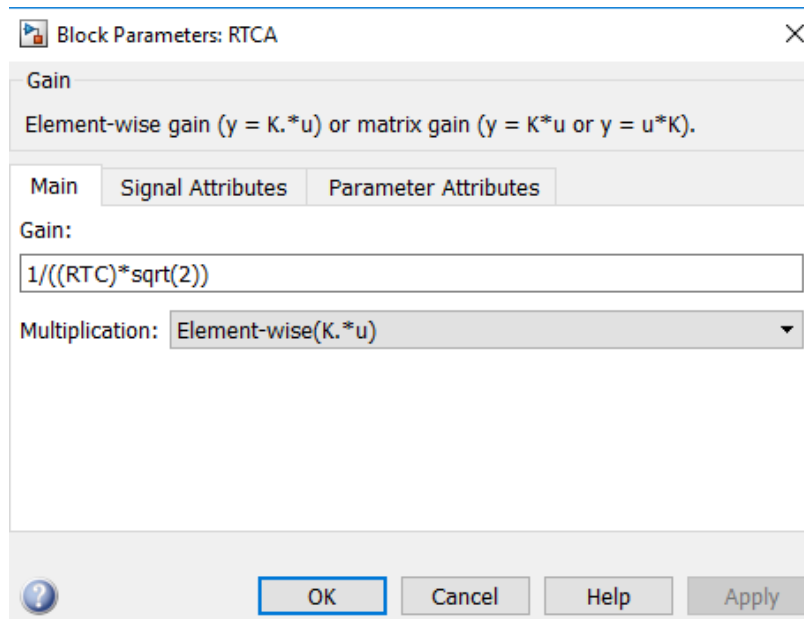
Para que o relé de sobrecorrente possa ser inserido a um sistema trifásico se faz necessário a modelização apresentada na figura 3.12. Cada fase apresenta sua proteção, e a partir desses sinais de entrada serão originados 3 sinais de saída: Trip 50, Trip 51 e Trip, sendo este último o sinal que realiza a abertura do disjuntor. A seguir a configuração será descrita detalhadamente.

Figura 3.12 – Configuração para o relé trifásico



O bloco RTC é o ganho referente a relação de transformação do TC, e seus parâmetros são definidos como mostra a figura 3.13.

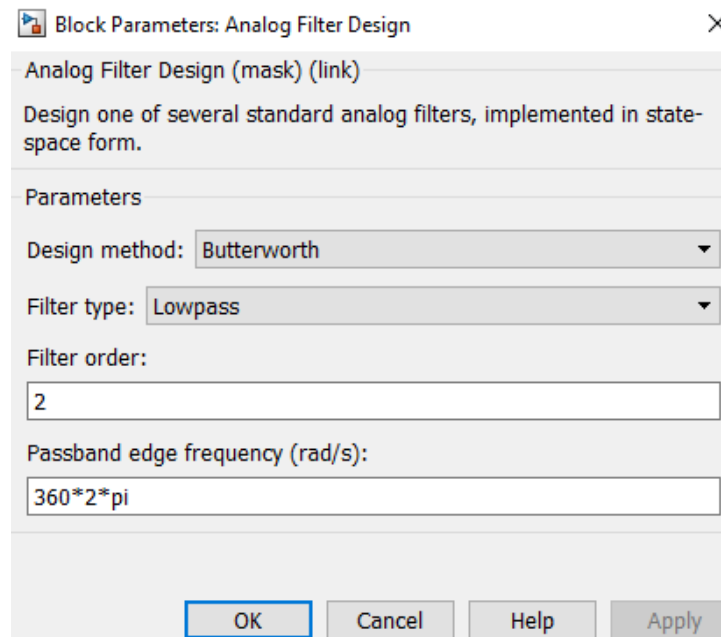
Figura 3.13 – Parâmetros do bloco RTC



O fator  $\sqrt{2}$  escala o valor de pico da corrente para valor eficaz, esse procedimento se faz necessário uma vez que o bloco Fourier expressa a magnitude do fasor em valor de pico e não o valor eficaz.

A corrente escalonada passa pelo bloco *Filtro analógico* que é um filtro *anti-aliasing* que rejeita altas frequências e limita o espectro de frequências do sinal da corrente, seus parâmetros são apresentados na figura 3.14.

Figura 3.14 – Parâmetros do filtro

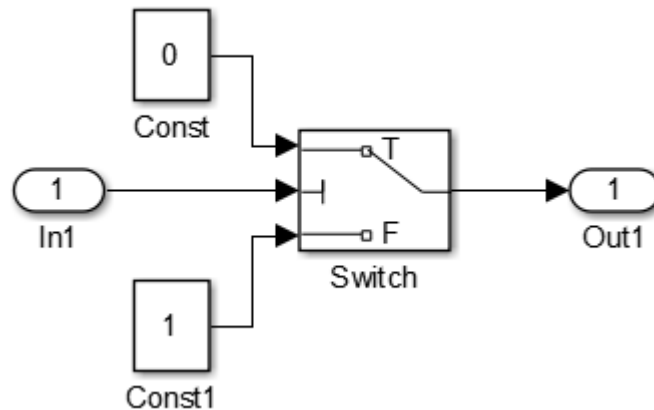


Segundo Salles (2007), o filtro escolhido é do tipo *Butterworth*, passa-baixas de 2ª ordem, com a frequência de corte de 360 HZ pois, na prática, são empregues filtros com frequência superior a um terço da frequência de amostragem para remover as altas frequências indesejadas da forma de onda a ser amostrada, limitando a faixa do espectro de frequência a fim de atender o teorema de amostragem de Nyquist.

Logo em seguida tem-se o modelo do relé 50/51 mostrado na figura 3.2, seguido da porta lógica OR, que irá receber os sinais das três fases do sistema, fazendo com que, independente da fase em que ocorra a falta, o sinal do trip seja gerado.

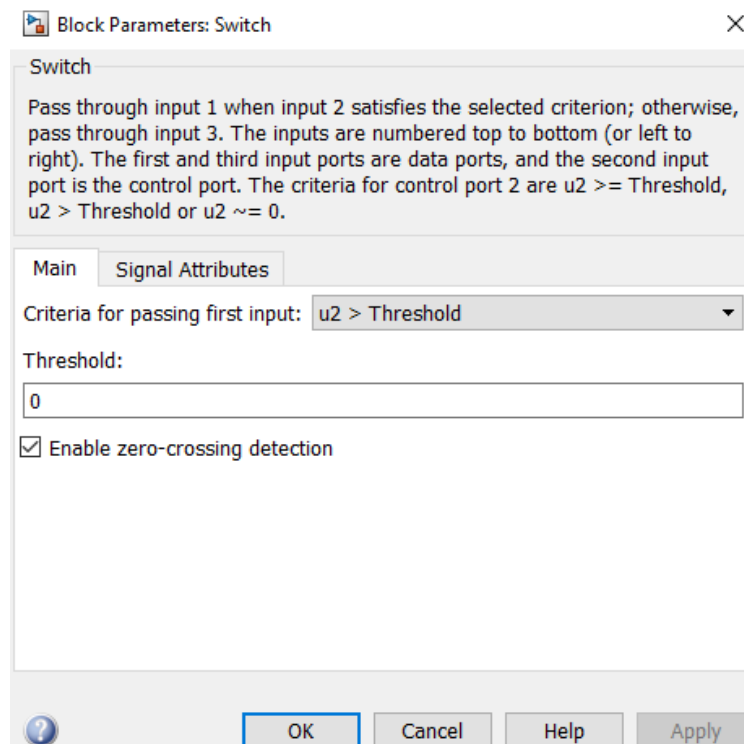
A configuração dos disjuntores da plataforma permite que um sinal externo realize a abertura do equipamento, desta forma, o sinal oriundo do relé irá realizar esta função como dito anteriormente. A configuração do disjuntor entende que o sinal 1 é ordem de fechamento e 0 é ordem de abertura, como já mencionado, o sinal que sai do relé é exatamente o oposto disso, necessitando assim de uma lógica para inverter o sinal do relé. Essa lógica de inversão é realizada tanto para a unidade instantânea quanto para a unidade temporizada pelo bloco *Comando para o trip 50/51*, internamente este bloco apresenta a configuração mostrada na figura 3.15.

Figura 3.15 – Lógica contida no bloco Comando do trip



O bloco Chave foi estabelecido com a seguinte configuração mostrada na figura 3.16:

Figura 3.16 – Parâmetros do bloco Switch



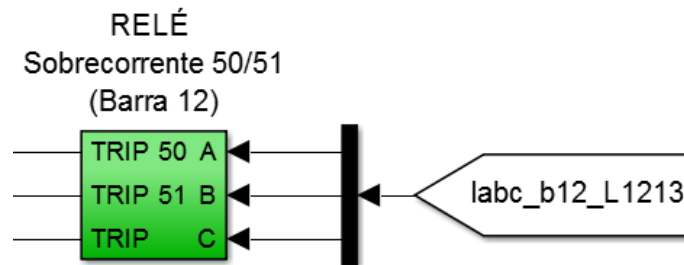
Esse bloco possui três entradas  $u(1)$ ,  $u(2)$  e  $u(3)$ , sendo  $u(2)$  o sinal de controle da chave. Quando  $u(2)$  satisfaz o critério selecionado em *Criteria for passing first input*, a saída apresenta o sinal  $u(1)$ , caso contrário, apresenta  $u(3)$ . Portanto, quando o sinal vindo do relé for maior que 0, ou seja, o valor 1 (referente a sensibilização do relé para a abertura do disjuntor), a saída da chave terá o valor 0, caso contrário a saída da chave terá o valor

constante 1, como desejado para o caso em que a saída do relé apresenta o valor 0, tendo-se assim a inversão desejada.

As saídas desses blocos são ligadas ao bloco Switch 1 que possui a mesma função e configuração do bloco Switch descrito à cima, agora com a função de selecionar o sinal para realizar a abertura do disjuntor.

A figura 3.17 apresenta a máscara criada para o Relé de Sobrecorrente Trifásico 50/51, que recebe o sinal das correntes das linhas de transmissão o bloco Iabc\_b12\_l1213 e apresentam as 3 saídas já comentadas anteriormente.

Figura 3.17 – Mascara do Relé de Sobrecorrente Trifásico



Desta forma, conclui-se toda modelização necessária para o relé de sobrecorrente digital 50/51, os resultados serão analisados no capítulo 4.

## **4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS DO MODELO DO RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE 50/51**

Neste capítulo será apresentada a rede teste utilizada para verificação do modelo do relé, bem como suas correntes de curto-circuito calculadas para cada barra do sistema, além disso, serão mostrados os parâmetros de proteção e de coordenação e os resultados obtidos após a simulação.

### **4.1. Caracterização da Rede Teste**

A topologia da rede teste foi baseada no modelo de rede apresentado por (SADAAT, 1999), com a inclusão do segmento que será protegido. A figura 4.1 apresenta o sistema de distribuição avaliado e implementado no ambiente SIMULINK<sup>®</sup>.

Trata-se de um sistema robusto com um total de 3 geradores, 3 transformadores, 13 barras e 6 cargas, além disso o sistema possui linhas de transmissão modeladas e disjuntores trifásicos localizados nas extremidades de cada linha de transmissão, os dados dessa rede estão apresentados no Apêndice 7.1.

#### **4.1.1. Cálculo das correntes de curto-circuito da Rede Teste**

O cálculo das correntes de curto-circuito da rede teste foi realizado segundo o procedimento descrito por (SADAAT, 1999). O autor realiza o cálculo das matrizes de impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, assim como, o cálculo das correntes de curto-circuito através de scripts desenvolvidos para os casos em que o sistema apresenta grandes dimensões, uma vez que o cálculo manual se tornaria exaustivo. Os valores obtidos são mostrados na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Correntes de curto-circuito

Correntes de Curto-circuito da rede teste ( <u>Ampér</u> )				
Barras	Trifásico (A)	Fase-Terra	Fase-Fase-Terra	Fase-Fase
1	19442,209	15617,722	17350,375	15974,644
2	17304,442	21013,971	20323,721	14304,239
3	11146,91	9545,781	10266,402	9329,419
4	16720,867	14965,875	15623,746	1398,07
5	11156,448	10240,549	10534,219	9338,204
6	10947,616	9357,28	10091,957	9182,584
7	12979,963	12007,589	12296,239	10865,539
8	8672,803	7099,535	7913,026	7294,060
9	5614,368	4660,066	5210,007	4807,654
10	22117,116	19403,555	20432,655	18374,204
11	15029,629	17634,758	16864,941	12528,916
12	2714,816	2166,381	2501,717	2332,041
13	1771,307	1411,122	1646,811	1539,383

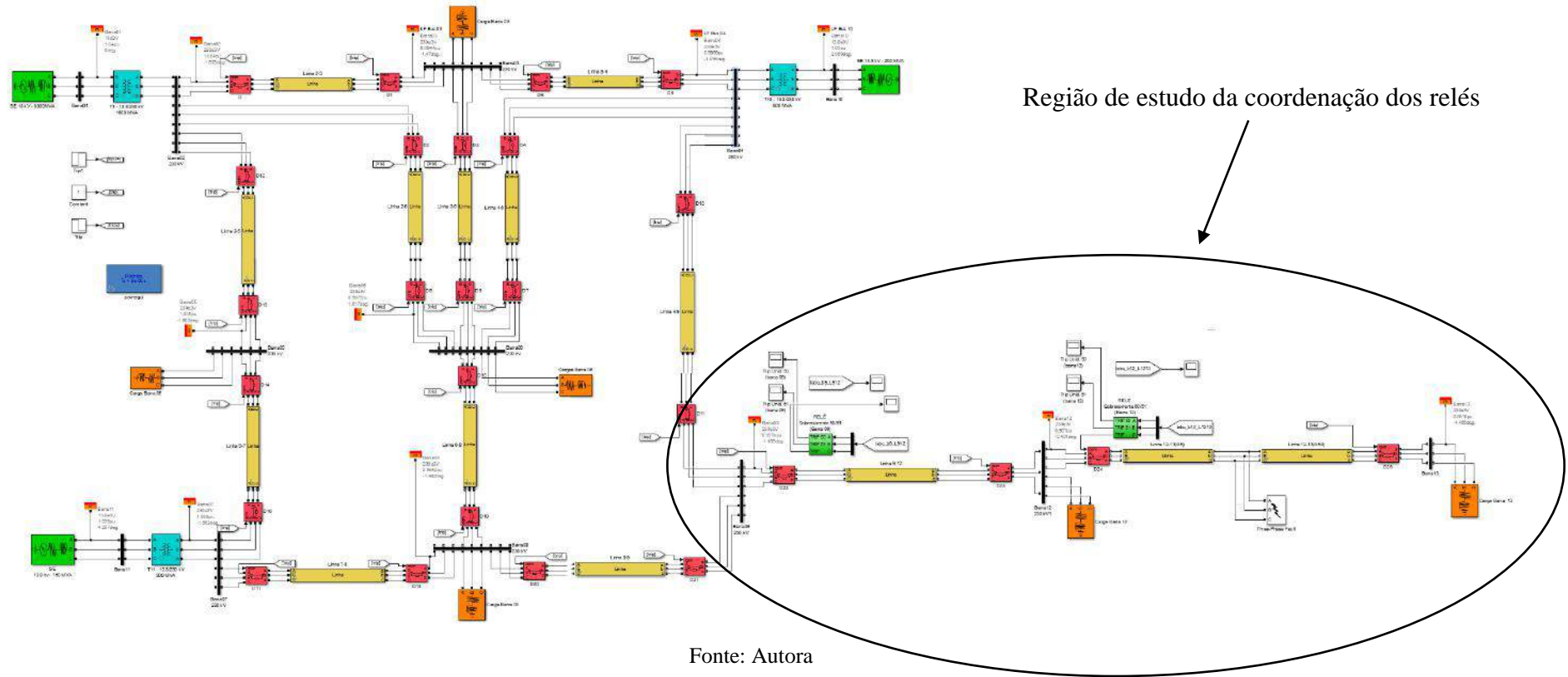
Fonte: Autora

Vale salientar que os valores foram calculados para um curto-circuito franco, ou seja, com impedância de curto nula, afim de obter os valores das correntes de curto mais severos.

#### 4.1.2. Definição dos TCs e ajustes dos Relés 50/51 para o Trecho Protegido

O trecho protegido é mostrado na figura 4.2 de forma detalhada. Pode-se observar que o curto-circuito foi inserido entre duas linhas de transmissão, uma ligada a barra 12 e a outra ligada a barra 13, o intuito desse procedimento é que seja possível realizar os ajustes da impedância e do tamanho dessas linhas de modo a obter o curto-circuito em diferentes pontos da mesma.

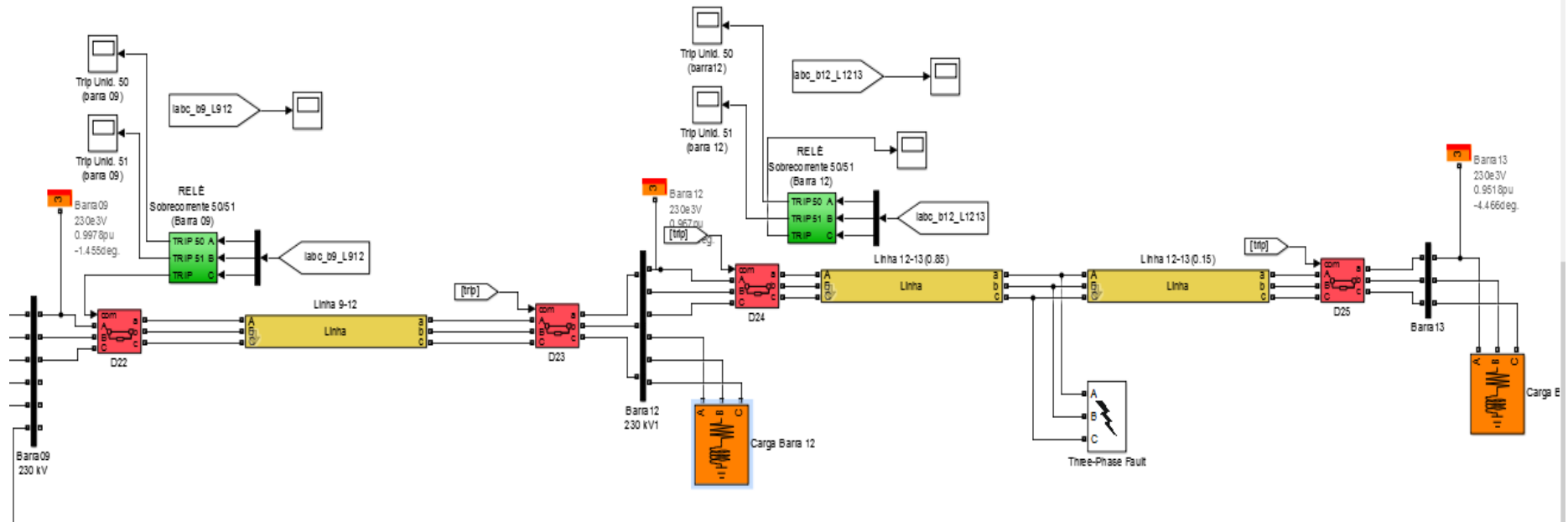
Figura 4.1 – Topologia da rede teste



Fonte: Autora



Figura 4.2 – Trecho protegido do sistema



Fonte: Autora

#### 4.1.2.1. Relação de Transformação dos TC's

Como descrito na seção 2.2.1 para definir as relações dos TCs são necessários a análise de dois critérios: o Critério de carga e o Critério de curto-circuito, a tabela 4.2 apresenta os valores obtidos para a relação de transformação dos TCs segundo estes critérios.

Tabela 4.2 – Dados utilizados para o dimensionamento do TC

<b>Barra 9</b>	
<b>Critério de Carga</b> $In = 246,7$	<b>Critério de Curto circuito</b> $In = \frac{5614,4}{20} = 280,7 A$
<b>Barra 12</b>	
<b>Critério de Carga</b> $In = 124,4$	<b>Critério de Curto circuito</b> $In = \frac{2714,8}{20} = 135,7A$

Fonte: Autora

Os valores das correntes de carga foram obtidos a partir da simulação do sistema em condições normais de operação e os valores para o critério de curto-circuito foram obtidos utilizando a equação (2.51) com os valores de corrente de curto-circuito apresentados na tabela 4.1. O maior valor encontrado entre os dois critérios para cada barra foi comparado com os parâmetros disponíveis na norma e chega-se à conclusão que:

$$RTC_9 = \frac{300}{5}$$

$$RTC_{12} = \frac{150}{5}$$

#### 4.1.2.2. Ajustes dos relés 50/51

##### 1. Relé de sobrecorrente instantâneo

Como descrito na seção 2.3.1.1, para o cálculo da corrente de ajuste do relé de sobrecorrente instantâneo é necessário conhecer o valor da corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha de transmissão protegida, utilizando a equação 2.55 tem-se:

$$I_{cc_{3\phi_{9-12}} \text{ à } 85\% do} = \frac{(5614,4) \times (2714,8)}{(0,85 \times 5614,4) + (0,15 \times 2714,8)} = 2942,77 \text{ A}$$

$$I_{cc_{3\phi_{12-13}} \text{ à } 85\%} = \frac{(2714,8) \times (1771,3)}{(0,85 \times 2714,8) + (0,15 \times 1771,3)} = 1868,7 \text{ A}$$

De posse do valor da corrente de curto-circuito a 85% da linha, calcula-se as correntes de ajuste dos relés através da equação (2.54):

$$I_{ajuste_{50,9}} \geq \frac{2942,77}{\frac{300}{5}} \geq 49,0$$

$$I_{ajuste_{50,9}} = 49,0$$

$$I_{ajuste_{50,12}} \geq \frac{1868,7}{\frac{150}{5}} \geq 62,3$$

$$I_{ajuste_{50,12}} = 62,3$$

## 2. Relé de sobrecorrente temporizado

Os valores obtidos através da equação (2.56) para as correntes de ajuste das unidades temporizadas são:

$$I_{ajuste_{51,9}} \geq \frac{1,5 \times 246,7}{\frac{300}{5}} \geq 6,16$$

$$I_{ajuste_{51,9}} = 6,16$$

$$I_{ajuste_{51,12}} \geq \frac{1,5 \times 124,4}{\frac{150}{5}} \geq 6,22$$

$$I_{ajuste_{51,12}} = 6,22$$

## 4.2. Procedimento de Coordenação dos Relé de sobrecorrente 51

A coordenação é feita seguindo o passo-a-passo descrito na seção 2.3.2:

1. De posse das correntes de ajuste de atuação para as unidades temporizadas calculadas no item anterior:

$$I_{ajuste_{51,9}} = 6,16$$

$$I_{ajuste_{51,12}} = 6,22$$

2. Calcula-se o múltiplo das barras utilizando a equação 2.60:

$$M_9 = \frac{Icc_{3\phi 12-13} a 85\%}{RTC.Iajuste_{51,9}} = \frac{1868,7}{\frac{300}{5} \times 6,16} = 5$$

$$M_{12} = \frac{Icc_{3\phi 12-13} a 85\%}{RTC.Iajuste_{51,12}} = \frac{1868,7}{\frac{150}{5} \times 6,22} = 10$$

3. Com a equação (2.61) determina-se o tempo de atuação para o relé da barra 12 com base na curva adotada para a coordenação que neste caso foi o Dial 0,1:

$$T_{12} = \frac{0,1 \times 0,14}{(10)^{0,02} - 1} + (0 \times 0,1)$$

$$T_{12} = 0,297s$$

4. Com o tempo de atuação determinado para o relé da barra 12 e  $\Delta_t = 0,5$ , o tempo estimado para o relé da barra 9 é definido pela equação 2.52.

$$T_9 \geq 0,297 + 0,5 = 0,797s$$

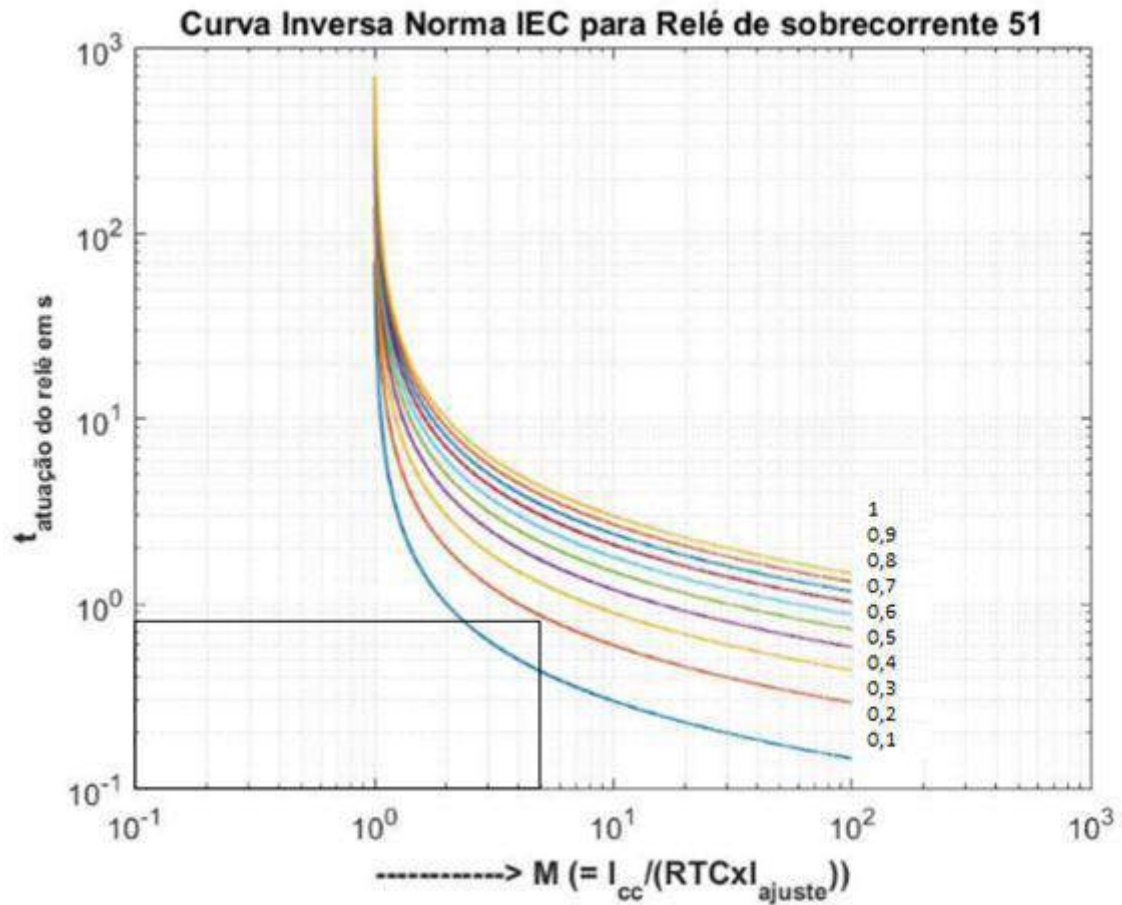
5. Sendo x o valor do múltiplo e y o tempo de atuação do relé da barra 9, tem-se: x = 5 e y = 0.797. A interseção desses pontos ocorre aproximadamente na curva referente ao Dial 0.2 como pode ser observado na figura 4.3, este será o Dial adotado para este relé. Adotando este Dial, o novo tempo para o relé da barra 9 é dado por:

$$T_9 = \frac{0,2 \times 0,14}{(5)^{0,02} - 1} + (0 \times 0,1)$$

$$T_9 = 0,8569 s$$

Os valores foram inseridos em seus respectivos blocos e a avaliação do desempenho do relé para a coordenação será apresentada no próximo tópico

Figura 4.3 – Análise do gráfico para determinar o Dial



Fonte: Autora

### 4.3. Avaliação do desempenho do Relé Digital 50/51 para Curtos-circuitos

A avaliação do desempenho do relé de sobrecorrente 50/51 será realizada a partir de 8 situações distintas, serão analisados 4 tipos de curto-circuito:

- Curto trifásico a 85% da linha de transmissão 12-13
- Curto trifásico a 50% da linha de transmissão 12-13
- Curto monofásico a 85% da linha de transmissão 12-13
- Curto monofásico a 50% da linha de transmissão 12-13

Dentro desses 4 tipos de curto-circuito serão estudadas as situações em que o relé da barra 12 atua corretamente e as situações em que ocorre uma falha neste equipamento de modo que o sinal do relé não chega ao disjuntor. As definições dos parâmetros das linhas de transmissão e para o bloco *Three-Phase Fault* serão detalhadas para cada caso no Apêndice

7.2, entretanto, vale salientar que o curto-circuito irá ocorrer em 0,2 segundos para todos os casos, este tempo será decrementado para todos os valores de tempo encontrados nas simulações.

Os cálculos realizados até aqui tiveram como princípio a coordenação apresentada na figura 2.18, em que a unidade instantânea deve atuar para valores de corrente maiores do que a corrente de curto-circuito trifásica a 85% da linha protegida. O valor dessa corrente para a linha de transmissão 12-13 foi calculado na seção 4.1.2.2 sendo igual a 1868,7 A. Portanto, para correntes que apresentem valores menores do que este, a unidade instantânea não deve operar.

Outro fator importante é que, para a situação em que o relé da barra 12 não apresenta falha de operação, o relé da barra 9 não deve operar, afim de manter o princípio da seletividade e manter o menor número de cargas sem o fornecimento de energia elétrica.

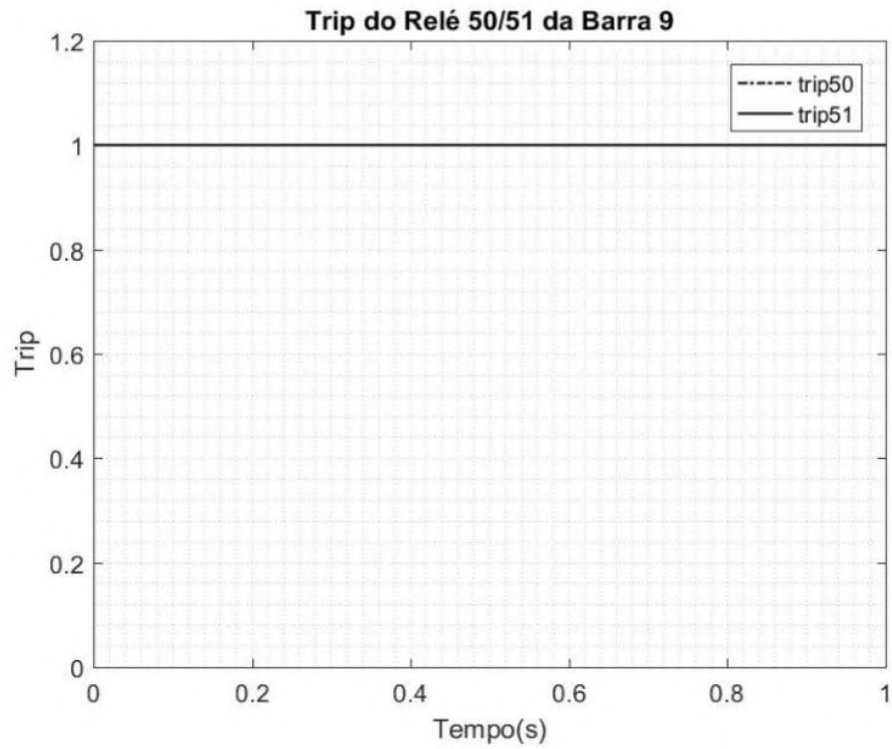
#### **4.3.1. Curto-Circuito Trifásico Franco a 85% da Linha**

- **Operação do relé 50/51 da barra 12 sem ocorrência de falha**

Inicialmente será analisado a operação do relé da barra a montante, ou seja, a barra 9, a figura 4.4 apresenta os sinais da unidade temporizada (trip 51) e da unidade instantânea (trip 50) para esse relé. Verifica-se que o equipamento não opera, obedecendo assim o princípio da seletividade. A forma de ondas das correntes da LT 9-12 é apresentada na figura 4.5, pode-se perceber que a linha 9-12 sente o curto, entretanto, após um determinado tempo, o curto é retirado e a corrente que alimenta a carga localizada na barra 12 (*bloco: Carga Barra 12*) continua sendo fornecida. Dessa forma, verifica-se que este relé opera de acordo com o esperado.

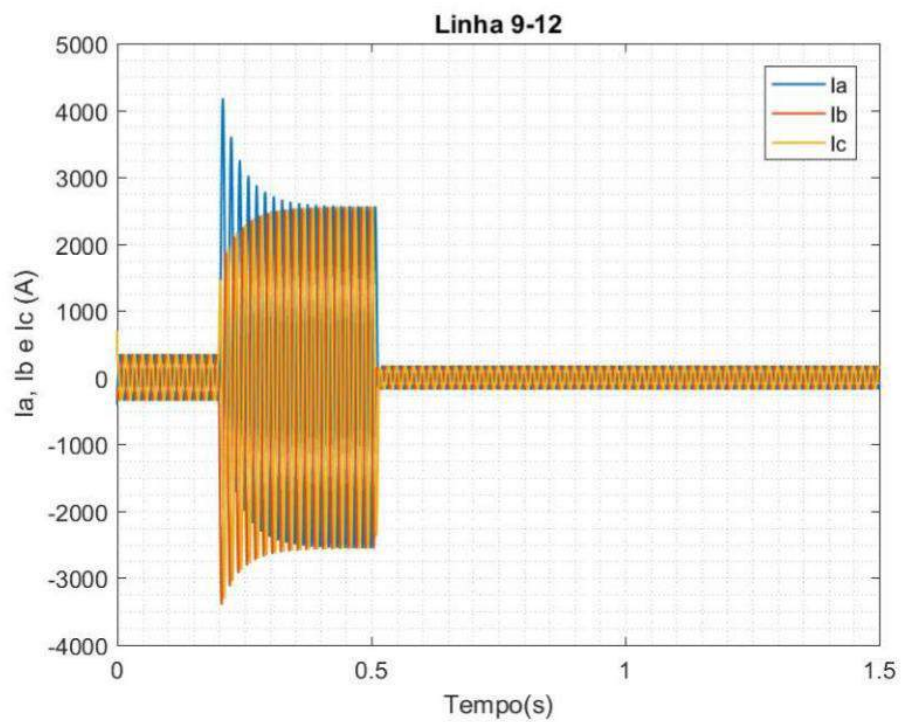
Analisando o relé de sobrecorrente 50/51 localizado na barra 12 através da figura 4.6, verifica-se que a unidade instantânea não é sensibilizada, e a unidade temporizada opera com o tempo de 0,5083. A forma de onda das correntes da LT 12-13 é mostrada na figura 4.7, nota-se que a corrente é completamente interrompida a medida que o relé opera.

Figura 4.4 – Trip do relé 50/51 da barra 9



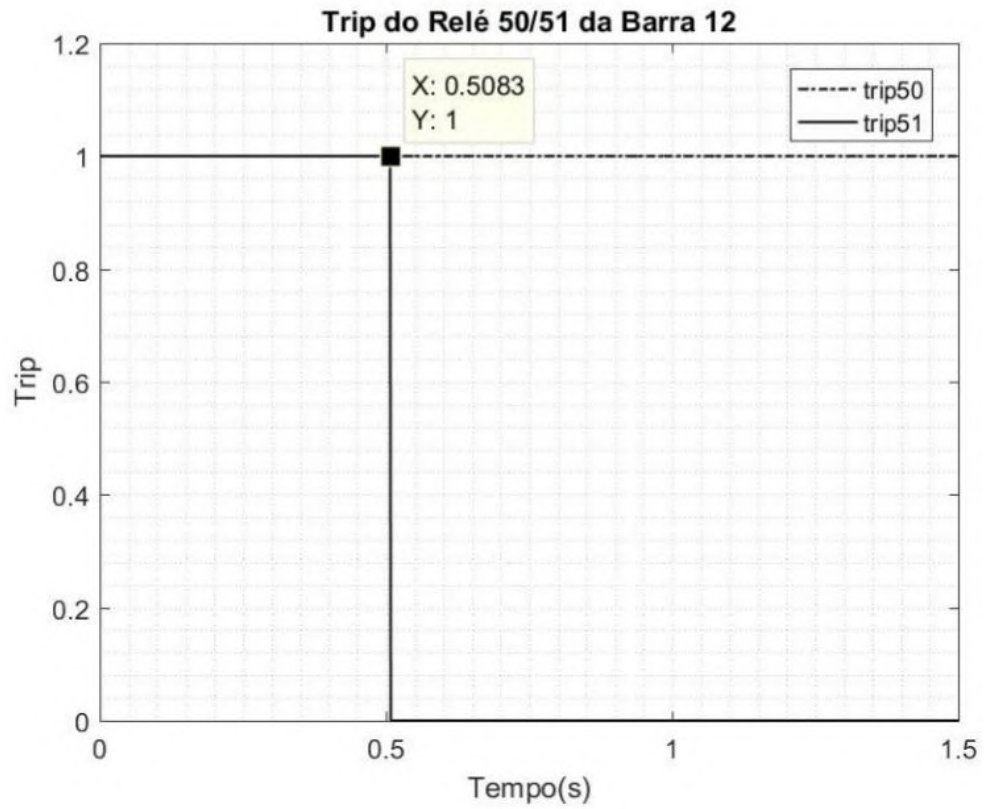
Fonte: Autora

Figura 4.5 – Correntes na linha de transmissão 9-12



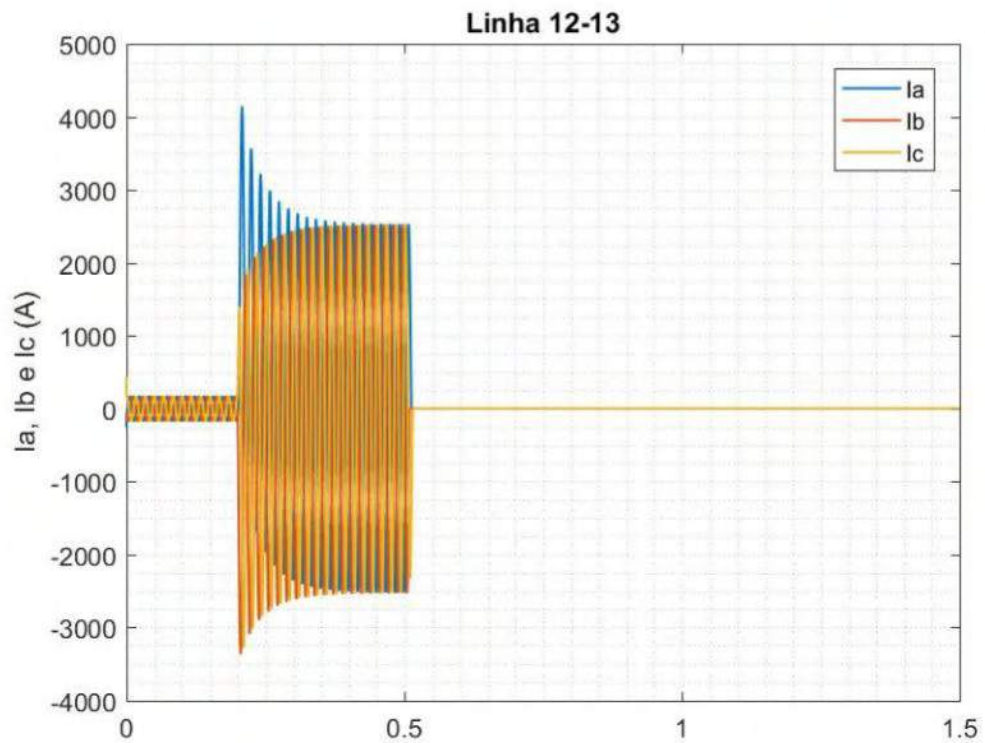
Fonte: Autora

Figura 4.6 – Trip do relé 50/51 da barra 12



Fonte: Autora

Figura 4.7 – Correntes na linha de transmissão 12-13



Fonte: Autora



- Análise do tempo apresentado pela unidade temporizada

O tempo apresentado pelo relé da barra 12 foi de 0,5083s, subtraindo o ponto em que o curto-circuito foi inserido ao sistema (0,2s) o tempo de atuação do relé simulado é de  $T_m=0,308s$ .

Comparado com o tempo calculado anteriormente de 0,297, tem-se uma diferença de 0,011s. Esta diferença é causada pelo bloco Fourier, uma vez que, como dito anteriormente, este bloco utiliza um período (1/60s) para estimar o fasor da corrente. Por conseguinte, neste caso, a precisão do modelo implementado pode ser considerada satisfatória para o objetivo da coordenação.

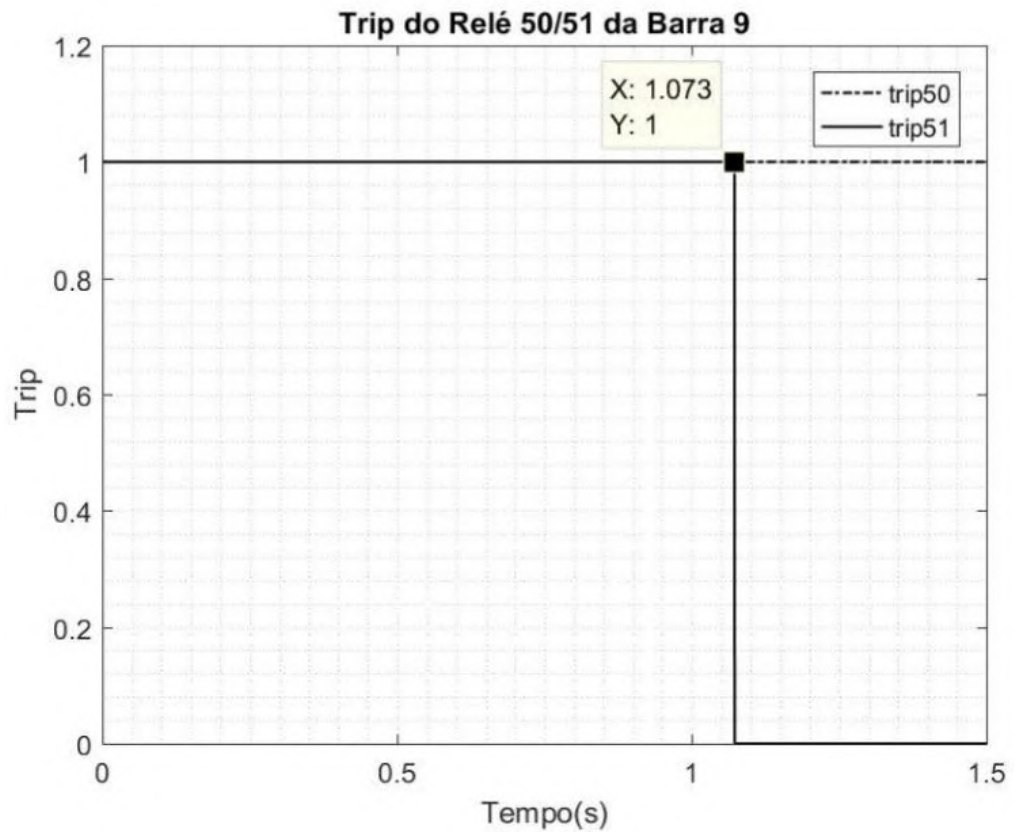
- **Ocorrência de falha na operação do relé 50/51 da barra 12**

Para este caso, o relé da barra a montante deve operar com o tempo estipulado em sua coordenação, em hipótese alguma a unidade instantânea deve operar nessa região. A figura 4.8 apresenta o comportamento desse relé, observa-se que a unidade instantânea apresenta o resultado adequando, não operando para esta situação.

O tempo apresentado pelo relé da barra 9 foi de 1,073, subtraindo o ponto em que o curto-circuito foi inserido ao sistema (0,2s) o tempo de atuação do relé simulado é de  $T_m=0,873s$ .

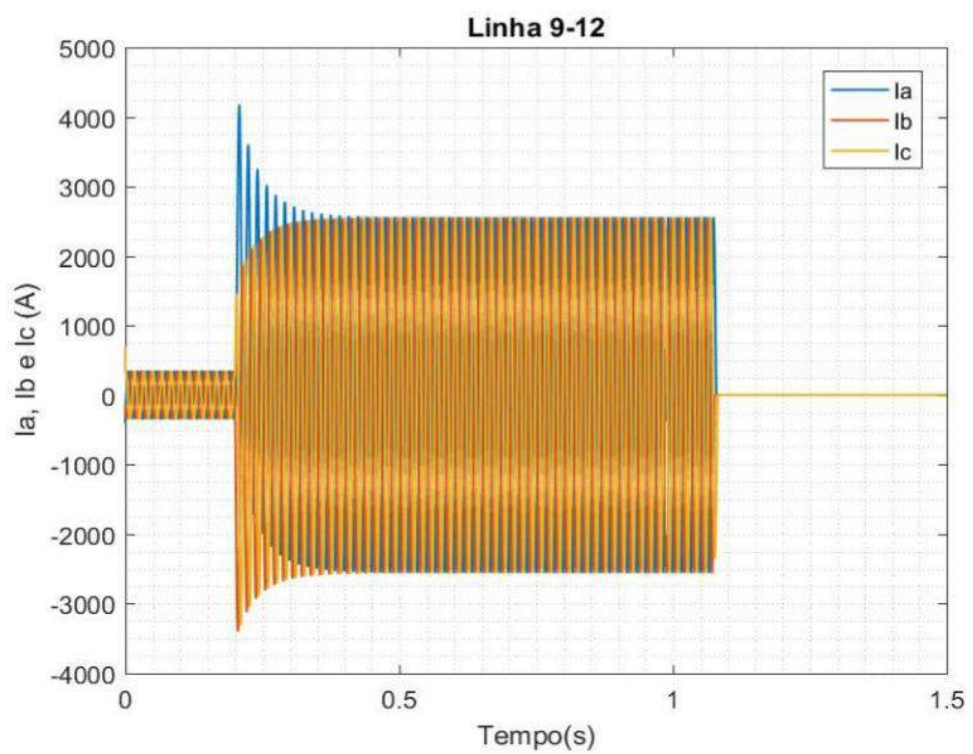
O tempo calculado anteriormente foi 0,8569s comparando esses valores a diferença é de 0,017 este valor é considerado satisfatório. As formas de onda das correntes das LT 9-12 e 12-13 são apresentadas nas figuras 4.9 e 4.10 respectivamente.

Figura 4.8 – Trip do relé 50/51 da barra 9



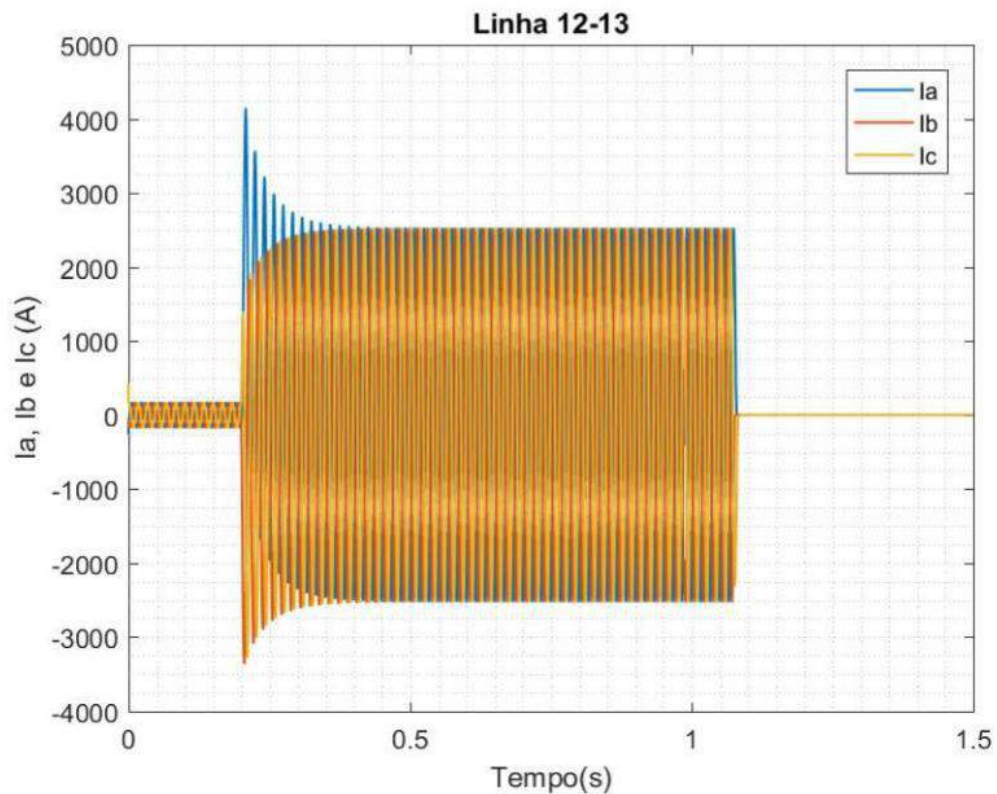
Fonte: Autora

Figura 4.9 – Corrente da linha de transmissão 9-12



Fonte: Autora

Figura 4.10 – Corrente da linha de transmissão 12-13



Fonte: Autora

Nota-se que as correntes apresentam o mesmo formato, com a diferença apenas nas amplitudes, mas sendo extintas completamente pela operação do relé.

### 4.3.2. Curto-Circuito Trifásico Franco a 50% da Linha

- **Operação do relé 50/51 da barra 12 sem ocorrência de falha**

Este é o caso em que a corrente de curto-circuito aciona a unidade instantânea do relé de modo que o circuito é retirado do sistema sem acréscimos de tempo. Isto ocorre, pois, a corrente de curto-circuito trifásico a 50% da LT é maior do que a corrente limite de 1868,7, como mostra o cálculo:

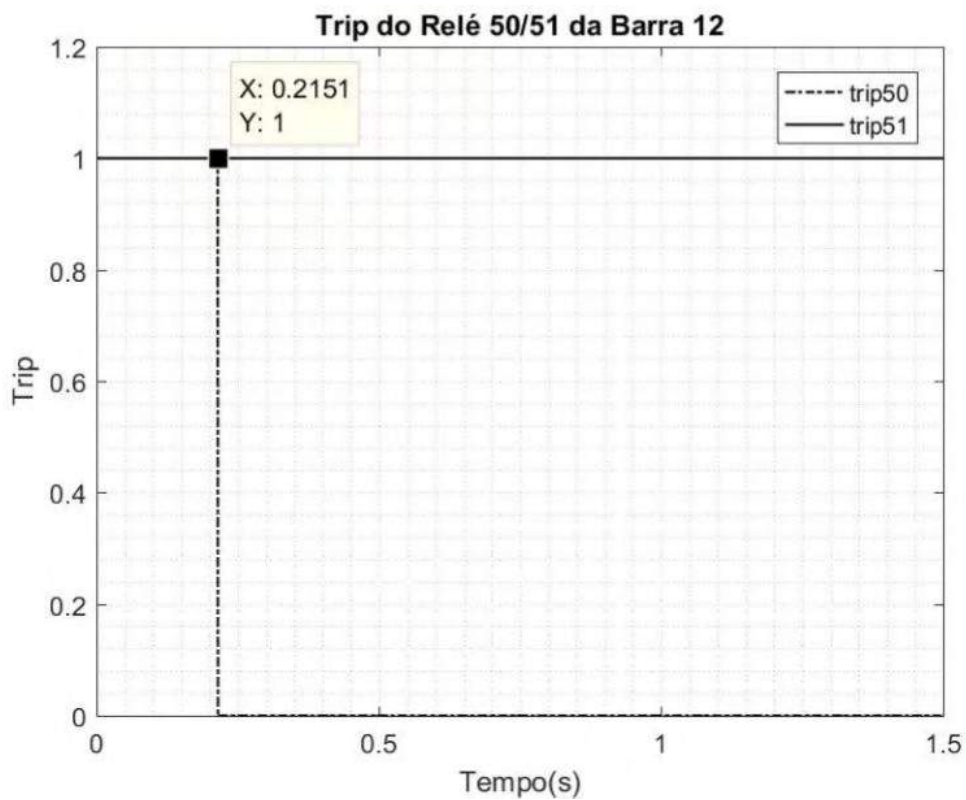
$$I_{cc_{3\phi 12,13}} \text{ à } 50\% = \frac{(2714,8) \times (1771,3)}{(0,5 \times 2714,8) + (0,5 \times 1771,3)} = 2143,8 \text{ A}$$

- Análise do tempo apresentado pela unidade temporizada

O tempo apresentado pelo relé da barra 12 mostrado na figura 4.11 foi de 0,2151s, subtraindo o ponto em que o curto-circuito foi inserido ao sistema (0,2s) o tempo de atuação do relé simulado é de  $T_m=0,0151s$  esta diferença é causada pelo bloco Fourier, uma vez que, como dito anteriormente, este bloco utiliza um período (1/60s) para estimar o fasor da corrente. Por conseguinte, neste caso, a precisão do modelo implementado pode ser considerada satisfatória.

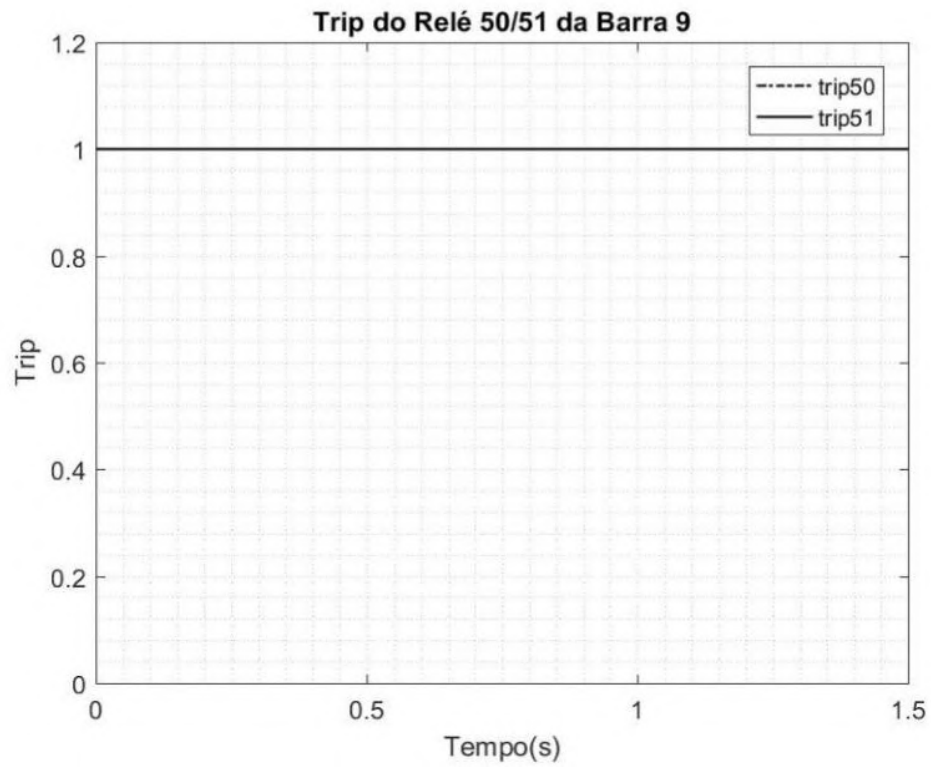
A operação do relé da barra 9 é mostrado na figura 4.12, nota-se que o relé não atua, sendo este o comportamento correto, respeitando o princípio da seletividade.

Figura 4.11 – Trip do relé da barra 12



Fonte: Autora

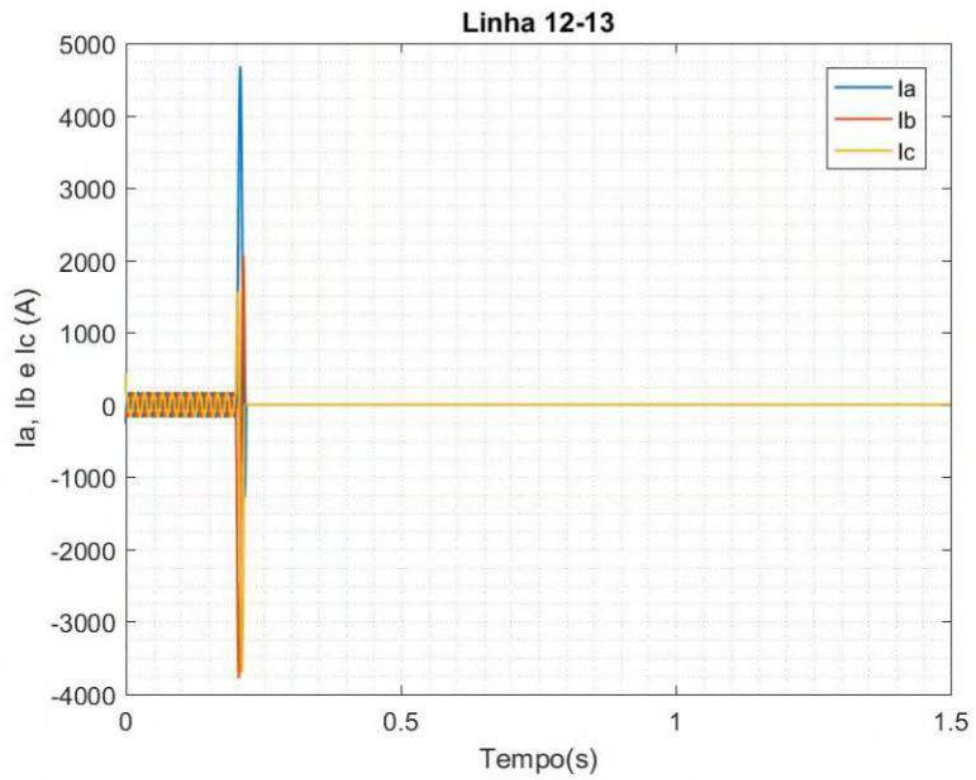
Figura 4.12 – Trip relé da barra 9



Fonte: Autora

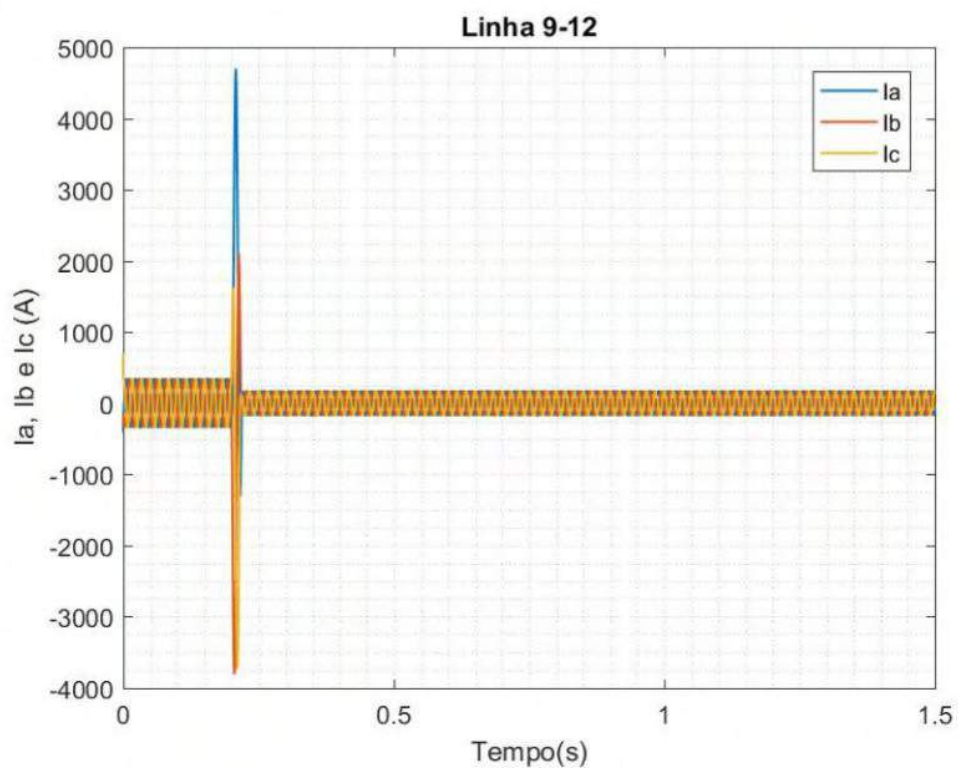
As figuras 4.13 e 4.14 apresentam as formas de ondas das correntes nas linhas de transmissão 12-13 e 9-12, respectivamente. Nota-se que a corrente na linha 12-13 é completamente extinta a medida que o relé atua, e que a corrente da linha 9-12 sente o curto, mas, à medida que o relé da barra 9 atua retirando o curto do sistema, a corrente passa a ser apenas para suprir a carga da barra 12, obedecendo o critério de seletividade.

Figura 4.13 – Corrente na linha de transmissão 12-13



Fonte: Autora

Figura 4.14 – Corrente na linha de transmissão 9-12

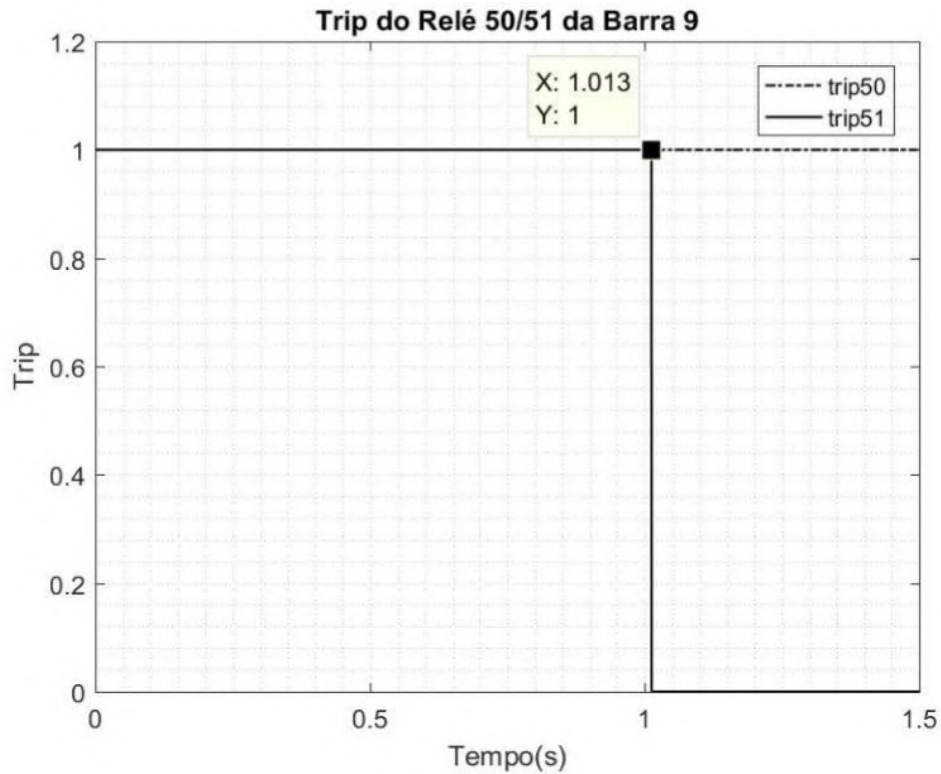


Fonte: Autora

- **Ocorrência de falha na operação do relé 50/51 da barra 12**

No caso de falha do relé presente na barra 12, o relé da barra 9 apresenta o comportamento mostrado na figura 4.15.

Figura 4.15 – Trip do relé da barra 9

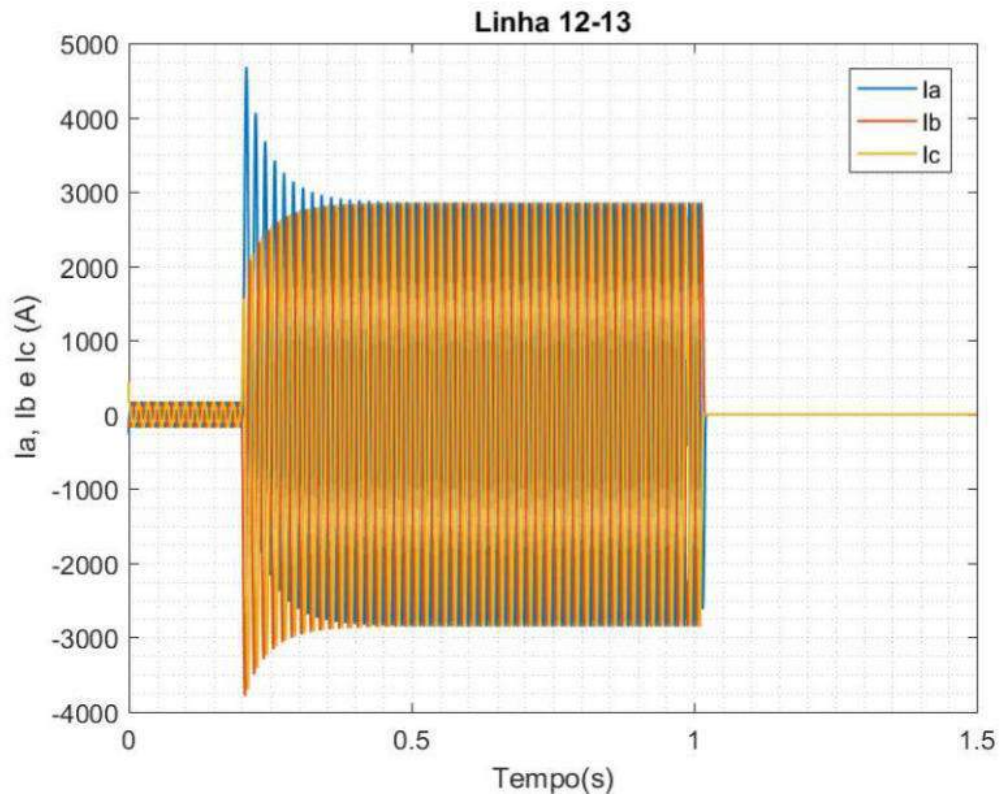


Fonte: Autora

O tempo apresentado pelo relé da barra 9 foi de 1,013s, subtraindo o ponto em que o curto-circuito foi inserido ao sistema (0,2s) o tempo de atuação do relé simulado é de  $T_m=0,796s$ .

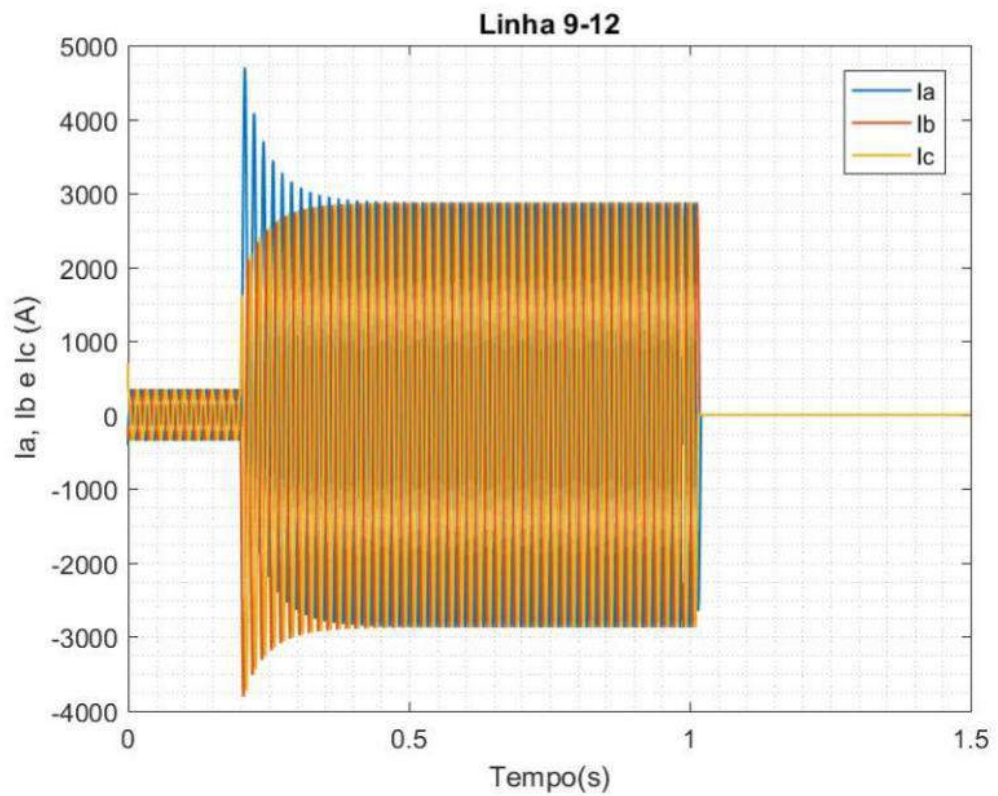
O tempo calculado foi de 0,77s, comparando esses valores a diferença é de 0,026 este valor é considerado satisfatório. As formas de onda das correntes das LT 12-13 e 9-12 são apresentadas nas figuras 4.16 e 4.17 respectivamente.

Figura 4.16 – Corrente da linha 12-13



Fonte: Autora

Figura 4.17 – Corrente da linha de transmissão 9-12



Fonte: Autora



Nota-se que as correntes são interrompidas à medida que o relé opera.

### 4.3.3. Curto-Circuito Monofásico Franco a 85% da Linha

Desde que os valores utilizados na equação 2.55 sejam os valores de corrente de curto-circuito monofásico apresentados na tabela 4.1, a equação também é válida para calcular a corrente de curto-circuito monofásica a 85% da linha de transmissão. Desta forma pode-se escrever:

$$I_{cc_{1\phi_{12-13}} \text{ a } 85\%} = \frac{(2166,381) \times (1411,122)}{(0,85 \times 2166,381) + (0,15 \times 1411,122)} = 1489,0 \text{ A}$$

A unidade instantânea não deve atuar para curtos-circuitos com valores menores do que a corrente de curto-circuito trifásica a 85% da linha de transmissão, já para a unidade temporizada deve-se calcular o múltiplo para determinar o tempo de atuação do mesmo, o múltiplo é:

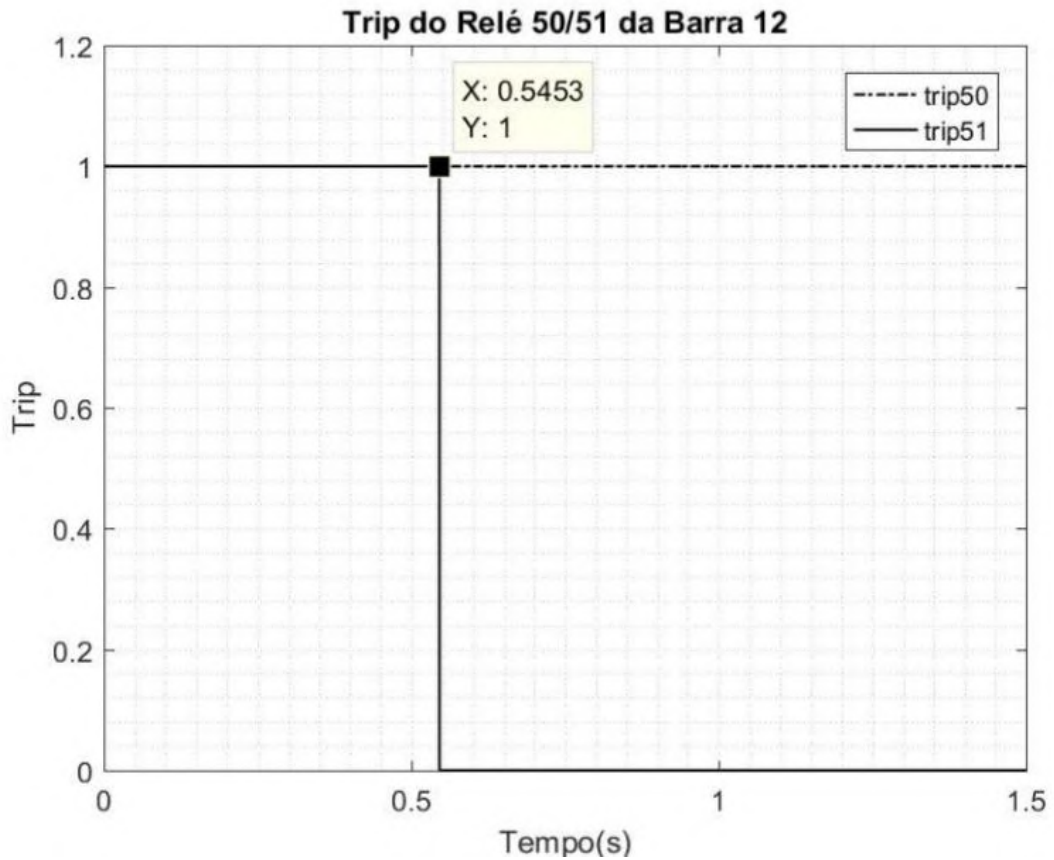
$$M_{12} = \frac{I_{cc_{1\phi_{12-13}} \text{ a } 85\%}}{RTC \cdot I_{ajuste_{51_{12}}}} = \frac{1489,0}{\frac{150}{5} \times 6,22} = 7,97$$

O tempo deste relé será:

$$Tm_{12} = \frac{0,1 \times 0,14}{(7,97)^{0,02} - 1} = 0,33$$

A figura 4.18 apresenta o comportamento do relé da barra 12:

Figura 4.18 – Trip do relé 50/51 da barra 12



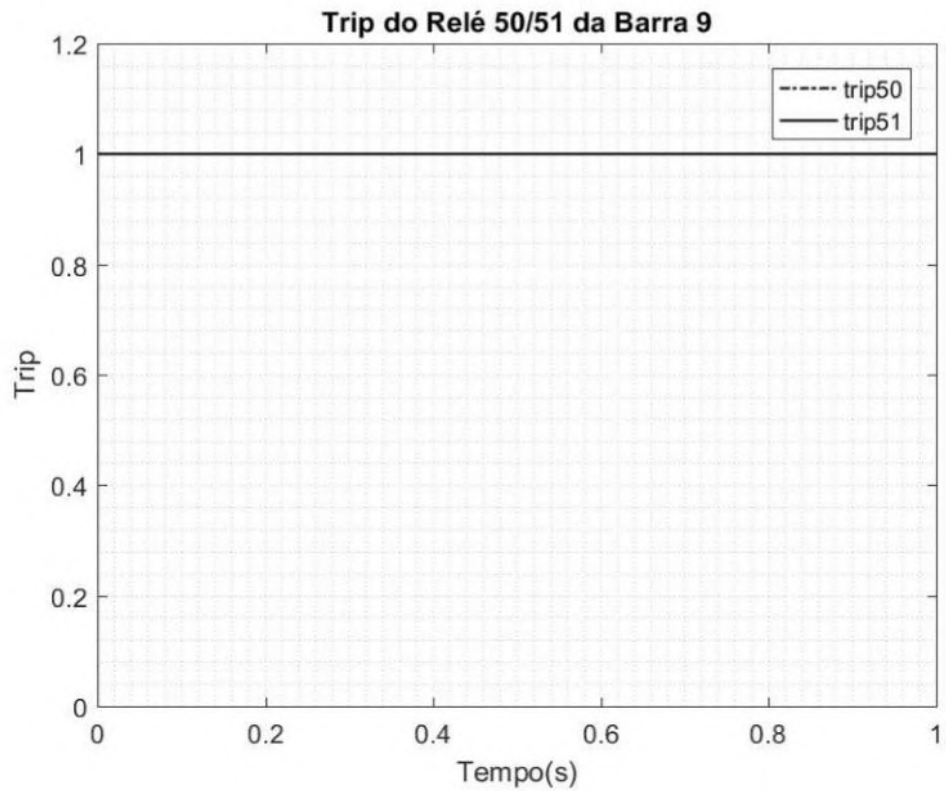
Fonte: Autora

O tempo apresentado pelo relé da barra 12 foi de 0,5453, subtraindo o ponto em que o curto foi de fato inserido ao sistema (0,2s) o tempo de atuação do relé simulado é de:

$$Tm_{12} = 0,5453 - 0,2 = 0,3453s$$

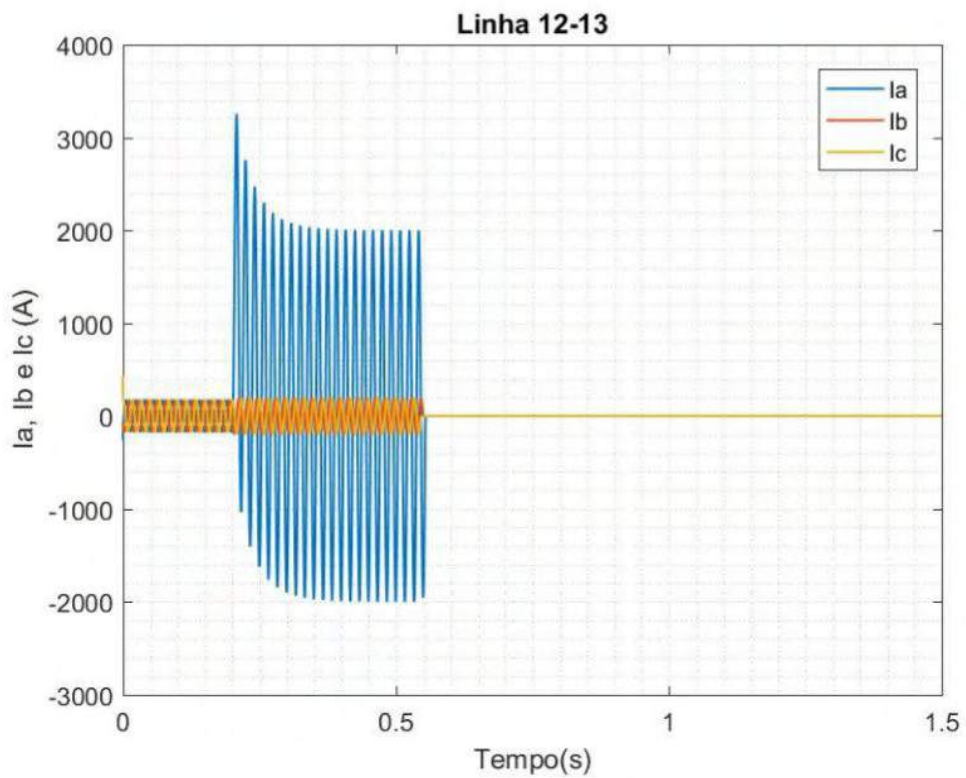
A precisão do modelo é considerada satisfatória, observa-se também que a unidade instantânea apresentando o comportamento esperado. O relé da barra 9 não atua como mostra a figura 4.19, sendo este o comportamento adequado. A figura 4.20 apresenta a corrente na LT 12-13, pode-se notar que a corrente é completamente extinta a medida que o relé atua, já a figura 4.21 apresenta a corrente na LT 9-12, nota-se que, após a atuação do relé da barra 12, a corrente que circula através da linha 9-12 continua a ser fornecida a fim de alimentar a carga ligada a barra 12, satisfazendo o critério de seletividade.

Figura 4.19 – Trip do relé 50/51 da barra 9



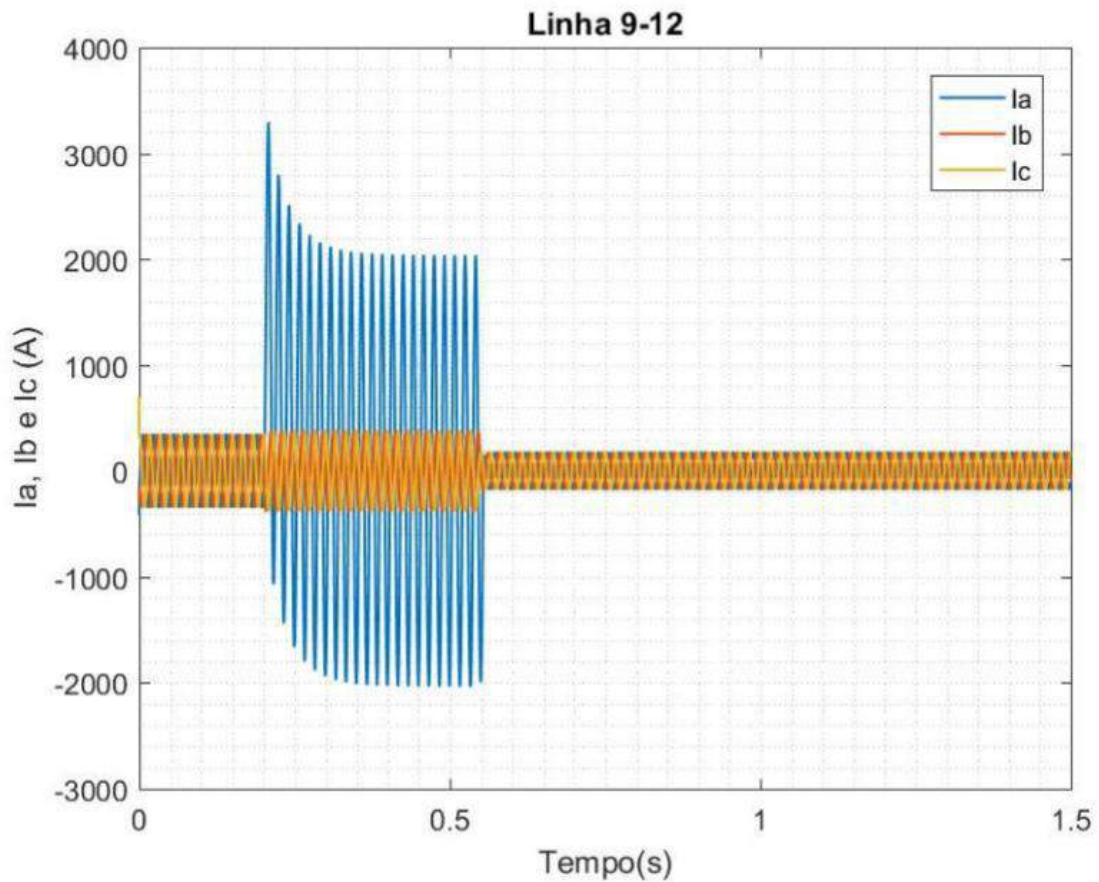
Fonte: Autora

Figura 4.20 – Correntes na linha de transmissão 12-13



Fonte: Autora

Figura 4.21 – Correntes na linha de transmissão 9-12



Fonte: Autora

Supondo o caso em que o relé da barra 12 falhe, o tempo aproximado é calculado através do múltiplo:

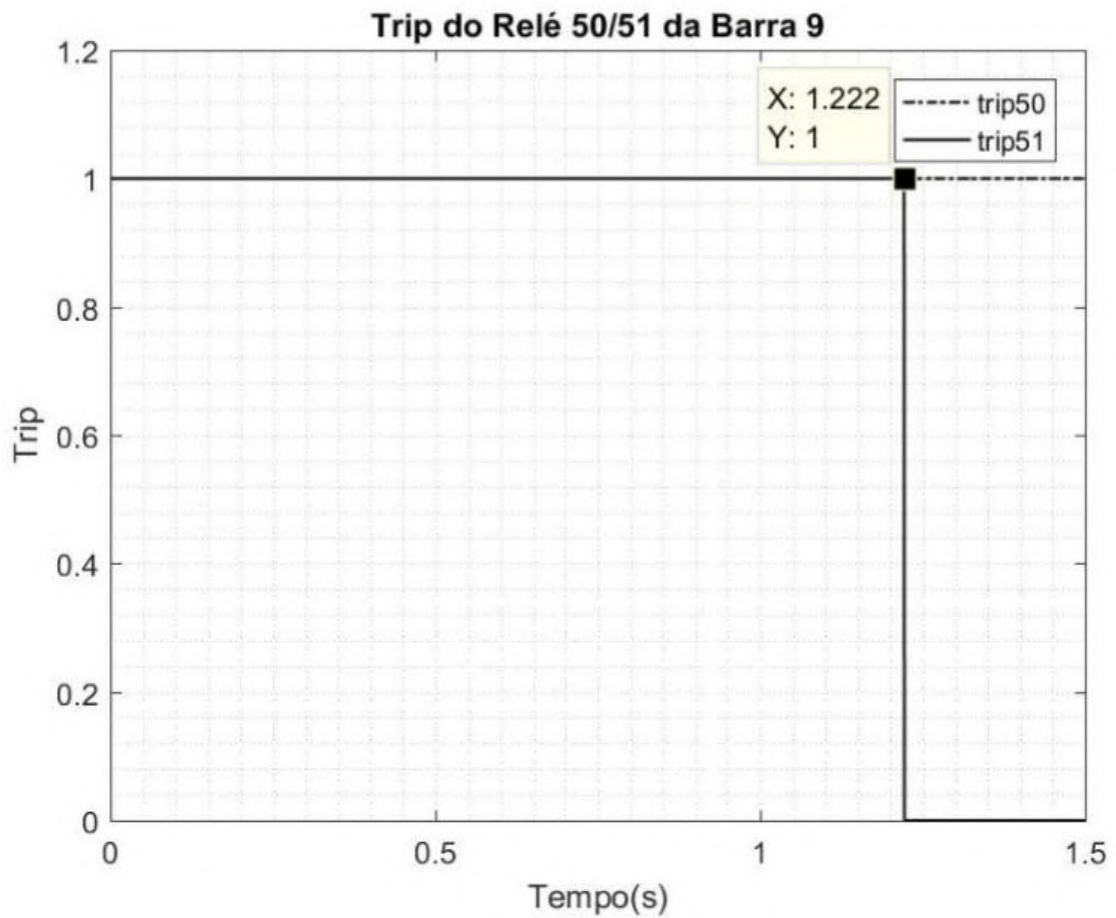
$$M_9 = \frac{I_{cc1\emptyset 12-13} a 85\%}{RTC_9 \cdot I_{ajuste_{51,9}}} = \frac{1489,0}{\frac{300}{5} \times 6,16} = 4$$

O tempo deste relé é:

$$Tm_9 = \frac{0,2 \times 0,14}{(4)^{0,02} - 1} = 0,99$$

A figura 4.22 apresenta o trip do relé da barra 9:

Figura 4.22 – Trip do relé 50/51 da barra 9



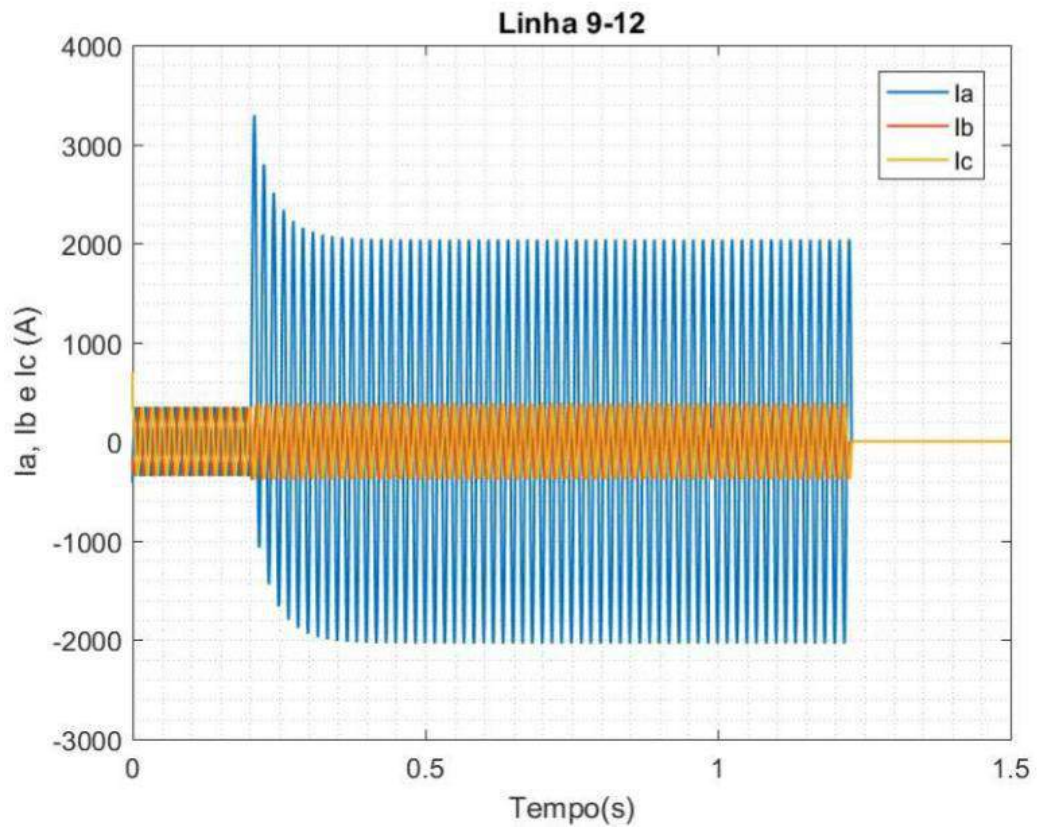
Fonte: Autora

Nota-se que a corrente de curto sensibiliza apenas a unidade temporizada. O tempo de atuação segundo a simulação foi de 1,222s. Subtraindo o tempo de ocorrência do curto, tem-se:

$$Tm_9 = 1,222 - 0,2 = 1,022s$$

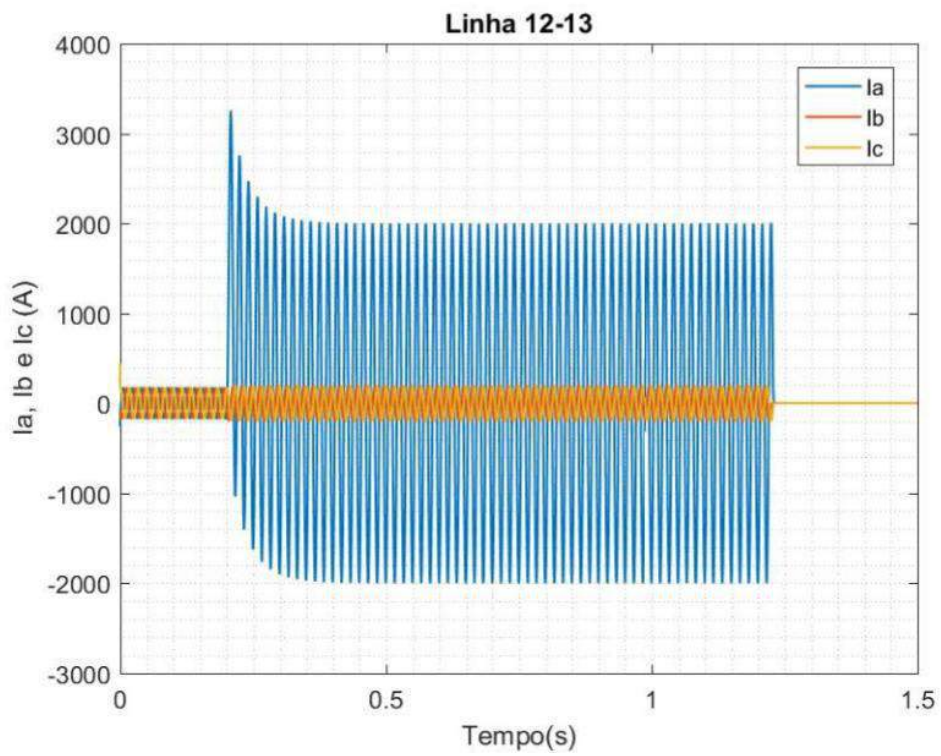
A precisão é considerada satisfatória. As correntes de operação para as linhas de transmissão do trecho são apresentadas nas figuras 4.23 e 4.24.

Figura 4.23 – Corrente da linha de transmissão 9-12



Fonte: Autora

Figura 4.24 – Corrente da linha de transmissão 12-13



Fonte: Autora

#### 4.3.4. Curto-Circuito Monofásico Franco a 50% da Linha

A corrente monofásica a 50% da LT é:

$$I_{cc_{1\phi_{12-13}} \text{ à } 50\%} = \frac{(2166,381) \times (1411,122)}{(0,50 \times 2166,381) + (0,50 \times 1411,122)} = 1709,0A$$

Esta corrente não é suficiente para ativar a unidade instantânea do relé de sobrecorrente da barra 12, uma vez que o menor valor de atuação desta unidade é a corrente de curto-circuito trifásico a 85% que é 1868,7. E para a unidade temporizada o tempo de atuação é calculado através do múltiplo como segue:

$$M_{12} = \frac{I_{cc_{1\phi_{12-13}} \text{ a } 50\%}}{RTC_{12} \cdot I_{ajuste_{51-12}}} = \frac{1709,0}{\frac{150}{5} \times 6,2} = 9,18$$

O tempo deste relé é:

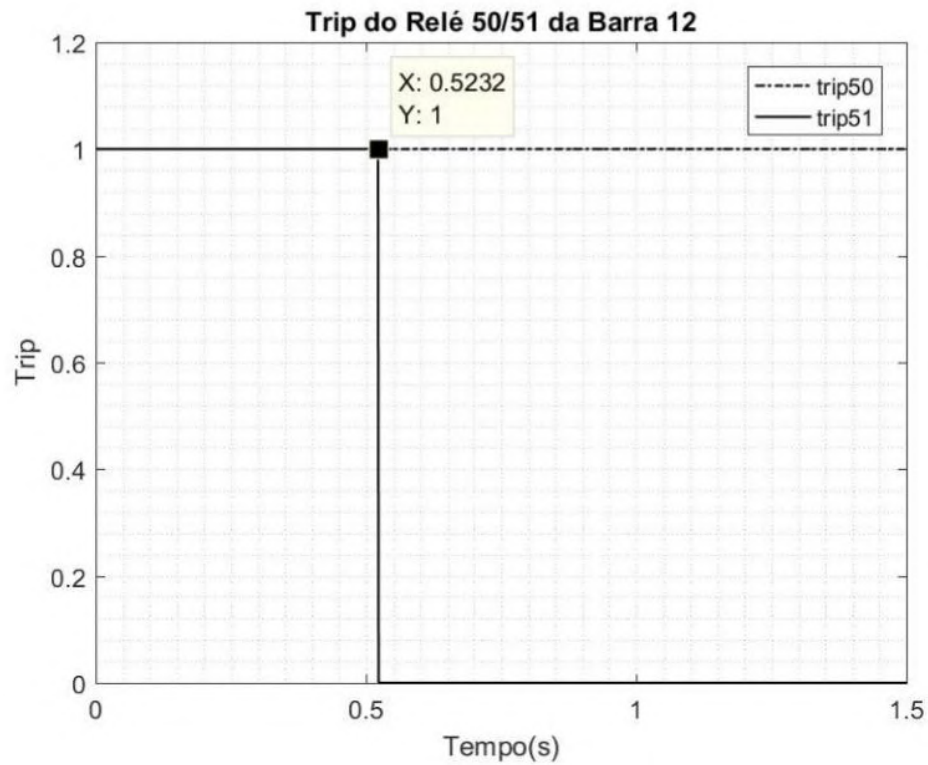
$$Tm_{12} = \frac{0,1 \times 0,14}{(9,18)^{0,02} - 1} = 0,308s$$

O tempo apresentado pelo relé da barra 12 é apresentado na figura 4.26 e mostra que sua unidade temporizada atua com o tempo de 0,5232, subtraindo o ponto em que o curto foi de fato inserido ao sistema (0,2s) o tempo de atuação do relé simulado é de:

$$Tm_{12} = 0,5232 - 0,2 = 0,3232s$$

Apresentando assim um tempo aceitável.

Figura 4.25 – Trip da barra 12

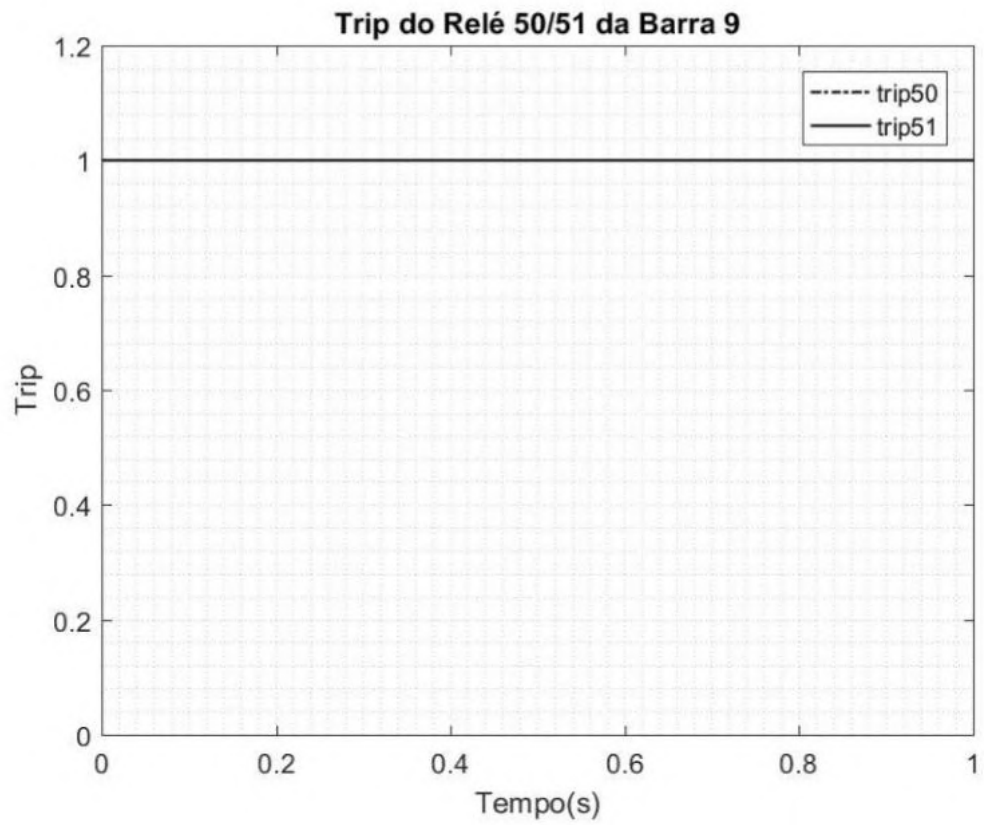


Fonte: Autora

O relé da barra 9 apresenta o comportamento adequado, não atuando, a figura 4.26 mostra seu desempenho. A figura 4.27 apresenta a corrente na LT 12-13, pode-se notar que a corrente é completamente extinta a medida que o relé atua, já a figura 4.28 apresenta a corrente na LT 9-12, nota-se que, após a atuação do relé da barra 12, a corrente que circula através da linha 9-12 continua a ser fornecida afim de alimentar a carga ligada a barra 12, satisfazendo o critério de seletividade.

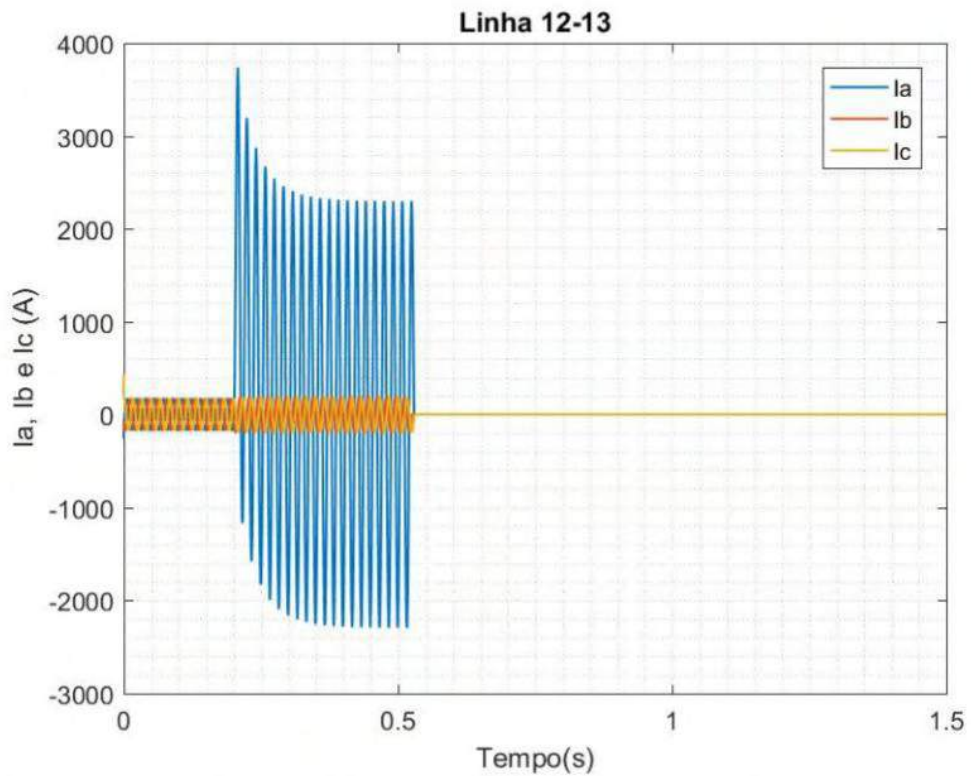


Figura 4.26 – Trip do relé 50/51 da barra 9



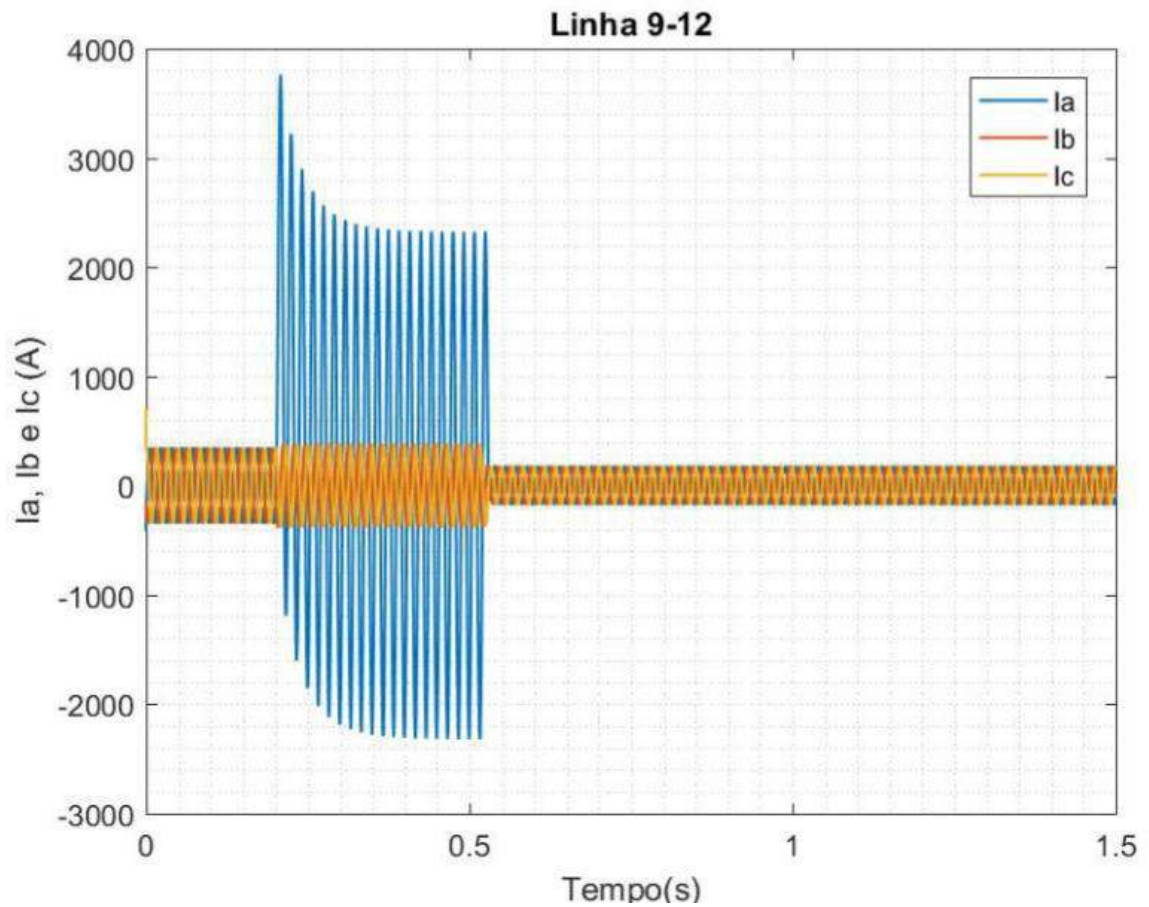
Fonte: Autora

Figura 4.27 – Corrente na linha de transmissão 12-13



Fonte: Autora

Figura 4.28 – Corrente na linha de transmissão 9-12



Fonte: Autora

Supondo o caso em que o relé da barra 12 falhe, a corrente não é suficiente para ativar a unidade instantânea do relé de sobrecorrente da barra 9, uma vez que o menor valor de atuação é 1868,7. E para a unidade instantânea o tempo de atuação é calculado através do múltiplo como segue:

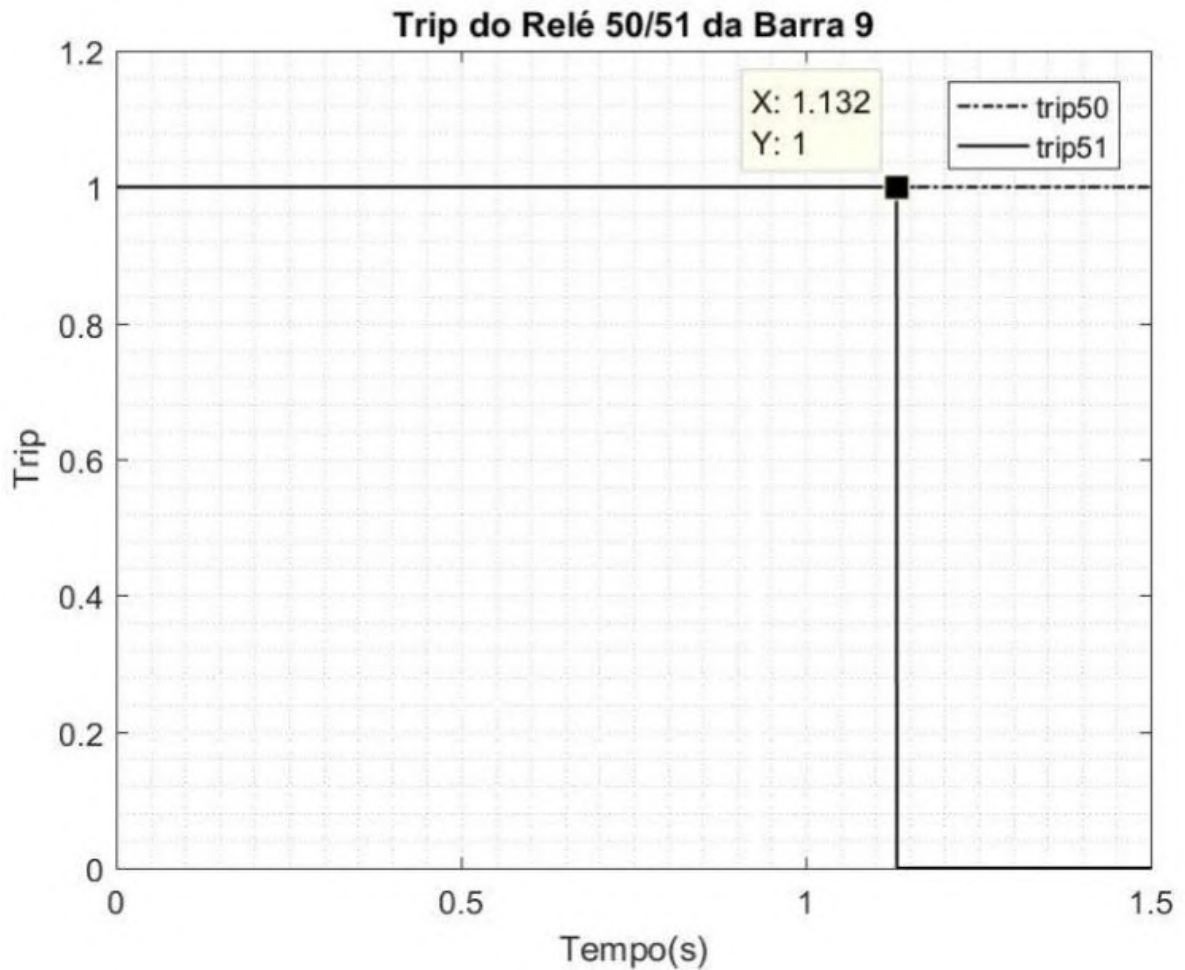
$$M_9 = \frac{I_{cc1\emptyset 12-13a} 50\%}{RTC_9 \cdot I_{ajuste51,9}} = \frac{1709,0}{\frac{300}{5} \times 6,16} = 4,62$$

O tempo deste relé é:

$$Tm_9 = \frac{0,2 \times 0,14}{(4)^{0,02} - 1} = 0,9s$$

A figura 4.28 apresenta o trip do relé da barra 9:

Figura 4.29 – Trip do relé 50/51 da barra 9



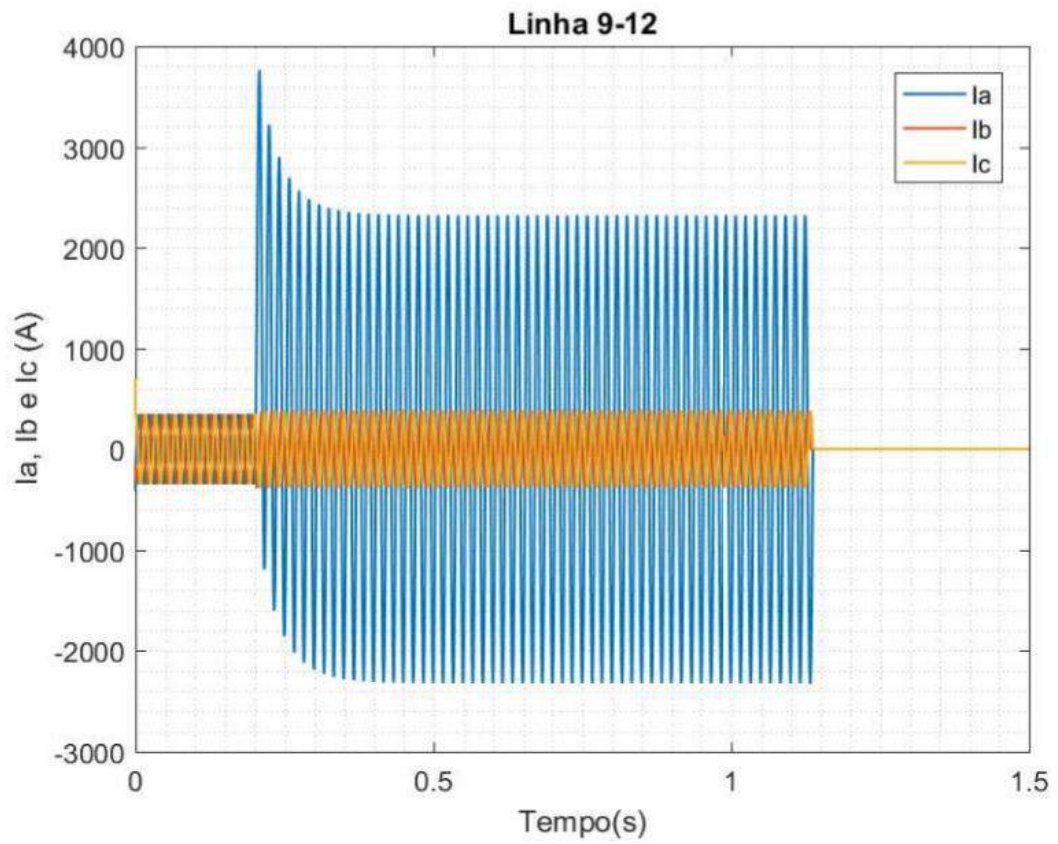
Fonte: Autora

Nota-se que a corrente de curto sensibiliza apenas a unidade temporizada. O tempo calculado foi de 0,9 e o tempo de atuação segundo a simulação foi de 1,132s. Subtraindo o tempo de ocorrência do curto, tem-se:

$$Tm_9 = 1,132 - 0,2 = 0,932s$$

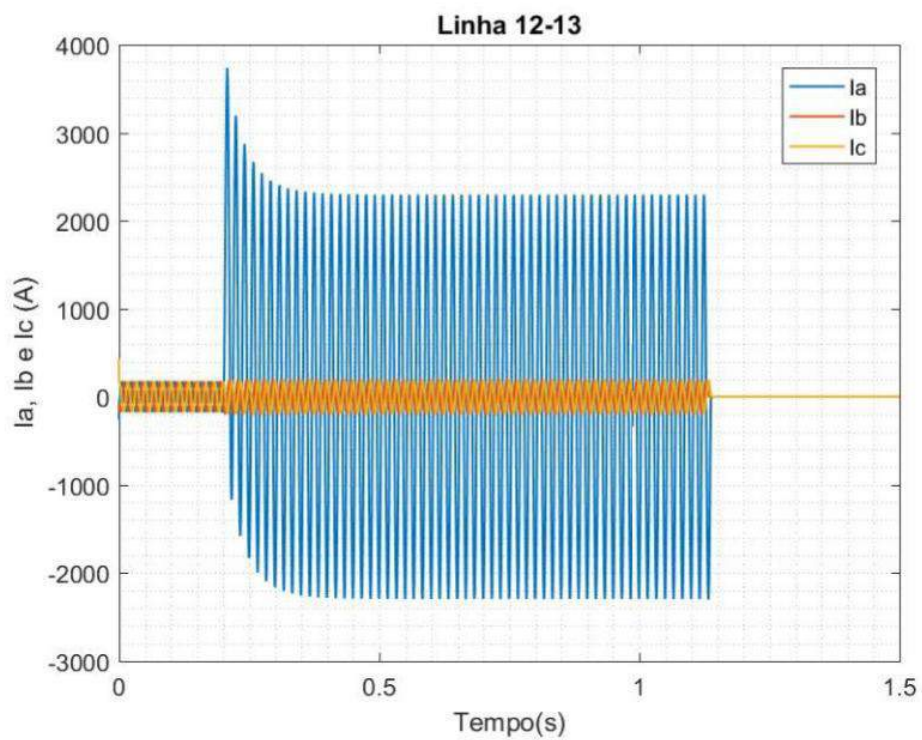
A precisão é considerada satisfatória. As correntes de operação para as linhas de transmissão do trecho são apresentadas nas figuras 4.30 e 4.31.

Figura 4.30 – Corrente da linha de transmissão 9-12



Fonte: Autora

Figura 4.31 – Corrente da linha de transmissão 12-13



Fonte: Autora

## 5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise detalhada do comportamento do relé de sobrecorrente digital obtido através de simulação computacional, segundo o seu modelo matemático previamente estabelecido de acordo com suas características operacionais, sobretudo no que diz respeito a eficácia das técnicas de coordenação e seletividade a medida que o mesmo foi inserindo a um sistema trifásico.

De modo geral o comportamento esperado de um relé de sobrecorrente digital tanto para a unidade instantânea quanto para a unidade temporizada foi obtido, bem como se verificou a abertura do disjuntor de forma correta e os tempos de atuação e coordenação apresentaram precisão suficiente para que o modelo sirva para o desenvolvimento de pesquisas na área, pois obteve diferenças irrelevantes com os tempos calculados através das formulações presentes nas bibliografias.

Dada a importância do tema tanto para o sistema elétrico como um todo bem como no aspecto da geração distribuída, tona-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que visem a implementação de outros tipos de relés e que sejam realizadas as coordenações para diversas barras existentes no sistema de modo a avaliar e analisar de forma mais profunda o comportamento dos equipamentos.

Desta forma, o desenvolvimento de modelos para simulação computacional é importante para prever o comportamento e os possíveis erros que possam ocorrer quando os equipamentos estiverem de fato em operação, podendo assim serem dimensionados da melhor forma possível, afim de que o sistema elétrico opere de forma confiável e precisa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, Paul M. **Analysis of Faulted Power Systems**. New York: IEEE Press Power Systems Engineering Series, 1995.
- BLACKBURN, J. Lewis, Thomas J. Domin, **Protective Relaying: Principles and applications**, 3 ed. 2006.
- CARLOS, Ângelo Rafael. **“Seletividade e coordenação de esquemas de proteção em sistemas elétricos de média tensão”**. Porto Alegre:2007.
- COURY, D. V. **Técnicas digitais aplicadas ao problema de localização de faltas em linhas de transmissão**. Escola de Engenharia de São Carlos- USP, São Carlos (SP), 2008.
- COVRÉ, H. P. **Integração de dados dos sistemas de proteção de subestações distribuidoras**: 2011.
- FISCHER, Pedro Armando. **Tratado Teórico e Prático sobre Curto-Circuitos**. Porto Alegre: São Cristóvão, 2002.
- GARZON, R. **High Voltage Circuit Breakers**. 2 ed, CRC PRESS, 2002.
- HAMILTON, Johnson, J., R., Lerley, P., **“Voltage Restrained Time Overcurrent Relay Principles, Coordination, and Dynamic Testing Considerations”**, in: 54th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University: 2001.
- IEEE Std C37.112-1996, **“IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations”** IEEE Standards Board – Substations Committee.
- KEZUNOVIC, Mladen. **“Design, modeling and evaluation of protective relays for power systems”**. Springer USA:2016.
- KINDERMANN, GERALDO. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 3. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2012.
- KINDERMANN, GERALDO. **Curto-circuito**. 1. ed. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1992.
- MAMEDE, JOÃO. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- MAMEDE, JOÃO. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. [Reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SAADAT, Hadi. **“Power system analysis”**. 1999

SALLES, Newton José. **“Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos”** Campinas, SP: [s.n.], 2007.

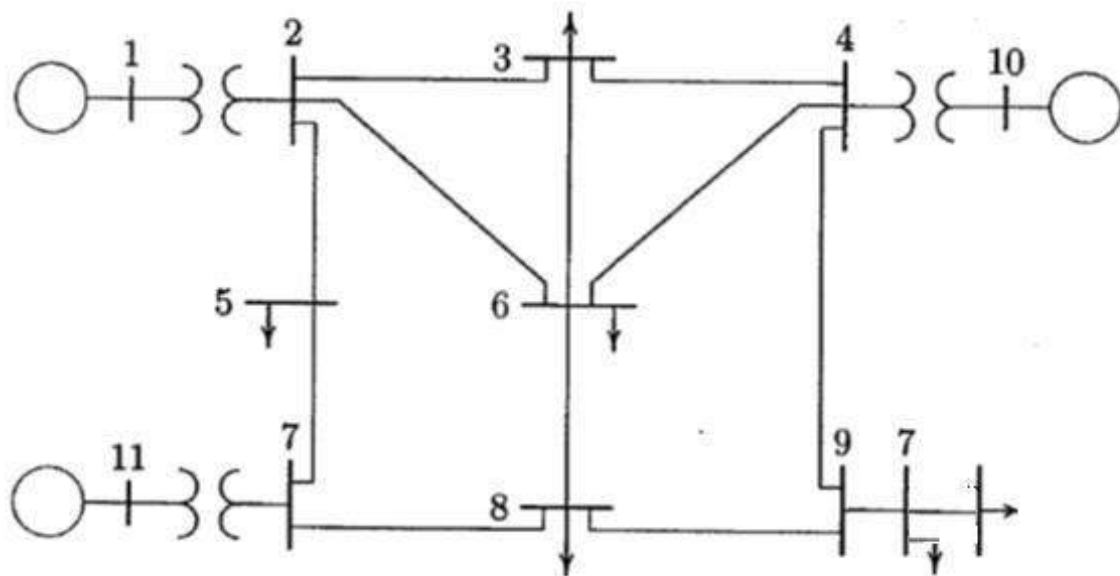
SATO, FUGIO. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

## 7. APÊNDICE

### 7.1. Dados da rede

O diagrama unifilar da rede é apresentado na Figura 7.1.

Figura 7.1 – Diagrama unifilar da rede teste



Fonte: Autora (Baseado em SAADAT(1999))

### 7.2. Dados para a simulação

Duas linhas de transmissão foram conectadas entre as barras 12-13 para que o curto-circuito pudesse ser localizado em qualquer ponto da linha. As figuras 7.1 e 7.2 apresentam os parâmetros utilizados para a modelar o curto a 85% da linha.



Figura 7.2 – Parâmetros da linha de transmissão localizada entre a barra 12 e o curto

Block Parameters: Linha 12-13(0.85)

Subsystem (mask)

Parameters

Tensão Base , Potência Base e Frequência Base [Vbase (kV) Sbase (MVA) fbase (Hz)] :

[230 1000 60]

Resistência em pu:

0.052\*0.85

Reatância Indutiva em pu:

0.46\*0.85

Susceptância (B/2) em pu:

0.0000001

Comprimento da Linha (km):

100\*0.85

OK Cancel Help Apply

Fonte: Autora

Figura 7.3 – Parâmetros da linha de transmissão localizada entre o curto e a barra 13

Block Parameters: Linha 12-13(0.15)

Subsystem (mask)

Parameters

Tensão Base , Potência Base e Frequência Base [Vbase (kV) Sbase (MVA) fbase (Hz)] :

[230 1000 60]

Resistência em pu:

0.052\*0.15

Reatância Indutiva em pu:

0.46\*0.15

Susceptância (B/2) em pu:

0.0000001

Comprimento da Linha (km):

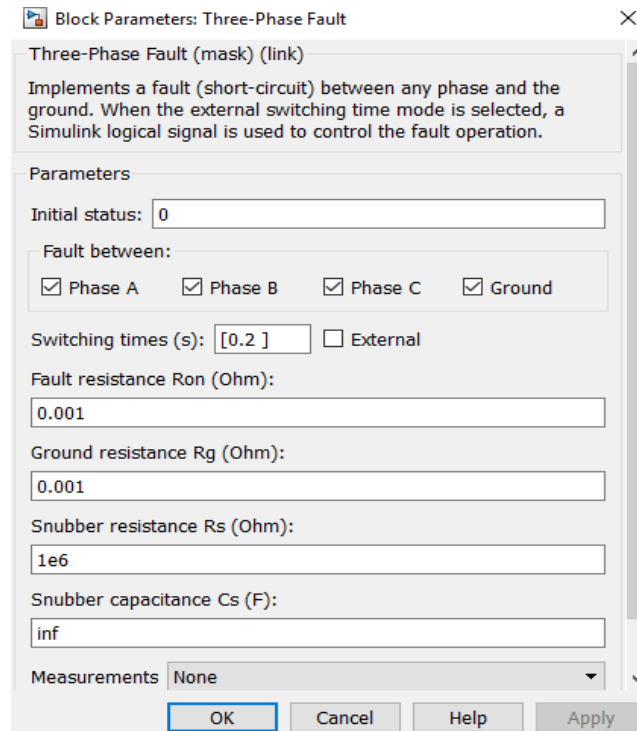
100\*0.15

OK Cancel Help Apply

Fonte: Autora

O curto-circuito trifásico foi introduzido ao sistema através do bloco *Three-Phase Fault* presente na plataforma, e foi modelado como mostra a figura 7.3. É importante ressaltar que o curto-circuito ocorre a partir de 0,2 segundos, este valor foi definido no parâmetro *Switching times*.

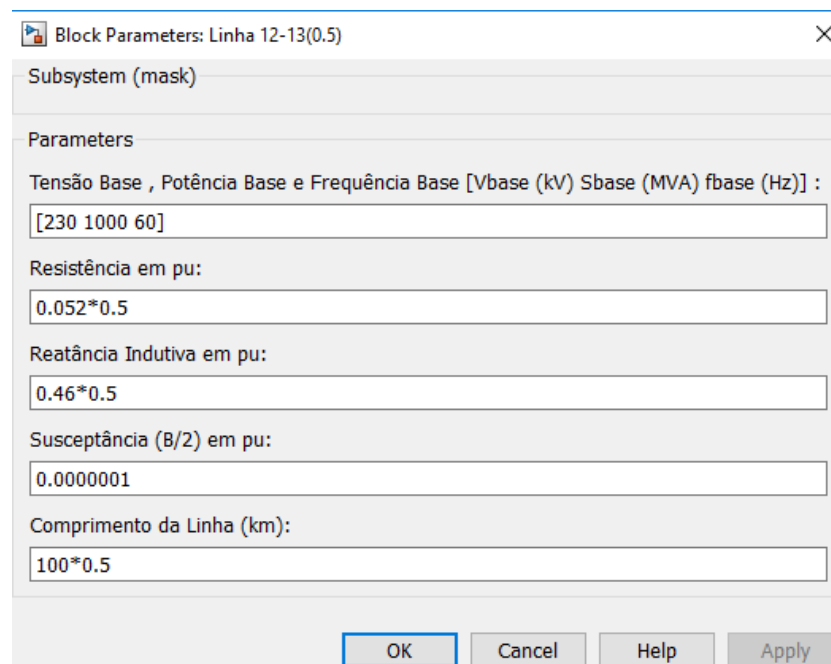
Figura 7.4 – Modelagem do curto-circuito



Fonte: Autora

Os parâmetros das linhas de transmissão foram estabelecidos como mostra a figura 7.4 para obter um curto-circuito trifásico a 50% da linha.

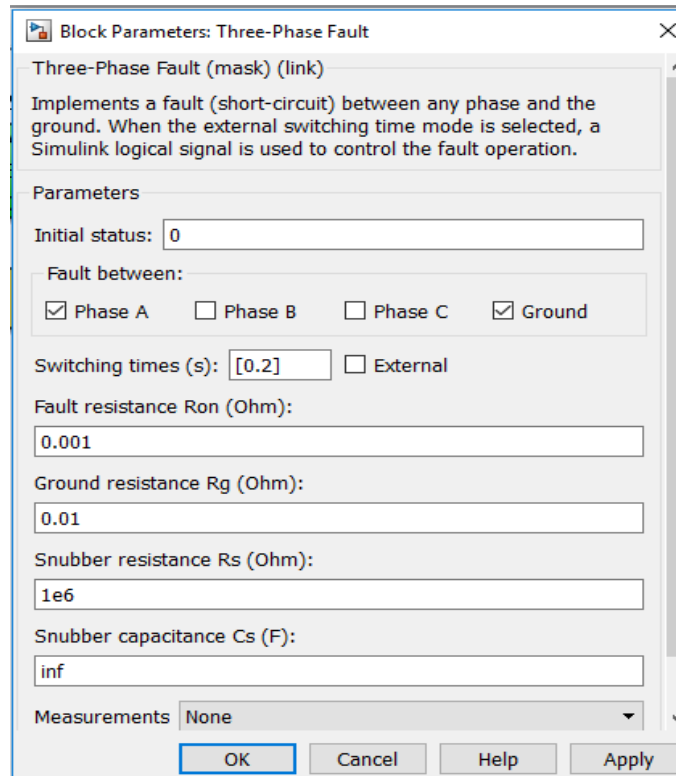
Figura 7.5 – Parâmetros de ajuste das linhas de transmissão



Fonte: Autora

O curto-circuito monofásico também foi introduzido ao sistema através do bloco *Three-Phase Fault* presente na plataforma, com a diferença de que as fases B e C não estão presentes no curto como é mostrado na figura 7.5.

Figura 7.6 – Modelagem do curto-circuito



Fonte: Autora