

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS FACCIOLI BODONI

**MODELAGEM DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL PARA GERADOR SÍNCRONO EM
AMBIENTE MATLAB**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

MARCOS FACCIOLI BODONI

**MODELAGEM DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL PARA GERADOR SÍNCRONO EM
AMBIENTE MATLAB**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcos Faccioli Bodoni

Modelagem proteção diferencial em gerador síncrono em ambiente matlab

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 19:00hs do dia 20/08/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Murilo da Silva, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

A Coordenação do Curso, pela cooperação. A todos meus amigos e professores da universidade que de alguma forma contribuíram nessa caminhada.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

BODONI, Marcos Faccioli. **Modelagem proteção diferencial para gerador síncrono em ambiente Matlab**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Este trabalho tem como sugestão implementar um algoritmo de proteção diferencial para geradores síncronos utilizando um método computacional, desenvolvido com a plataforma *Matlab/Simulink®*, com base no relé GE-489 do fabricante *General Electric*, voltado para o ensino de proteção de sistemas para graduação e pesquisa. Para comprovar as características de confiabilidade e seletividade de atuação da proteção, foram criadas rotinas de filtragem e amostragem de sinais provenientes do sistema elétrico de potência modelado e realizadas simulações de faltas monofásicas-terra, bifásicas-terra e trifásicas-terra. Foram avaliados pelo módulo implementado os locais que compreendem a zona interna protegida e zona externa. Os resultados obtidos demonstram que a lógica computacional atuou de forma correta na detecção de faltas internas a zona protegida e o bloqueio de operação do relé para faltas externas em todos os casos simulados, indicando validação do módulo implementado.

Palavras-chave: Proteção diferencial. Relé. Gerador síncrono. Sistema elétrico de potência.

ABSTRACT

BODONI, Marcos Faccioli. **Differential protection modeling for synchronous generator in Matlab environment.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

This work has the suggestion to implement a differential protection algorithm for synchronous managers using a computational method, developed with the Matlab / Simulink® platform, based on the GE-489 relay from the manufacturer General Electric, aimed at teaching systems protection for undergraduate students. and research. In order to prove the characteristics of the selection and selection of protection and protection resources, filtering and signal sampling routines, the modeled power system and simulations of single-phase-to-ground, two-phase-to-ground and three-phase-to-ground faults were performed. They were specified by the module implemented in the locations that comprise a protected internal and external zone. The results obtained demonstrate that the computational logic performed correctly in the detection of internal faults in a protected zone and the blocking of external fault operations in all simulated cases, validation of the implemented module.

Keywords: Differential protection. Relay. Synchronous generator. Electric power system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Proteção de um gerador síncrono e transformador elevador de uma usina hidrelétrica.....	8
Figura 2 – Falta externa ao relé diferencial.....	9
Figura 3 – Falta interna ao relé diferencial.....	9
Figura 4 – Proteção diferencial percentual.....	10
Figura 5 – Curva de ajuste para proteção diferencial.....	11
Figura 6 – Sistema Elétrica implementado.....	12
Figura 7 – Sinais de corrente e bloco de tratamento de sinais	14
Figura 8 – Filtragem, amostragem e condicionamento do sinal	15
Figura 9 – Bloco do Relé 87g	16
Figura 10 – Etapas lógica computacional implementada no relé	18
Figura 11 – Sinais de corrente no regime sem faltas	19
Figura 12 – Corrente diferencial e restrição da fase A em regime sem faltas....	20
Figura 13 – Corrente diferencial e restrição da fase B em regime sem faltas....	20
Figura 14 – Corrente diferencial e restrição da fase C em regime sem faltas....	21
Figura 15 – Curva característica de operação do relé diferencial no regime sem faltas.....	21
Figura 16 – Sinais de TRIP das fases A, B e C no regime sem faltas.....	22
Figura 17 – Sinais de corrente para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida.....	24
Figura 18 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida.....	25
Figura 19 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida.....	25
Figura 20 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida.....	26
Figura 21 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida.....	26
Figura 22 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida.....	27
Figura 23 – Sinais de corrente para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida.....	28

Figura 24 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida.....	29
Figura 25 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida.....	29
Figura 26 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida.....	30
Figura 27 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida.....	30
Figura 28 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida.....	31
Figura 29 – Sinais de corrente para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida.....	32
Figura 30 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida.....	33
Figura 31 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida.....	33
Figura 32 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida.....	34
Figura 33 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida.....	34
Figura 34 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida.....	35
Figura 35 – Sinais de corrente para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida.....	36
Figura 36 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida.....	37
Figura 37 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida.....	37
Figura 38 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida.....	38
Figura 39 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida.....	38

Figura 40 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida.....	39
Figura 41 – Sinais de corrente para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida.....	40
Figura 42 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida.....	41
Figura 43 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida.....	41
Figura 44 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida.....	42
Figura 45 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida.....	42
Figura 46 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida.....	43
Figura 47 – Sinais de corrente para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida.....	44
Figura 48 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida.....	45
Figura 49 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida.....	45
Figura 50 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida.....	46
Figura 51 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida.....	46
Figura 52 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida.....	47

Sumário

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 Objetivos	5
1.1.1 Objetivos específicos	5
1.2 Justificativa	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Faltas em geradores	6
2.2 Principais funções utilizadas para proteção de geradores	6
2.2.1 Proteção diferencial (87G) para geradores síncronos	8
3 METODOLOGIA	12
3.1 Sistema elétrico utilizado	12
3.1.1 Fonte de tensão	12
3.1.2 Linha de distribuição	13
3.1.3 Carga trifásica	13
3.1.4 Gerador síncrono	13
3.2 Modelagem do relé	14
3.2.1 Sinais de Corrente	14
3.2.2 Filtragem Digital	15
3.2.3 Modelagem Proteção Diferencial	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
4.1 Regime sem faltas	19
4.2 Falta monofásica-terra dentro e fora da zona protegida	23
4.3 Falta bifásica-terra dentro e fora da zona protegida	31
4.4 Falta trifásica-terra dentro e fora da zona protegida	39
5 CONCLUSÃO	47

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são sistemas compostos por geradores, torres, isoladores, subestações, postes e são responsáveis por gerar, transmitir e distribuir energia elétrica para unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais de pequeno, médio e grande porte, atendendo a determinados padrões.

A segurança é um dos padrões que os SEP devem atender, assim sempre há uma busca pela evolução nos processos de controle, regulação e proteção dos sistemas elétricos, com objetivo de garantir um fornecimento de energia confiável e com qualidade aos consumidores.

Os SEPs são constituídos por vários equipamentos, sendo alguns destes contendo alto custo de aquisição e manutenção, como por exemplo os grandes geradores síncronos.

Os geradores síncronos são um dos principais equipamentos utilizados para o fornecimento de energia elétrica, assim, as técnicas utilizadas em sua proteção encontram-se em constante desenvolvimento, devido aos geradores estarem sujeitos a diversos tipos de faltas. O resultado destas faltas apresenta altas correntes de curto circuito, sendo necessário portanto a rápida atuação da proteção, isolando o gerador para evitar maiores danos. (SILVA, 2012)

Os relés são os principais dispositivos de proteção dos sistemas elétricos. Atendendo às diversas aplicações, sua função é identificar condições indesejáveis do sistema e, integrado com um disjuntor ou religador, atuar nas manobras de chaveamento. (CAMINHA, 1977)

Dentre as proteções de geradores síncronas utilizadas, destacam-se a proteção diferencial, que tem por finalidade comparar os valores de corrente, a fim de detectar faltas e, assim, realizar a proteção no momento de sua ocorrência.

1.1 Objetivos

Modelar a proteção diferencial (87G) para um gerador síncrono, em ambiente Matlab/Simulink, voltado ao ensino de proteção de sistemas para graduação e pesquisas.

1.1.1 Objetivos específicos

- Modelar o sistema elétrico que será utilizado nas simulações.
- Realizar a aquisição de dados de corrente do sistema elétrico.
- Implementar o módulo de condicionamento de sinais.
- Modelar o dispositivo de proteção diferencial para geradores síncronos no ambiente Matlab/Simulink.
- Testar e validar os resultados do módulo de proteção.

1.2 Justificativa

Devido as bibliotecas do Matlab/Simulink não conter modelos de relés de proteção para utilização em simulações e estudos, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de relé digital para proteção diferencial em geradores síncronos, tendo como objetivo sua utilização acadêmica em disciplinas e pesquisas na área de sistemas de proteção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos teóricos a respeito da proteção diferencial e sua utilização para proteção de geradores síncronos.

2.1 Defeito em geradores

Além do impacto devido a uma falta no sistema elétrico, o gerador também está sujeito a vários tipos de faltas internas ao mesmo. Entre as faltas internas a um gerador síncrono podem-se destacar as seguintes: (REIMERT, 2006; IEEE STD. C37.102-1995, 1995)

- Curto-circuito fase-terra
- Curto-circuito fase-fase
- Curto-circuito fase-fase-terra
- Perda de excitação
- Oscilações de frequência
- Oscilações de tensão

Estas são algumas faltas que as unidades geradoras estão expostas, porém são as mais significativas e mais comuns, sendo assim as que mais causam danos, além de poder causar danos ao sistema elétrico em geral.

2.2 Principais funções utilizadas para proteção de geradores

Considerando-se os diversos tipos de faltas a que um gerador está sujeito, logo se imagina que muitas funções de proteção sejam necessárias para a adequada proteção deste equipamento. Realmente, os geradores são os dispositivos que têm a maior quantidade de funções de proteção se comparados com linhas de transmissão ou transformadores. Portanto, a proteção dos geradores é uma tarefa bastante complexa e envolve muitas variáveis. (LENZ, 2009)

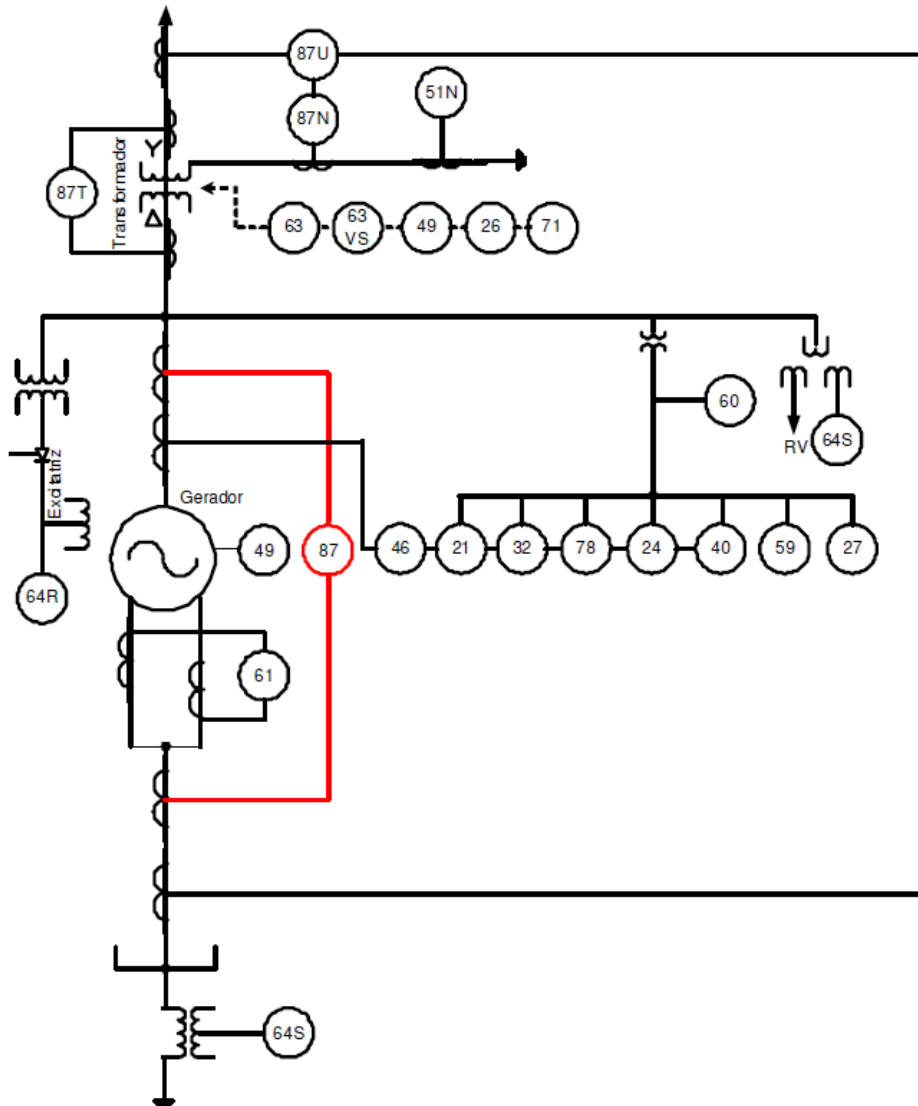
Visando cobrir todos os defeitos e demais anormalidades as proteções mais utilizadas em geradores síncronos são as seguintes:

- Proteção de sobrecorrente (função 50,51);

- Proteção diferencial (função 87);
- Proteção de subtensão (função 27);
- Proteção de sobretensão (função 59);
- Proteção de sequência negativa (função 46);
- Proteção de imagem térmica (função 49);
- Proteção de perda de excitação (função 40);
- Proteção de sobreexcitação (função 24);
- Proteção de distância (função 21);
- Proteção direcional de potência (função 32);
- Proteção de frequência (função 81);
- Proteção de perda de sincronismo (função 78);
- Proteção de balanço de tensão (função 60);
- Proteção de terra (ground) (função 64);
- Proteção de balanço de corrente (função 61);
- Proteção de mancal (função 38);
- Proteção contra vibrações (função 39);

Na Figura 1, é mostrado o diagrama unifilar de uma unidade geradora, de grande porte, de uma usina hidrelétrica. A Figura 1 tem por finalidade mostrar que o trabalho é direcionado somente para proteção diferencial do gerador síncrono (87G), sendo que esta se encontra destacada na cor em vermelho.

Figura 1- Proteção de um gerador síncrono e transformador elevador de uma usina hidrelétrica



Fonte: (Kinderman,2008)

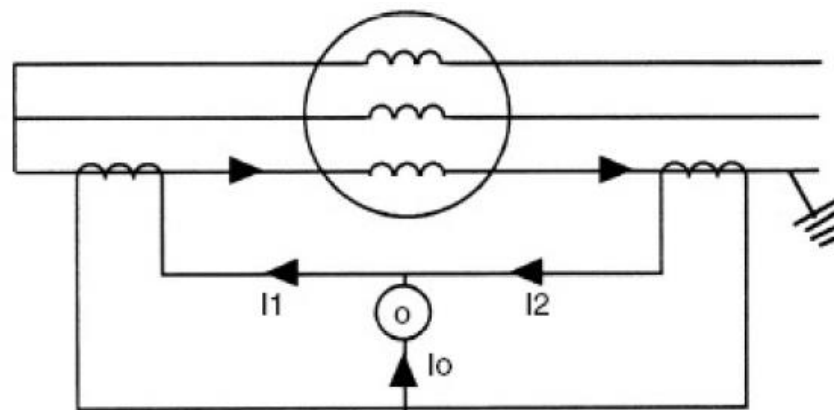
2.2.1 Proteção diferencial (87G) para geradores síncronos

Dentre as proteções, a 87G é a mais importante entre todas aplicadas à geradores. Tem seu princípio de funcionamento baseado na medição de corrente em no mínimo dois pontos do gerador, normalmente sendo um no fechamento do neutro e o outro na saída para o transformador elevador, e utilizando o princípio da lei de Kirchhoff, ou seja, de que a corrente que entra é igual a corrente que sai do nó, é realizado as medições e a comparação entre as duas correntes. Se houver uma diferença significativa entre estas correntes, significa que existe uma fuga de corrente

entre os pontos medidos, caracterizando assim, uma falta interna a área protegida, então a proteção atua. (IEEE STD. C37.102-1995, 1995; REIMERT, 2006)

A forma mais simples de uma proteção diferencial é fornecida por um relé instantâneo conectado como mostra a Figura 2. A direção de fluxo de corrente mostrado é para carregamento ou para uma falta fora da zona de proteção do diferencial. Assumindo correntes ideais nos TCs (transformadores de corrente), as correntes I_1 e I_2 serão idênticas e a corrente de operação do relé I_0 será zero.

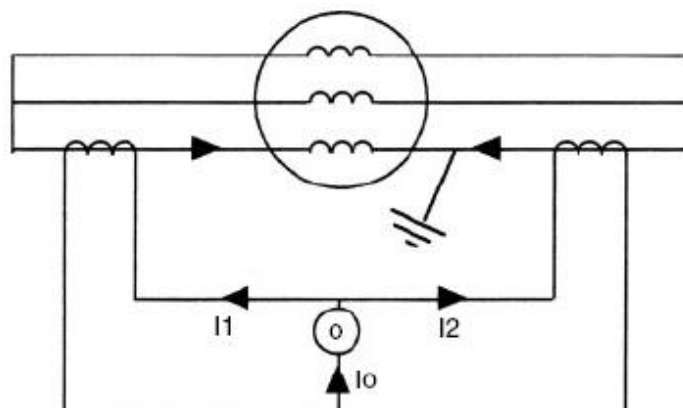
Figura 2 - Falta externa ao relé diferencial



Fonte: (Reimert, 2006)

Com a ocorrência de uma falta dentro da zona de proteção diferencial, representado na figura 3, a corrente de um dos TCs irá inverter, e a corrente no relé será igual a corrente de curto circuito total como refletida pela relação do TC, $I_0 = I_1 + I_2$.

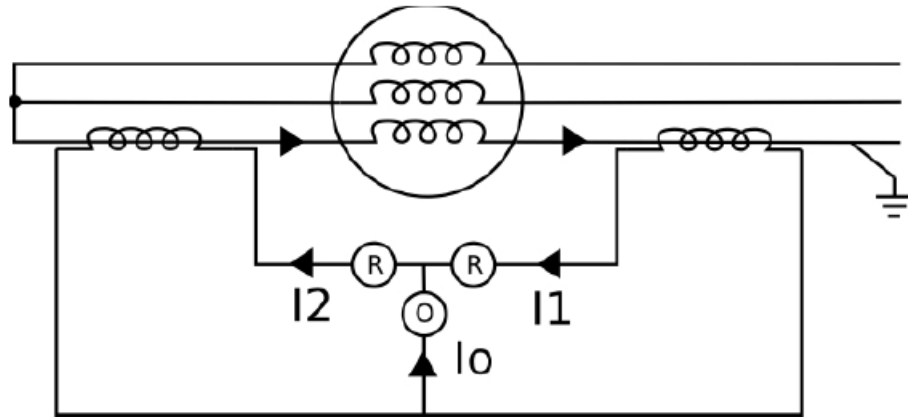
Figura 3 - Falta interna ao relé diferencial



Fonte: (Reimert,2006)

O sinal de abertura dos disjuntores de campo do gerador são enviados através da proteção diferencial, que determina a parada instantânea da fonte. Os relés que realizam essa função possuem uma bobina de operação (O) e uma bobina de restrição (R), como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Proteção diferencial percentual



Fonte: (Reimert,2006)

A corrente na bobina de restrição produz um torque de abertura do contato, e a corrente na bobina de operação produz torque de fechamento do contato. Os contatos serão fechados quando o valor da corrente de operação exceder o valor da corrente de restrição, devido a uma determinada percentagem, que é referida como a inclinação da reta de ajuste. Este esquema proporciona um aumento automático da corrente de operação, necessário para o disparo do relé, quando a corrente de carga e o erro podem aumentar, ou seja, o erro aumenta com a corrente de carga.

Para faltas externas, as correntes de operação I_o e restrição I_r são dadas por:

$$I_o = I_1 - I_2 \quad (1)$$

$$I_r = \frac{|I_1 + I_2|}{2} \quad (2)$$

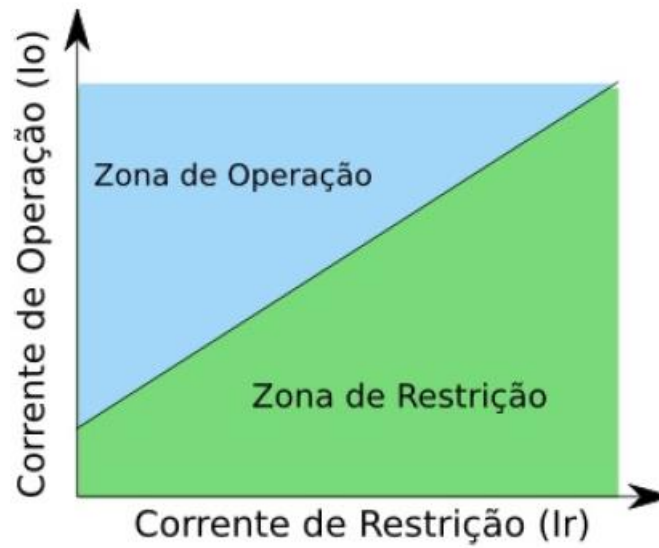
Em caso de faltas internas, as correntes de operação e restrição são dadas por:

$$I_o = I_1 + I_2 \quad (3)$$

$$I_r = \frac{I_1 - I_2}{2} \quad (4)$$

A figura 5 mostra um exemplo de curva de ajuste empregada neste tipo de proteção.

Figura 5 - Curva de ajuste para proteção diferencial percentual



Fonte: (Reimert,2006)

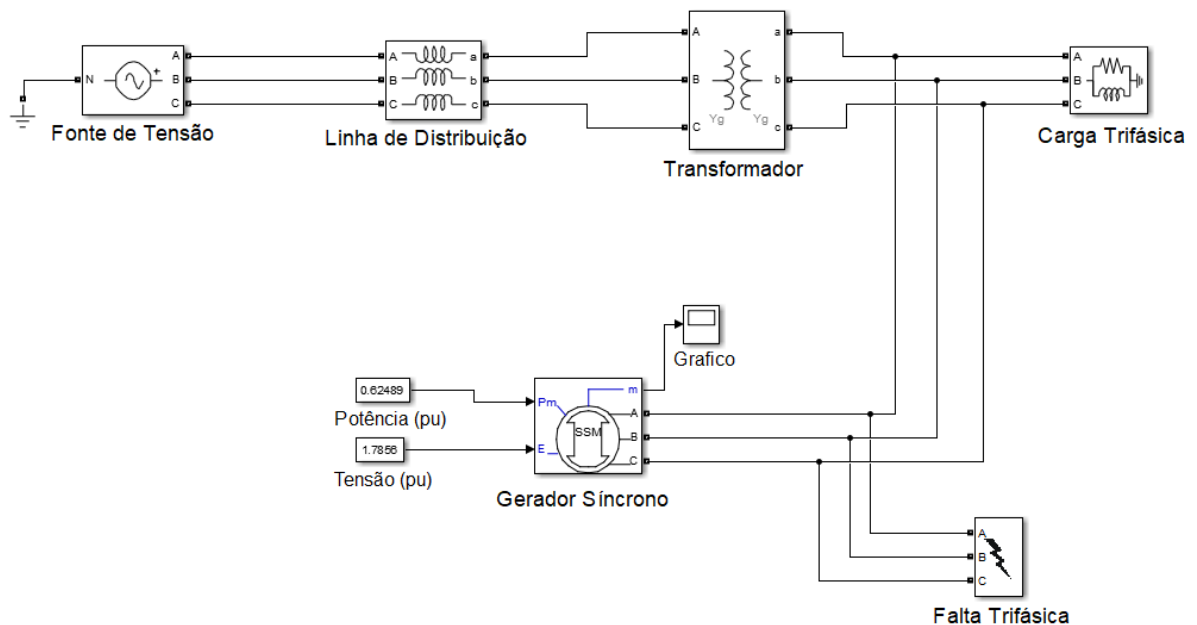
3 METODOLOGIA

Serão apresentados nesta seção os procedimentos, metodologia e lógica utilizados para a execução deste trabalho.

3.1 Sistema elétrico utilizado

Este capítulo tem por objetivo apresentar o sistema elétrico de potência utilizado para a modelagem da proteção diferencial (87G) para o gerador síncrono. A figura 6 ilustra o sistema elétrico implementado. Os parâmetros do sistema, foram adaptados da dissertação Matias (2016).

Figura 6 - Sistema elétrico implementado



Fonte: Autoria Própria

3.1.1 Fonte de tensão

Os dados utilizados para modelagem da fonte de tensão são apresentados a seguir:

- Tensão de linha: $V_L = 113,8 \text{ KV}$

- Dados da sequência positiva: $R_+ = 5,105 \Omega$ e $L_+ = 60,99 \cdot 10^{-3} H$
- Dados da sequência zero: $R_0 = 5,4785 \Omega$ e $L_0 = 135,55 \cdot 10^{-3} H$

3.1.2 Linha de distribuição

As impedâncias utilizadas na modelagem da linha de distribuição são mostradas a seguir:

- Dados da sequência positiva: $R_+ = 4,347 \Omega$ e $L_+ = 55,84 \cdot 10^{-3} H$
- Dados da sequência zero: $R_0 = 7,3145 \Omega$ e $L_0 = 124,72 \cdot 10^{-3} H$

3.1.3 Carga trifásica

A carga trifásica foi modelada utilizando os seguintes parâmetros:

- Tensão nominal de fase: $V_F = 13,8 KV$
- Frequência: $f = 60 Hz$
- Potência ativa: $P = 9,2 MW$
- Potência reativa indutiva: $Q = 3,9192 MVAr$

3.1.4 Gerador síncrono

Os parâmetros utilizados no modelo do gerador síncrono, são apresentados a seguir.

- Enrolamentos do estator conectados em estrela a um ponto neutro interno.
- Potência nominal de 187 MW, tensão nominal de 13,8 KV e frequência de 60 Hz.
- Número de pares de polos: $p = 20$
- Impedância interna por fase do gerador: $R = 0,0204 \Omega$ e $L = 0,8104 \cdot 10^{-3} H$
- Potência mecânica: $P_m = 0,62489 pu$
- Excitação: $E = 1,7856 pu$

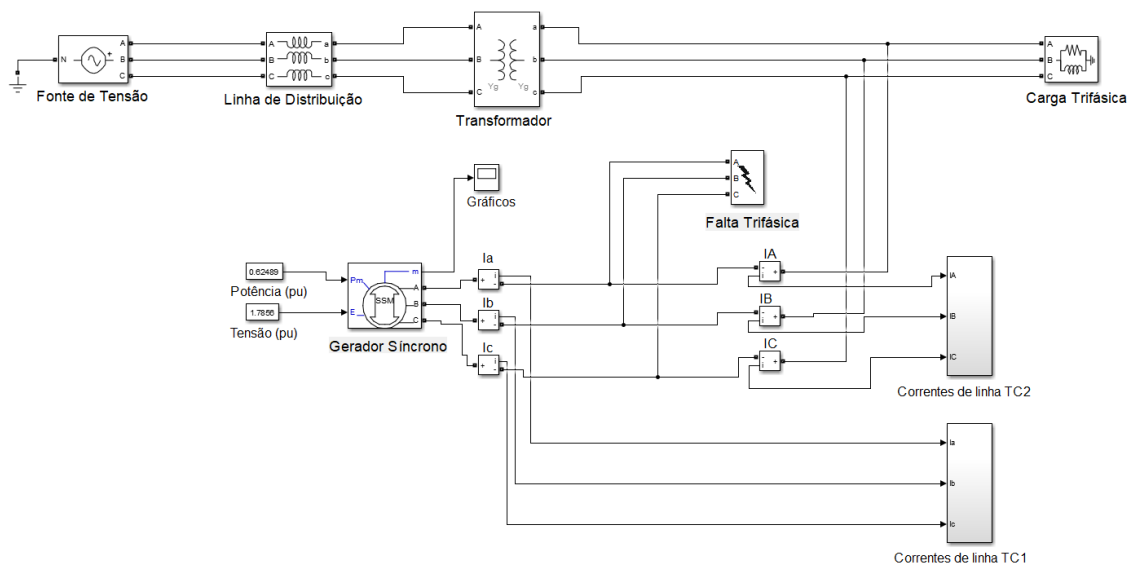
3.2 Modelagem do relé

Neste trabalho foi abordado previamente o conceito teórico de proteção diferencial para o relé em geradores síncronos, logo este capítulo tem por objetivo mostrar a lógica aplicada ao relé, e os processos desde aquisição de dados até o TRIP final do relé.

3.2.1 Sinais de Corrente

Devido ao bloco do Matlab não permitir acesso aos terminais do gerador, foi necessário uma simplificação, a Figura 7 mostra o local onde são coletados os sinais de corrente no sistema elétrico e enviados para o subsistema, onde ocorre o condicionamento do sinal. O TC1 (Transformador de corrente) é composto pelas correntes “Ia”, “Ib” e “Ic”, e o TC2 é composto pelas correntes “IA”, “IB” e “IC”.

Figura 7 - Sinais de corrente e blocos de tratamento sinais



Fonte: Autoria Própria

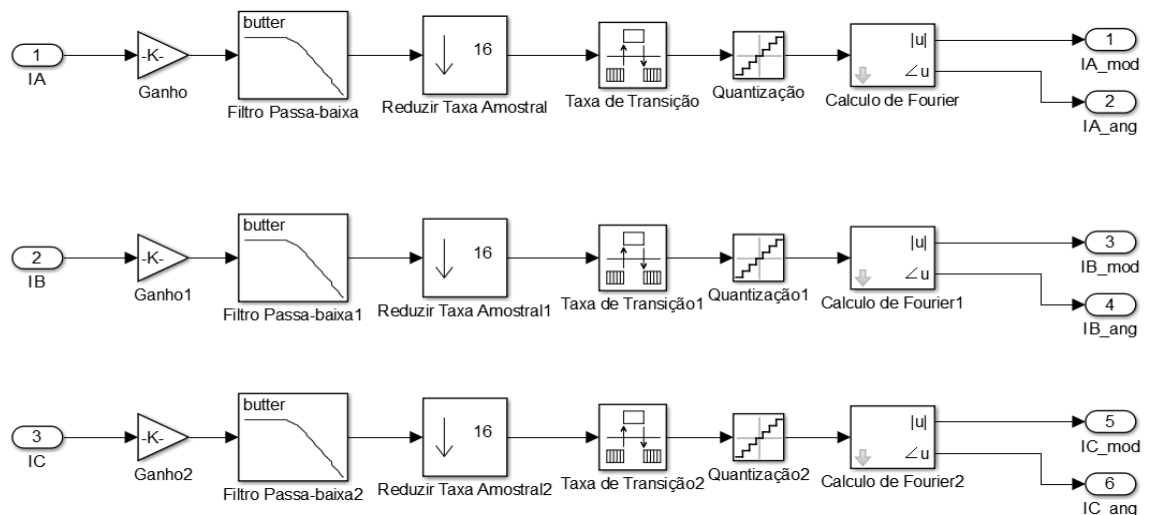
3.2.2 Filtragem Digital

Os dados de corrente coletados através de um amperímetro ideal, é enviado para o bloco de aquisição e condicionamento, para representar os efeitos do TC, a corrente medida passa por um ajuste no bloco RTC (Relação de Transformação de Corrente), que tem por finalidade reduzir a corrente a um valor equivalente ao que seria encontrado no secundário de um TC. Na próxima etapa a corrente passa pelo filtro “Butterworth” (passa-baixa), com a finalidade de eliminar as frequências espúrias e as componentes de frequências altas, prosseguindo, assim, para o bloco “Downsample” (Reduzir Taxa Amostral), que tem a função de alterar a taxa amostral do sinal, de 256 para 16 amostras por ciclo. Seguindo para os próximos blocos “Rate transition” (Taxa de transição) e “Quantizer” (Quantização) que são responsáveis por quantizar e codificar o sinal amostrado através do conversor Analógico-Digital, convertendo o sinal analógico para digital.

O sinal então seguirá para o bloco de “Fourier” (Calculo de Fourier), onde será realizado o cálculo das magnitudes e fases das componentes fundamental e harmônicas, que posteriormente serão enviados para o bloco Relé 87, responsável pela lógica e cálculos relativos a filosofia de proteção diferencial do gerador, bem como, geração dos resultados e oscilografias para análise.

Os subsistemas “Correntes de linha TC1” e “Correntes de linha TC2”, mostrados na Figura 7, apresentam a configuração representada na Figura 8:

Figura 8 – Filtragem, amostragem e condicionamento do sinal



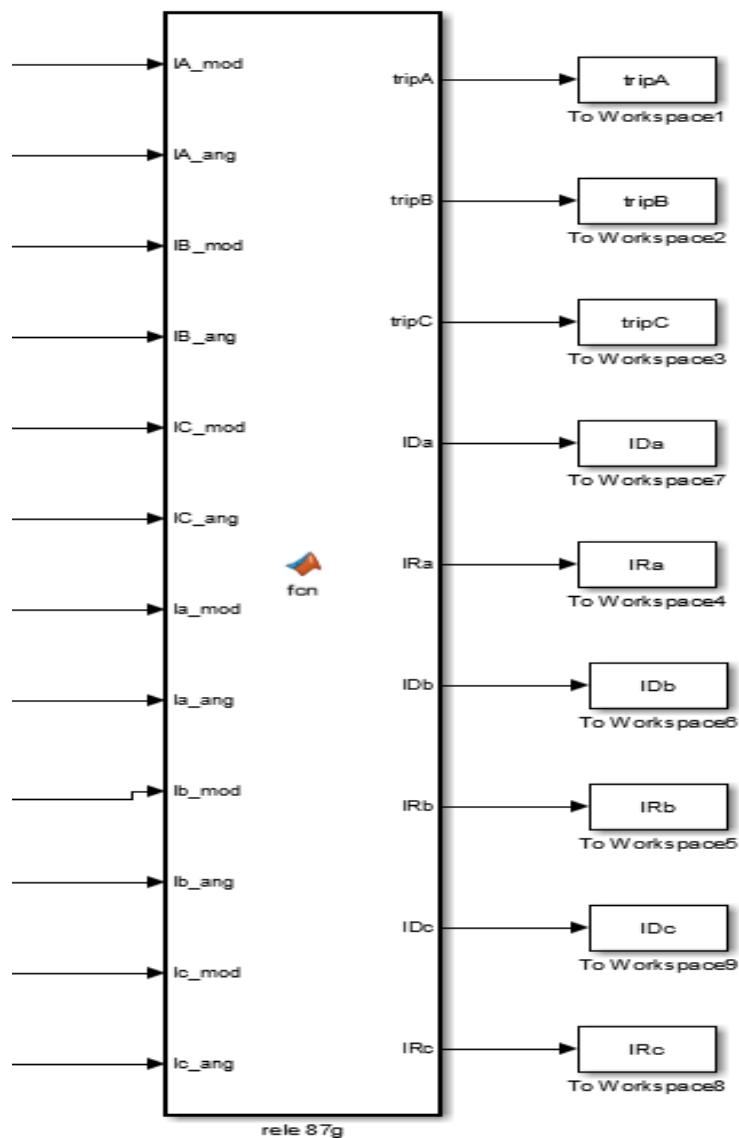
Fonte: Autoria Própria

3.2.3 Modelagem Proteção Diferencial

Após coletados e ajustados os dados de correntes a lógica de proteção diferencial já pode ser aplicada. A lógica computacional foi implementada utilizando a ferramenta “Matlab function” da biblioteca do Matlab/Simulink, resultando em um bloco personalizado composto por 12 entradas e 9 saídas. As entradas recebem os valores de módulos e ângulos após a filtragem digital das três fases do gerador, as saídas geram os resultados de sinal de TRIP, correntes diferencial e correntes de restrição.

O módulo implementado é mostrado na figura 9:

Figura 9 – Bloco do Relé 87g



Fonte: Autoria Própria

A lógica computacional foi desenvolvida de acordo com o rele diferencial GE-489. O elemento diferencial de fase A entra em operação quando:

$$I_{Diferencial} > k \cdot I_{Restrição} \quad (5)$$

$$I_{Diferencial} > I_{minimo} \quad (6)$$

A corrente mínima para operação é calculada de acordo com a equação 7:

$$I_{minimo} = 0,1 \cdot I_{base} \quad (7)$$

A corrente diferencial e de restrição para fase A são calculadas de acordo com as equações 8 e 9:

$$I_{Diferencial} = \bar{I}_a + \bar{I}_A \quad (8)$$

$$I_{Restrição} = \frac{|I_a| + |I_A|}{2} \quad (9)$$

Onde:

- I_a é a corrente de fase A medida na entrada do gerador.
- I_A é a corrente de fase A medida na saída do gerador.
- K é a inclinação característica do elemento diferencial em porcentagem.

A inclinação característica do elemento diferencial pode assumir dois valores, de acordo com as equações 10 e 11:

$$k = 10\% = 0,1; \text{ se } I_R < 2 \cdot I_{base} \quad (10)$$

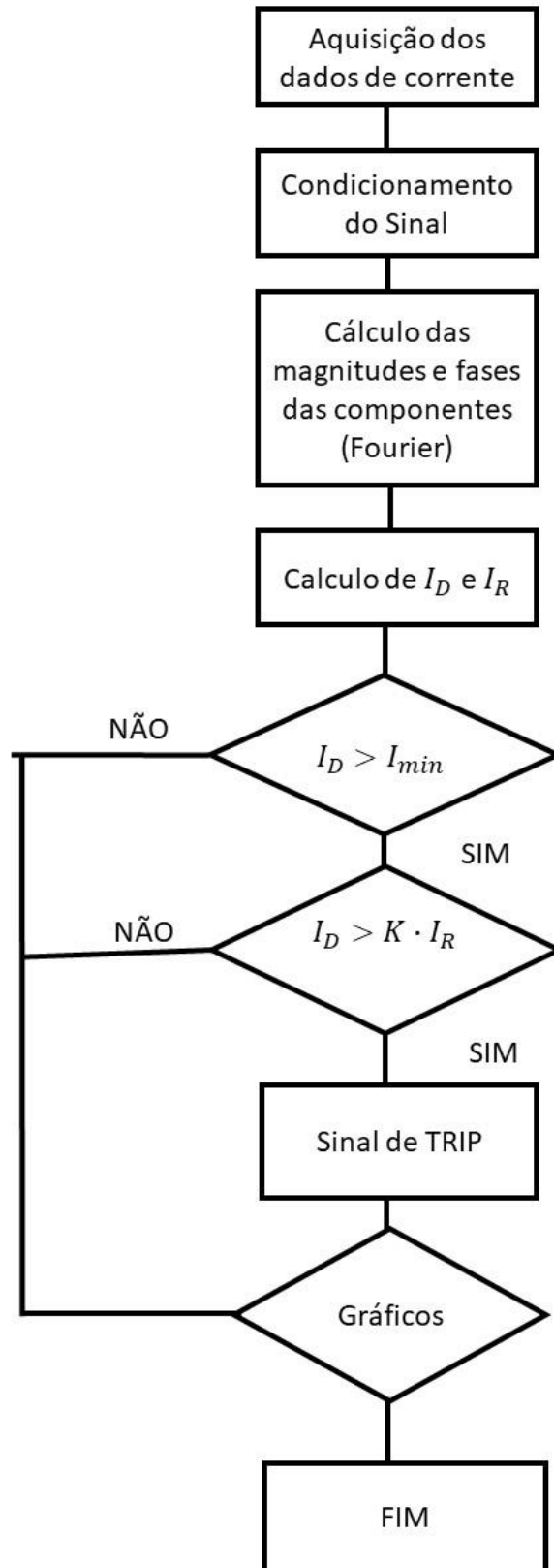
$$k = 20\% = 0,2; \text{ se } I_R \geq 2 \cdot I_{base} \quad (11)$$

A corrente de base I_{base} foi definida de acordo com o roteiro de ajustes do relé diferencial GE-489:

$$I_{base} = 25A \quad (12)$$

Estes dados são utilizados para operação da fase A, os elementos diferenciais das fases B e C operam da mesma maneira. A figura 10 mostra através do fluxograma as etapas do funcionamento da lógica computacional implementada no relé.

Figura 10 – Etapas lógicas computacionais implementadas no relé



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

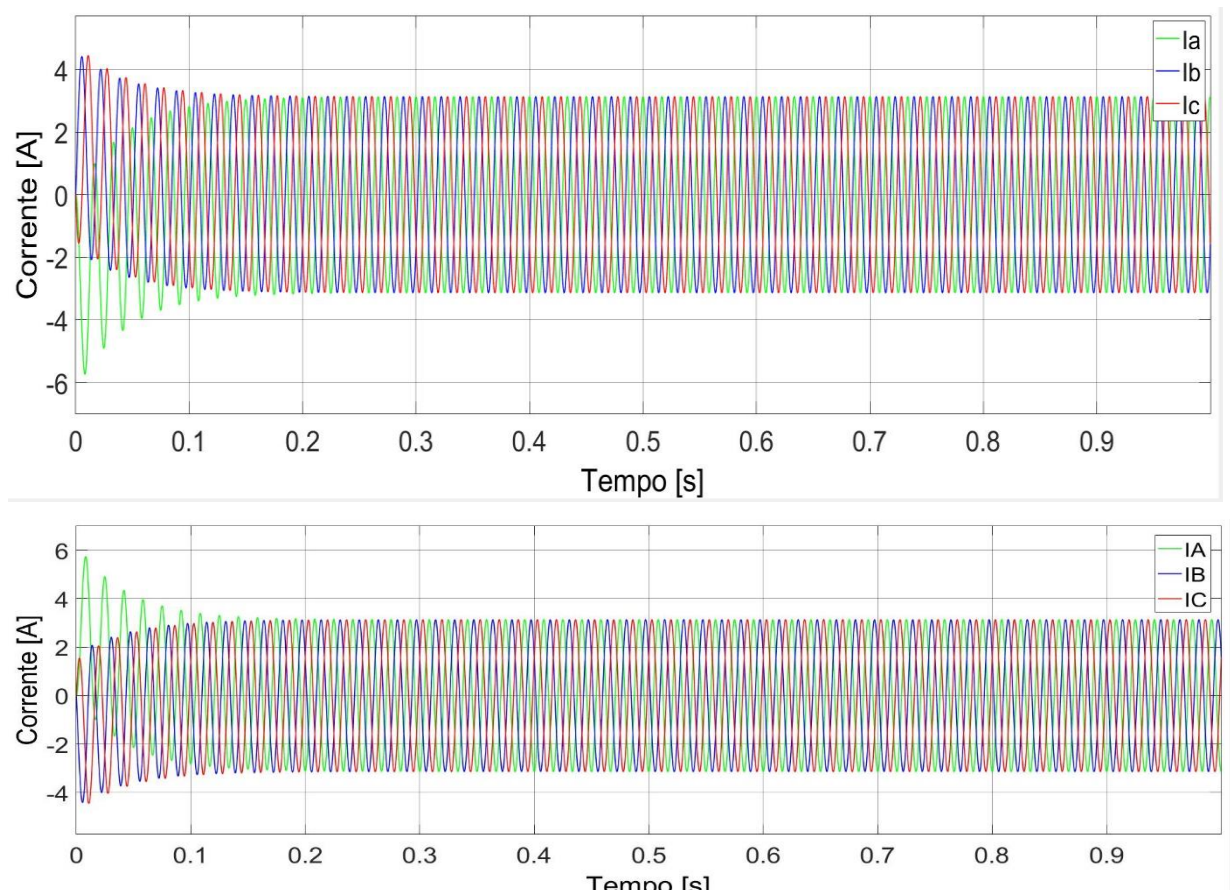
Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações de casos de faltas monofásicas-terra, bifásicas-terra, trifásicas-terra, faltas externas a zona protegida e regime sem faltas, de forma a validar o funcionamento do modelo desenvolvido. As simulações foram executadas com resistências de falta iguais a $0,001\Omega$; $0,01\Omega$; $0,1\Omega$ e 1Ω .

4.1 Regime sem faltas

Este capítulo apresenta os gráficos das características de funcionamento do sistema em operação sem faltas.

A Figura 11 mostra as correntes nas três fases do sistema, medidas na saída do gerador, no início da zona de proteção do gerador temos as correntes “Ia”, “Ib” e “Ic” vindas do TC1, e logo após as correntes “IA”, “IB” e “IC” no final da zona de proteção vindas do TC2.

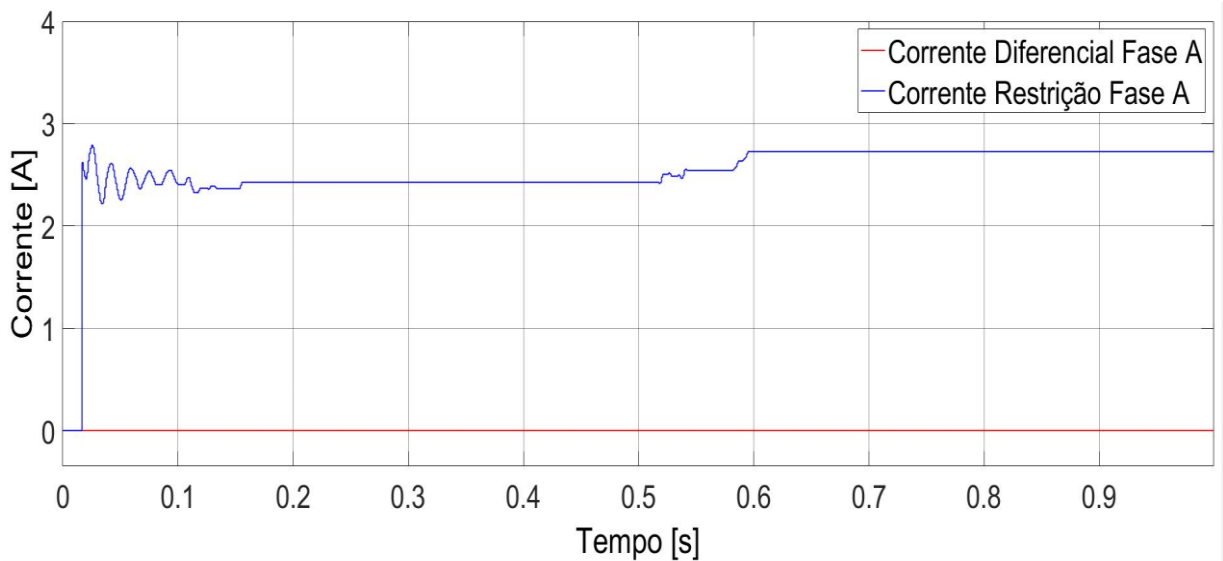
Figura 11 – Sinais de corrente no regime sem faltas



Fonte: Autoria Própria

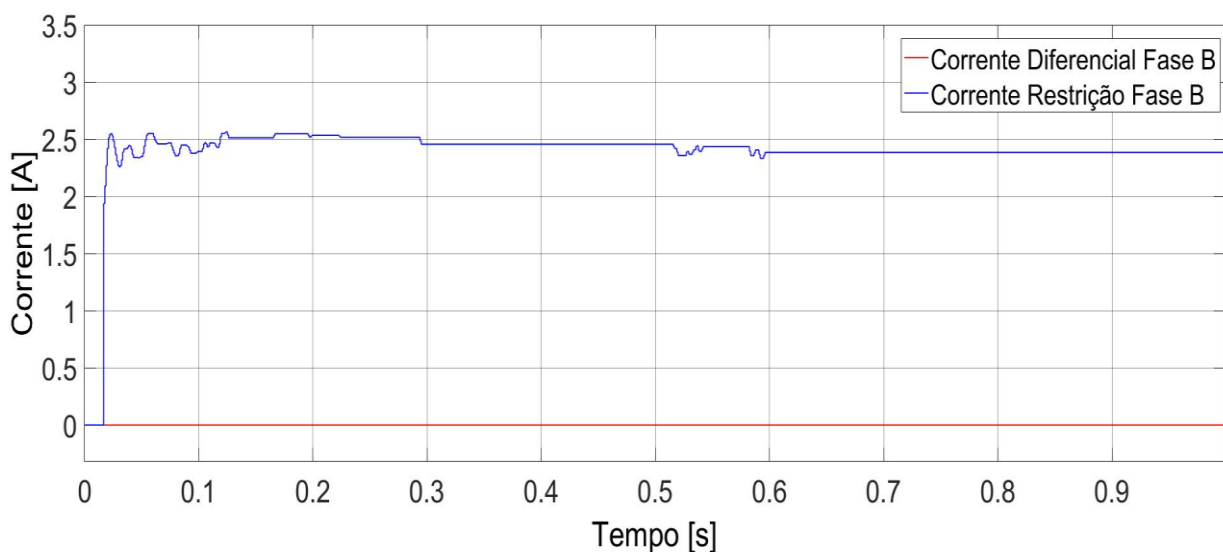
Devido à ausência de faltas no sistema, a relação entre os valores de corrente diferencial I_d e corrente de restrição I_r permanecem abaixo do limite mínimo de operação, onde temos a corrente diferencial em zero. As figuras 12, 13 e 14 apresentam as correntes diferencial e de restrição das fases A, B e C:

Figura 12 – Corrente diferencial e restrição da fase A em regime sem faltas



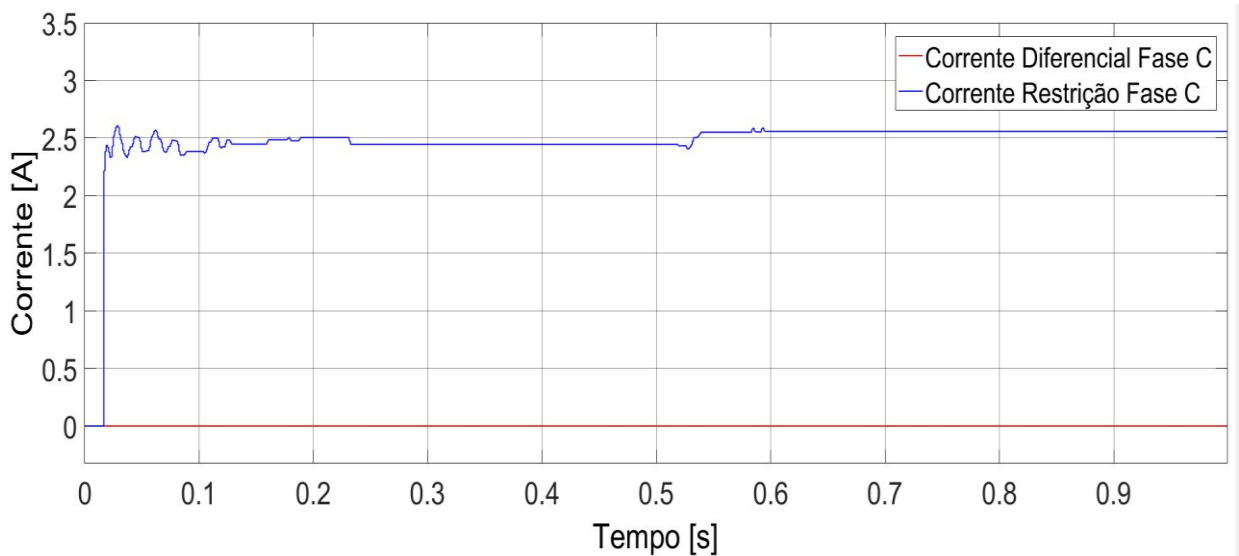
Fonte: Autoria Própria

Figura 13 – Corrente diferencial e restrição da fase B em regime sem faltas



Fonte: Autoria Própria

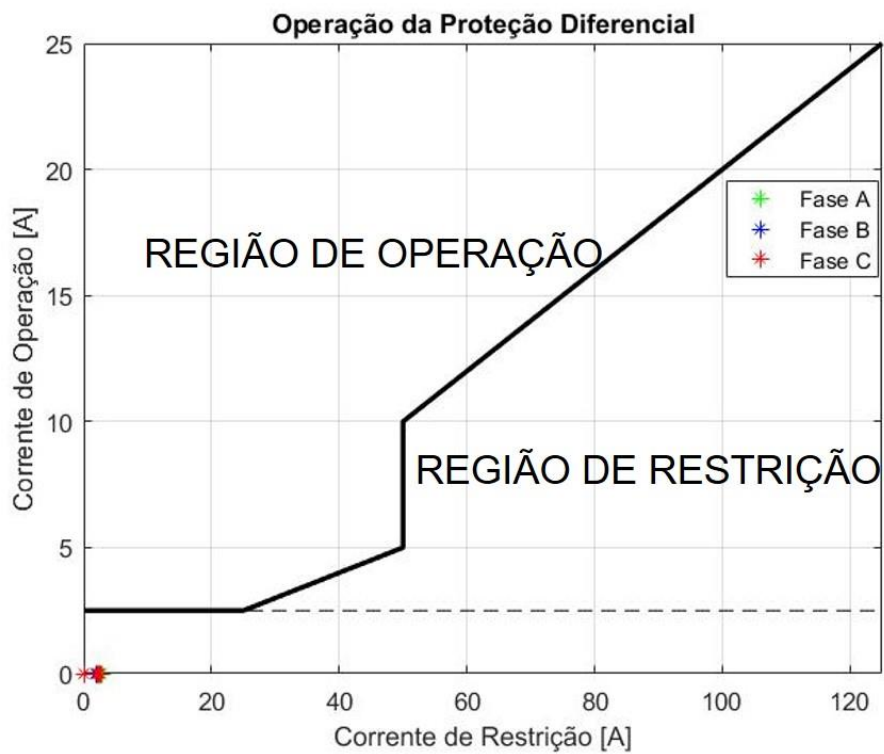
Figura 14 – Corrente diferencial e restrição da fase C em regime sem faltas



Fonte: Autoria Própria

A figura 15 representa a curva característica de operação do relé diferencial no regime sem faltas:

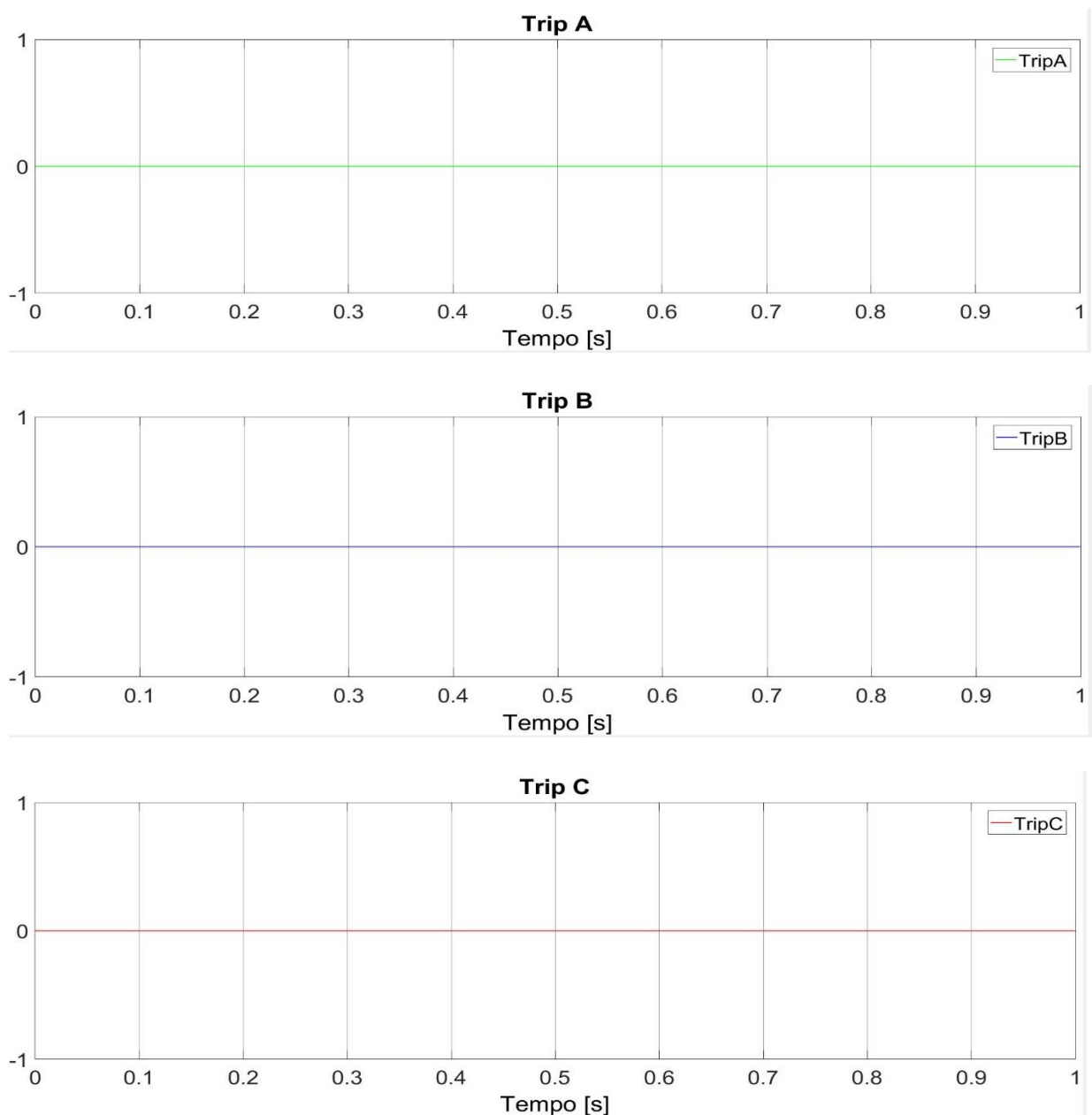
Figura 15 – Curva característica de operação do relé diferencial no regime sem faltas



Fonte: Autoria Própria

A Figura 16 mostra os sinais de TRIP (sinal enviado por um dispositivo de proteção para a abertura de um sistema quando há detecção de uma falta) para as fases A, B e C do sistema implementado, verificando a resposta do sinal de Trip, para ausência de faltas é enviado um sinal de nível lógico baixo 0 (zero) e para presença de faltas é enviado um sinal de nível lógico alto 1 (um).

Figura 16 – Sinais de TRIP das fases A, B e C no regime sem faltas



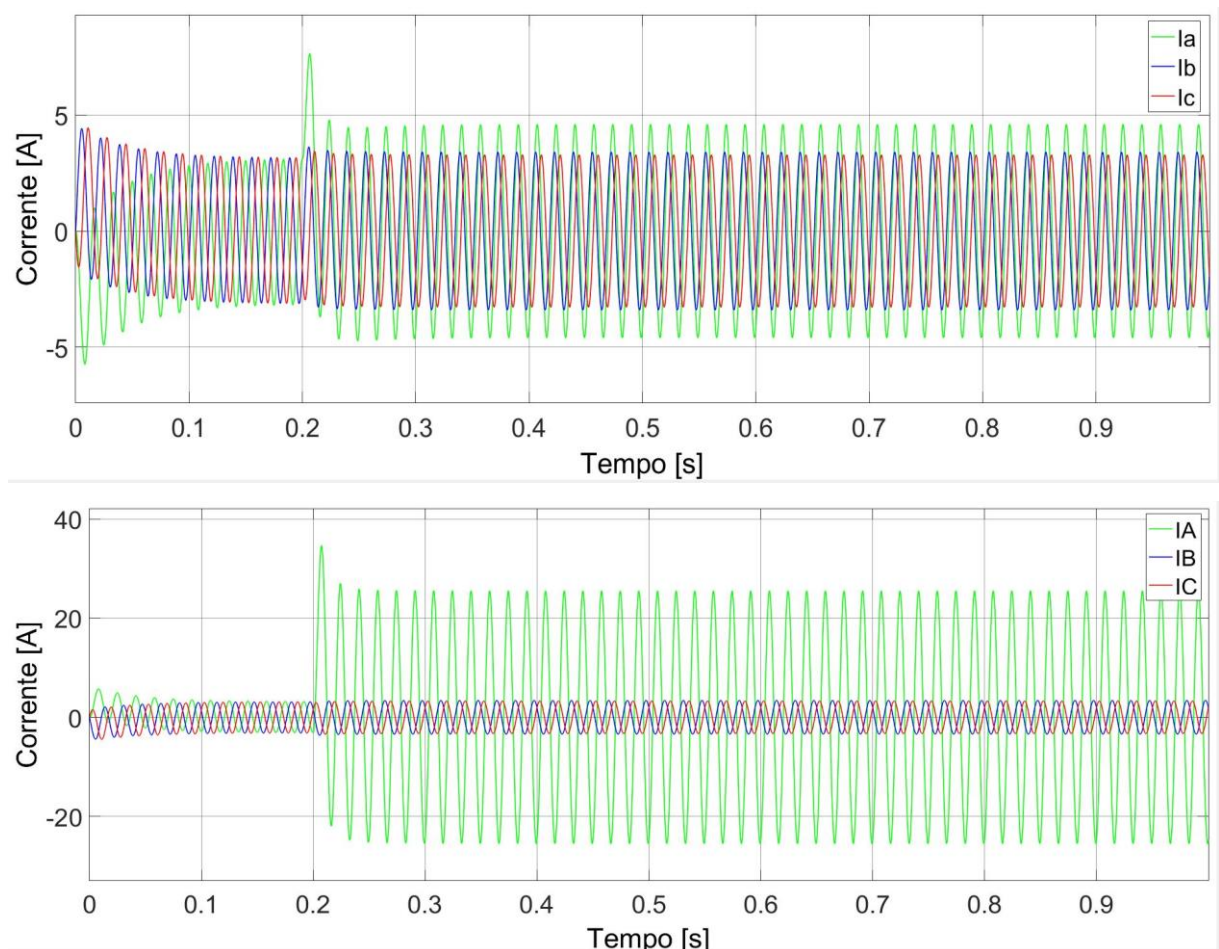
Fonte: Autoria Própria

Como esperado, devido à ausência de faltas no sistema, temos as correntes diferenciais das fases A, B e C resultando em zero mostrados nas figuras 12 a 14 e por consequência o sistema não entra em operação, a figura 15 mostra os sinais na zona de restrição e pela figura 16 vemos o não envio dos sinais de TRIP.

4.2 Falta monofásica-terra dentro e fora da zona protegida

Nesta seção serão apresentados os resultados envolvendo faltas monofásicas-terra na zona de proteção, com o objetivo de verificar os níveis das correntes de falta e analisar a atuação da proteção. A simulação foi realizada com uma falta monofásica-terra na fase A, que ocorre em $t = 0,2$ segundos. Os resultados são apresentados nas figuras 17 a 22, mostrando os sinais de correntes das três fases na saída do gerador, as correntes diferencial e de restrição, os resultados de TRIP e a curva característica de operação do relé diferencial.

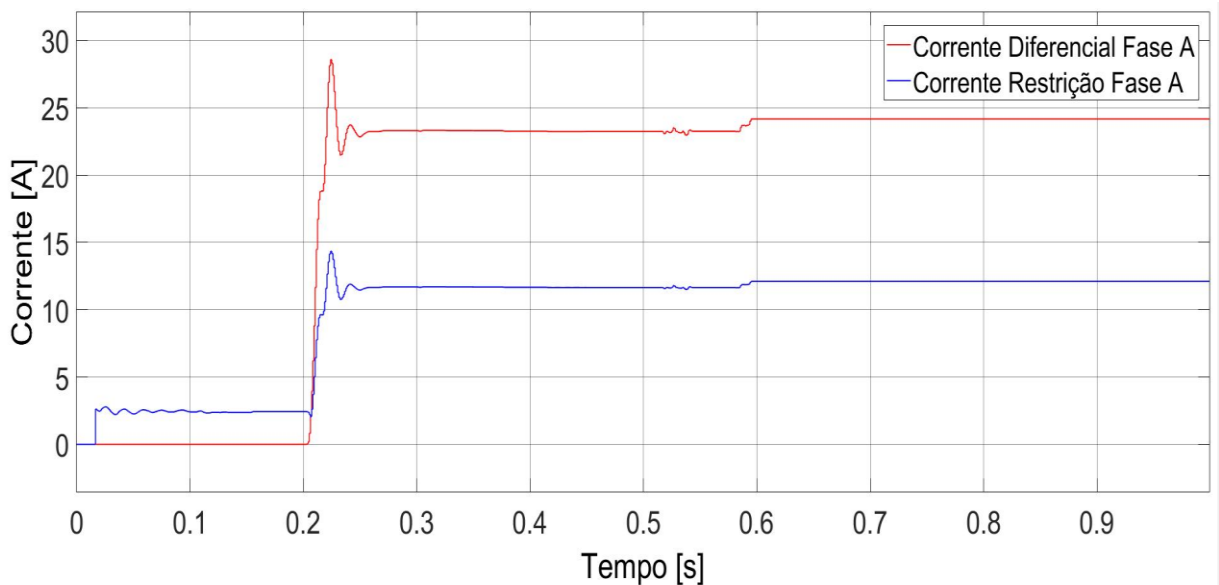
Figura 17 – Sinais de corrente para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

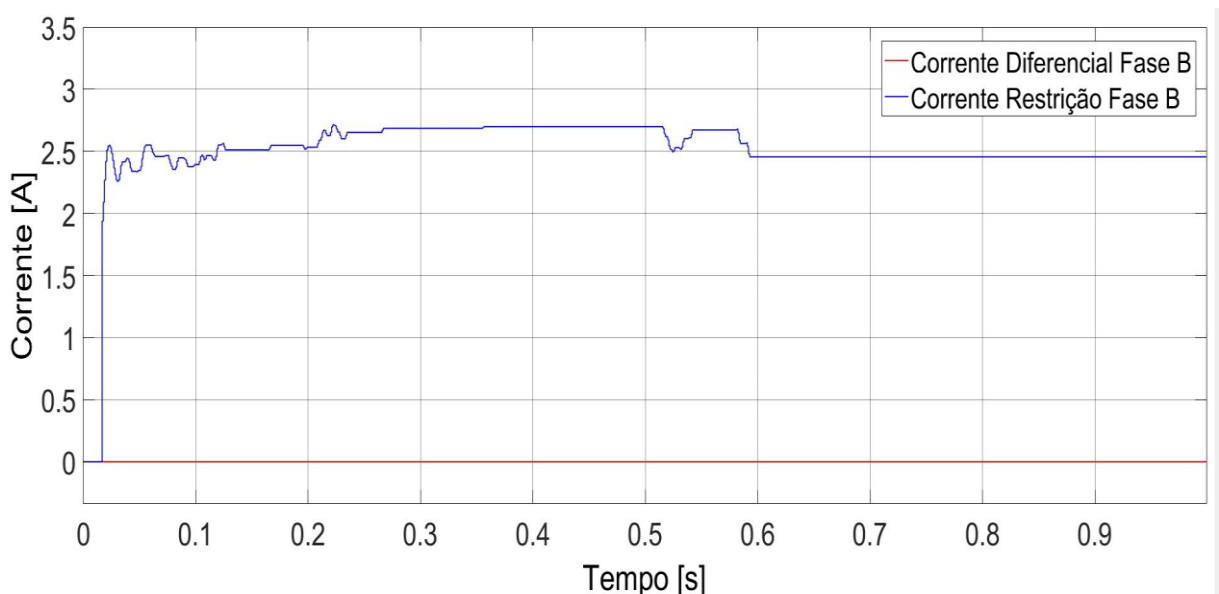
É observado na figura 17 um aumento significativo de corrente na fase A devido à falta monofásica, alterando seu módulo, como resultado da alteração temos uma corrente diferencial somente na fase A, como é mostrado na figura 18. As correntes diferenciais das fases B e C permanecem zero, apresentado nas figuras 19 e 20.

Figura 18 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida



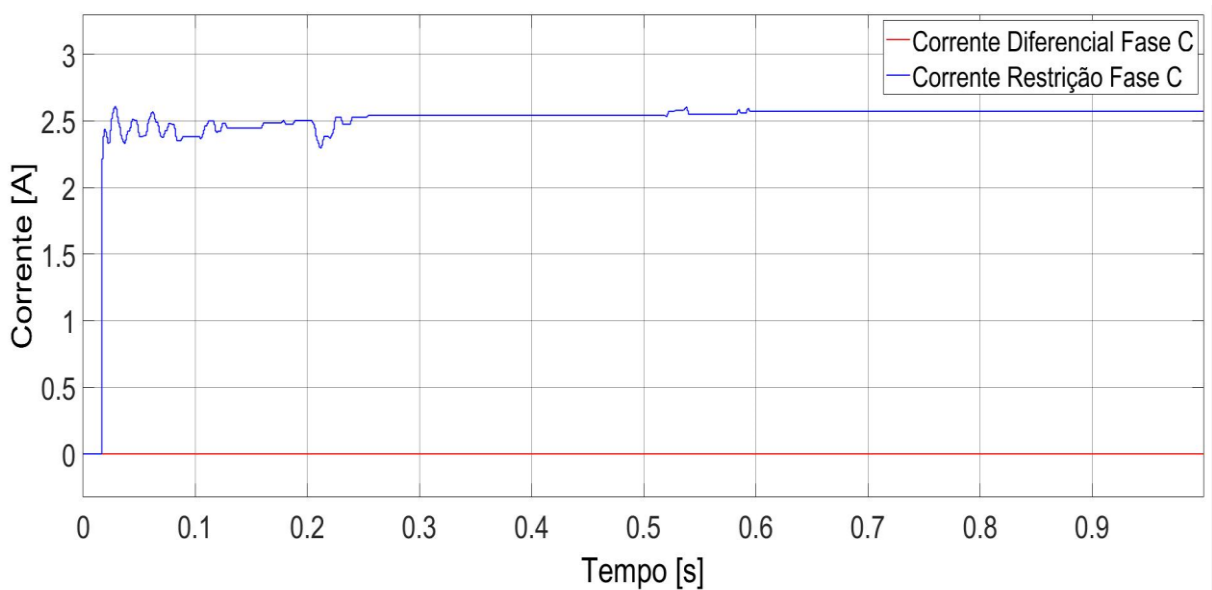
Fonte: Autoria Própria

Figura 19 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida



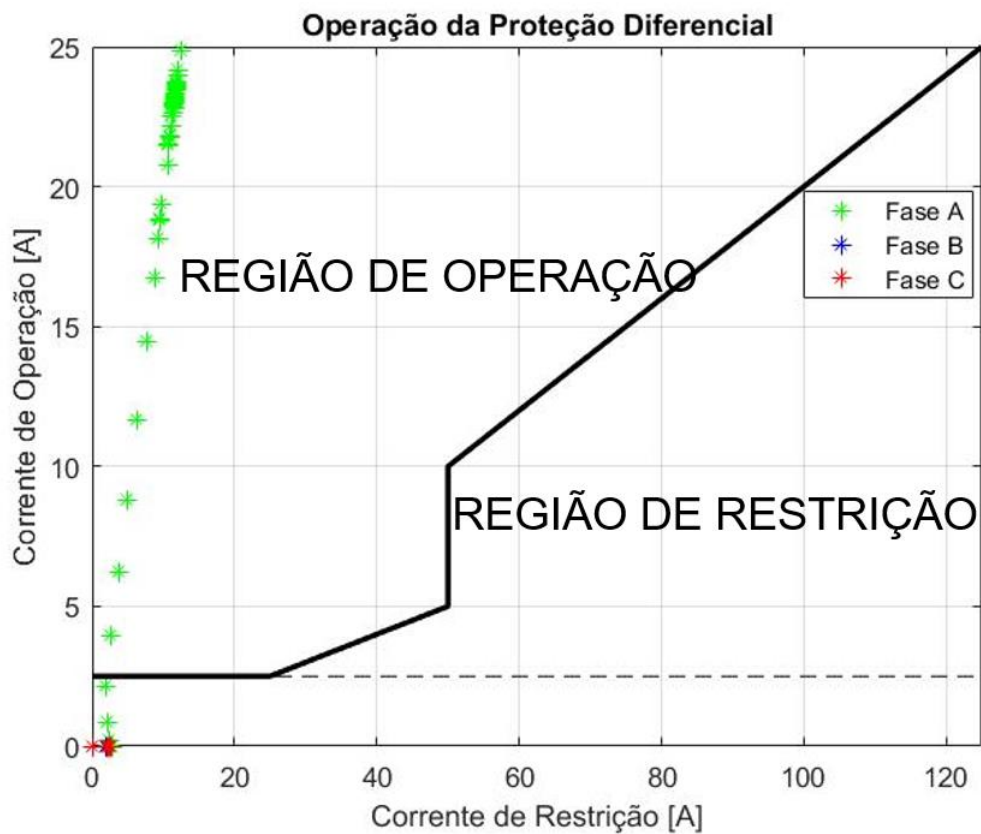
Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida



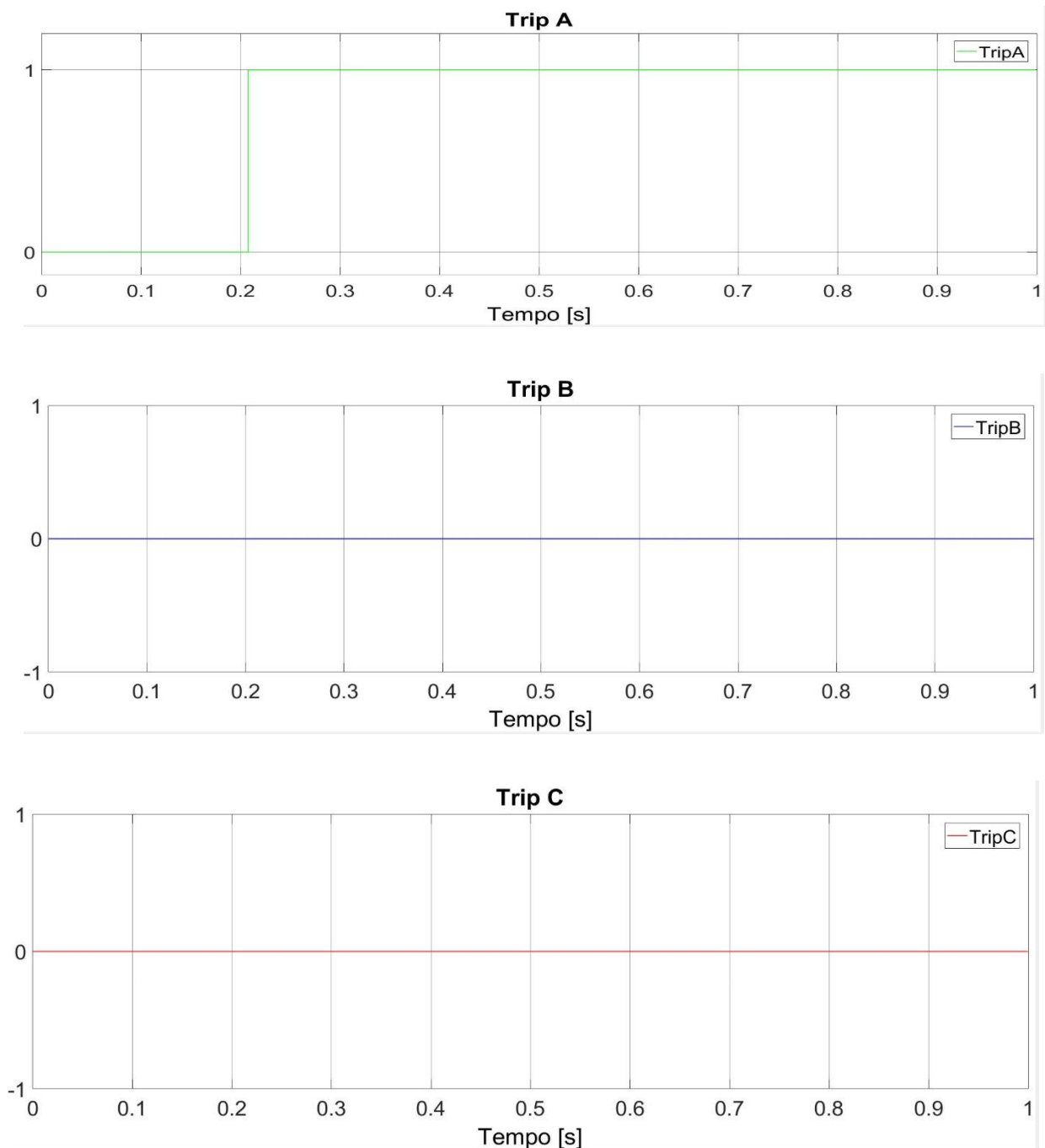
Fonte: Autoria Própria

Figura 21 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

Figura 22 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta monofásica-terra dentro da zona protegida

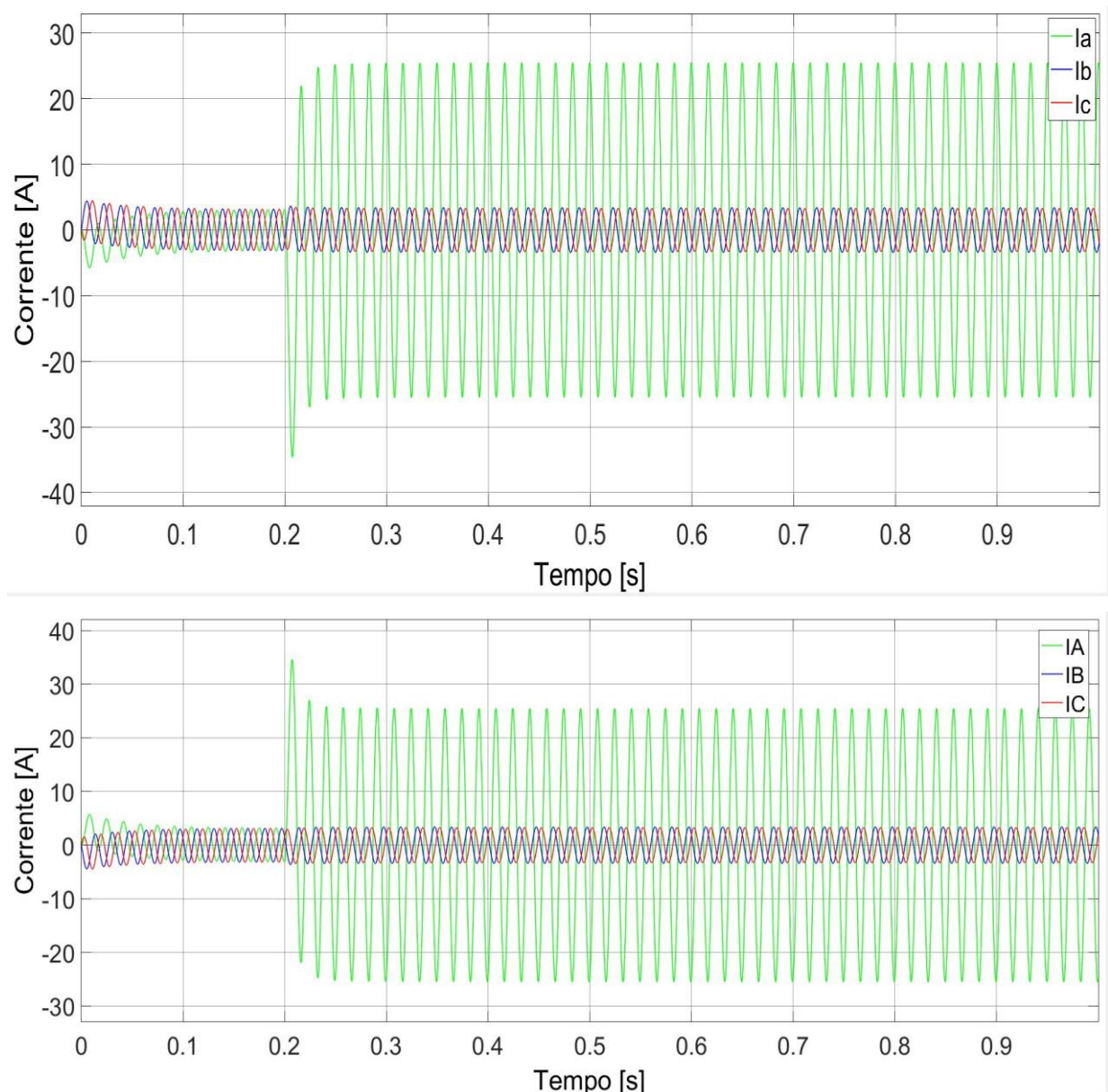


Fonte: Autoria Própria

Como observado na figura 21, temos somente os sinais da fase A na zona de operação, enquanto os sinais das fases B e C encontram-se na zona de restrição. De acordo com a figura 22 observamos que somente o envio do sinal de TRIP da fase A, mostrando assim que as exigências do sistema operacional foram atendidas.

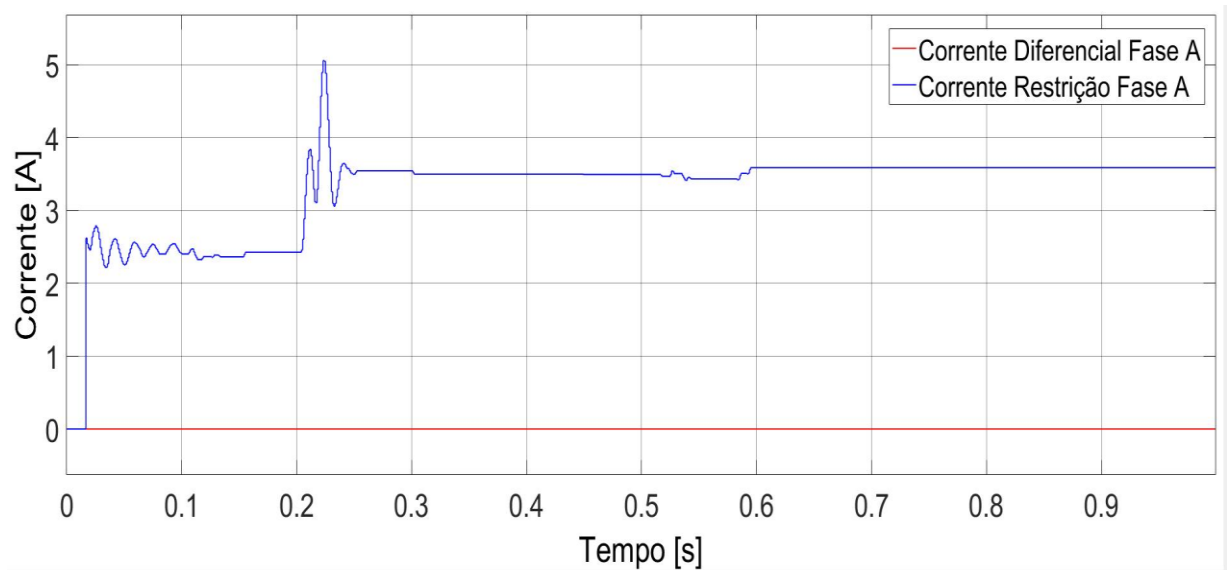
De forma semelhante foi realizada uma falta monofásica-terra fora da zona de proteção do relé diferencial do gerador, a fim de analisar a operação da proteção quando aplicado uma falta externa. As figuras 23 a 28 mostram os resultados encontrados.

Figura 23 – Sinais de corrente para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida



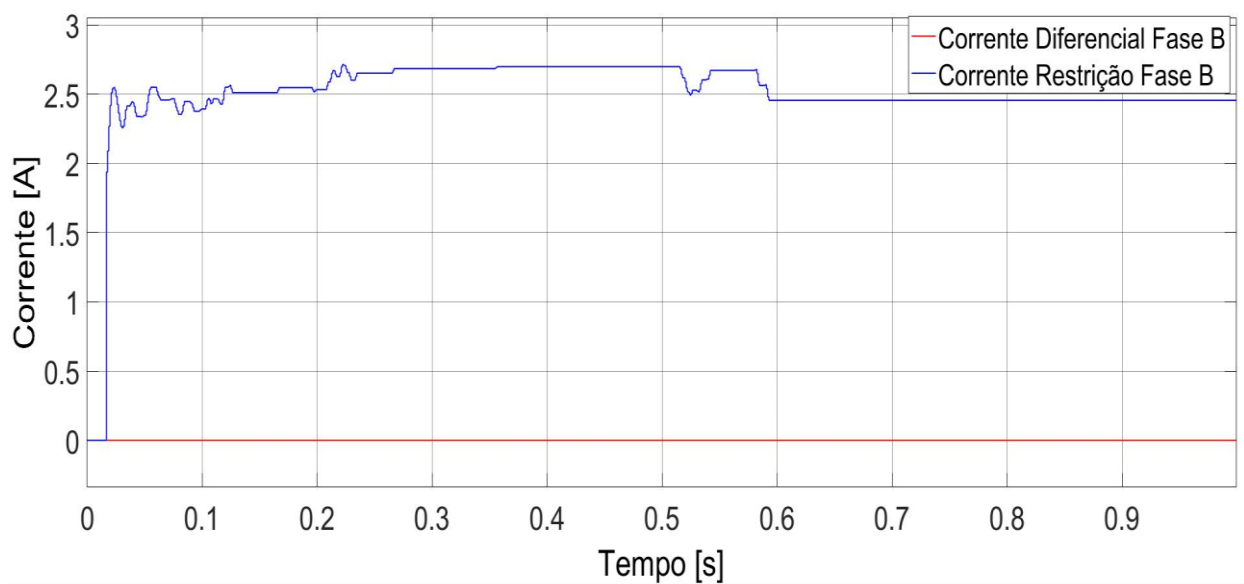
Fonte: Autoria Própria

Figura 24 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida



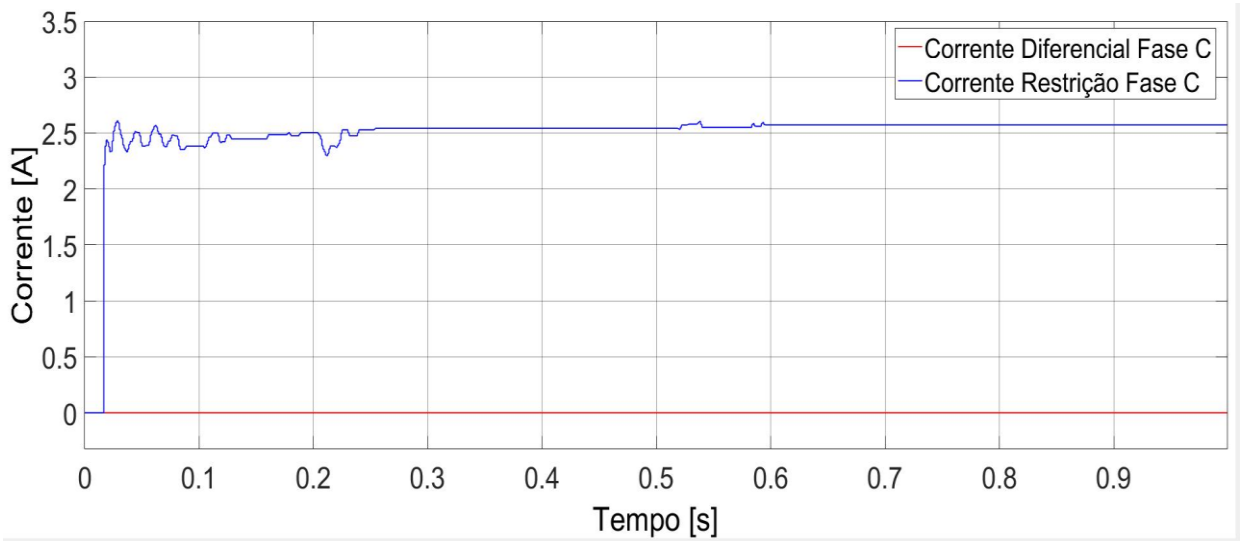
Fonte: Autoria Própria

Figura 25 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida



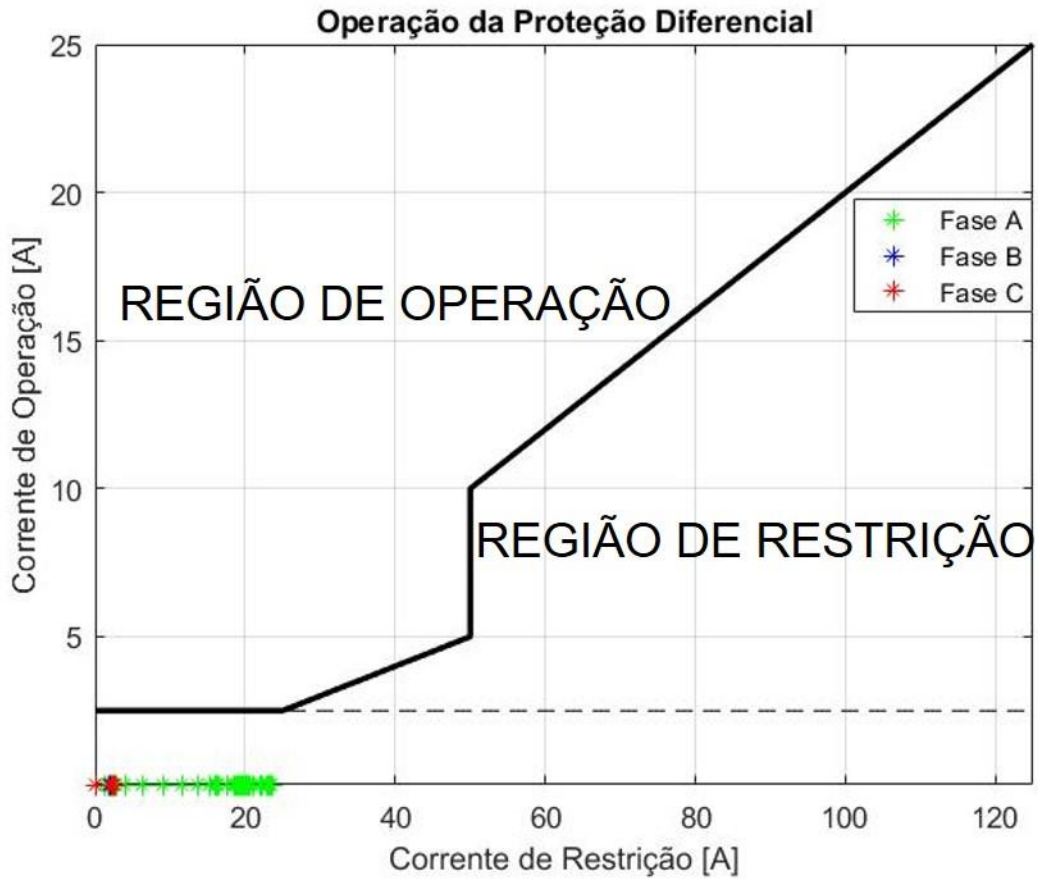
Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida



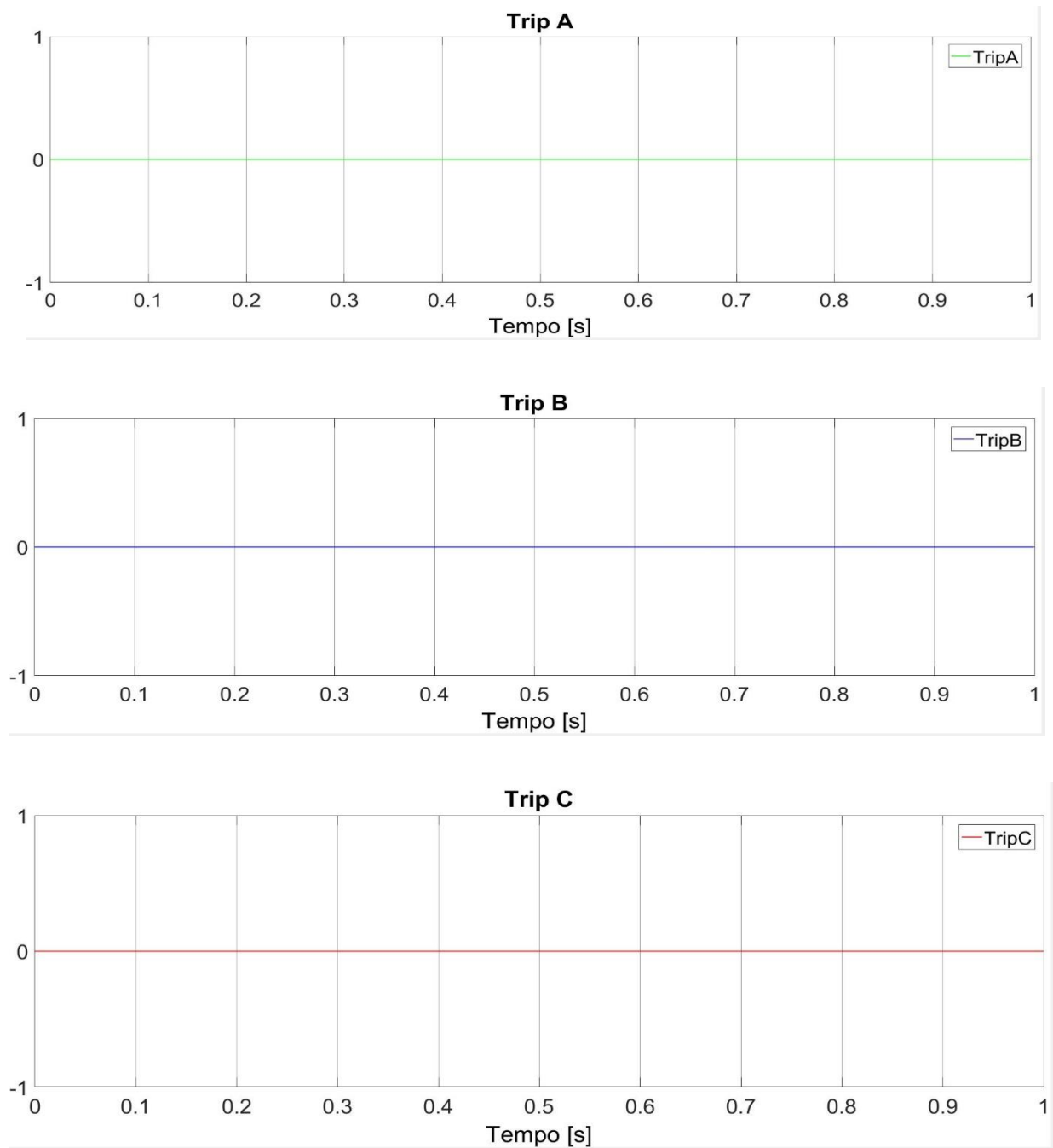
Fonte: Autoria Própria

Figura 27 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

Figura 28 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta monofásica-terra fora da zona protegida



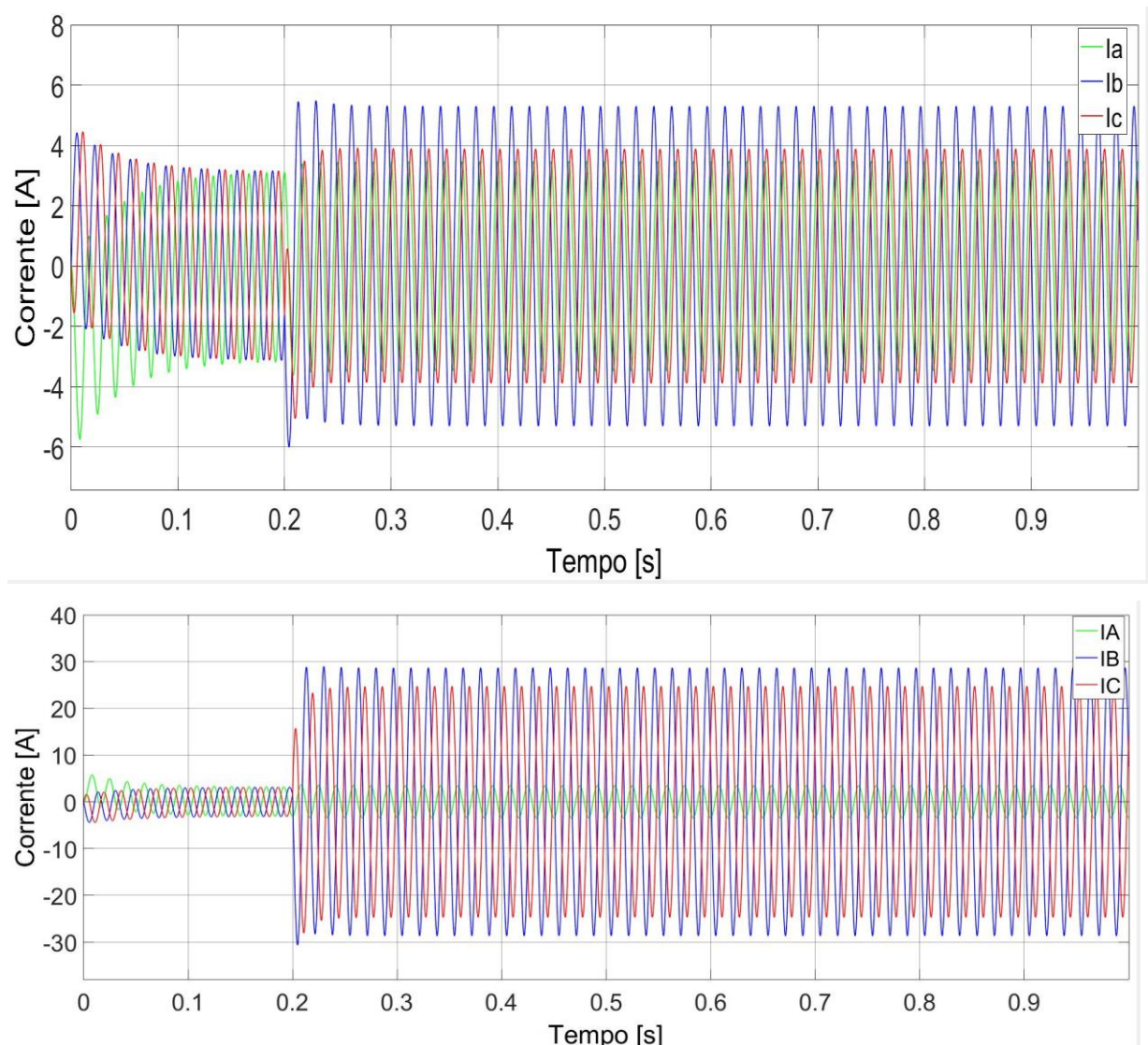
Fonte: Autoria Própria

Como esperado, a falta externa mesmo causando uma elevação da corrente na fase A visto na figura 23, temos as correntes diferenciais das fases A, B e C resultando em zero mostrados nas figuras 24 a 26 e por consequência o sistema não entra em operação, a figura 27 mostra os sinais na zona de restrição e pela figura 28 vemos o não envio dos sinais de TRIP.

4.3 Falta bifásica-terra dentro e fora da zona protegida

Nesta seção serão apresentados os resultados envolvendo faltas bifásicas-terra na zona de proteção. A simulação foi realizada com uma falta bifásica-terra nas fases B e C, que ocorre em $t = 0,2$ segundos. Os resultados são apresentados nas figuras 29 a 34, mostrando os sinais de correntes das três fases na saída do gerador, as correntes diferencial e de restrição, os resultados de TRIP e a curva característica de operação do relé diferencial.

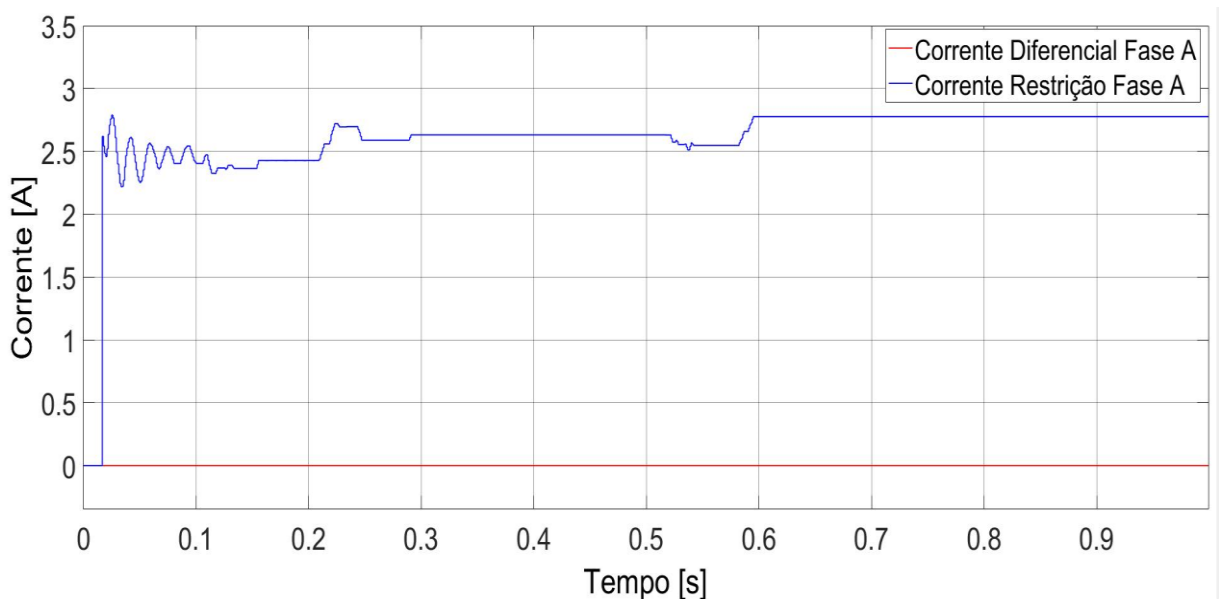
Figura 29 – Sinais de corrente para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

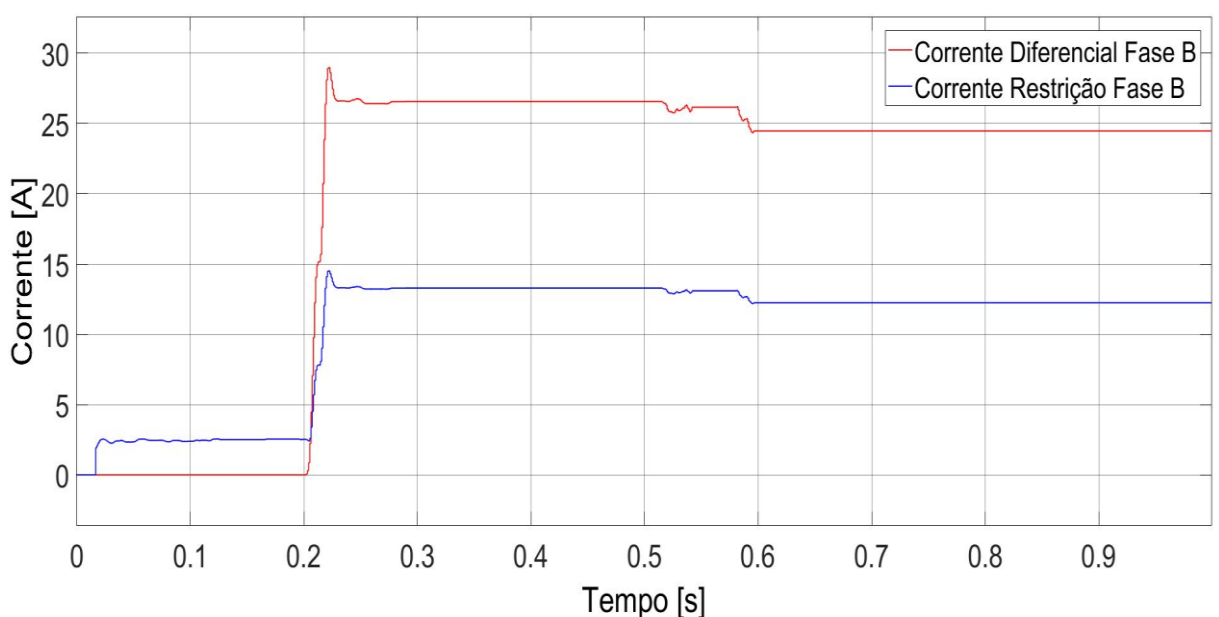
É observado na figura 29 um aumento significativo de corrente nas fases B e C devido à falta bifásica, alterando seu módulo, como resultado da alteração temos corrente diferencial nas fases B e C, representado nas figuras 31 e 32. Devido a alteração somente nas fases B e C, a corrente diferencial na fase A permanece zero, como pode ser visto na figura 30.

Figura 30 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida



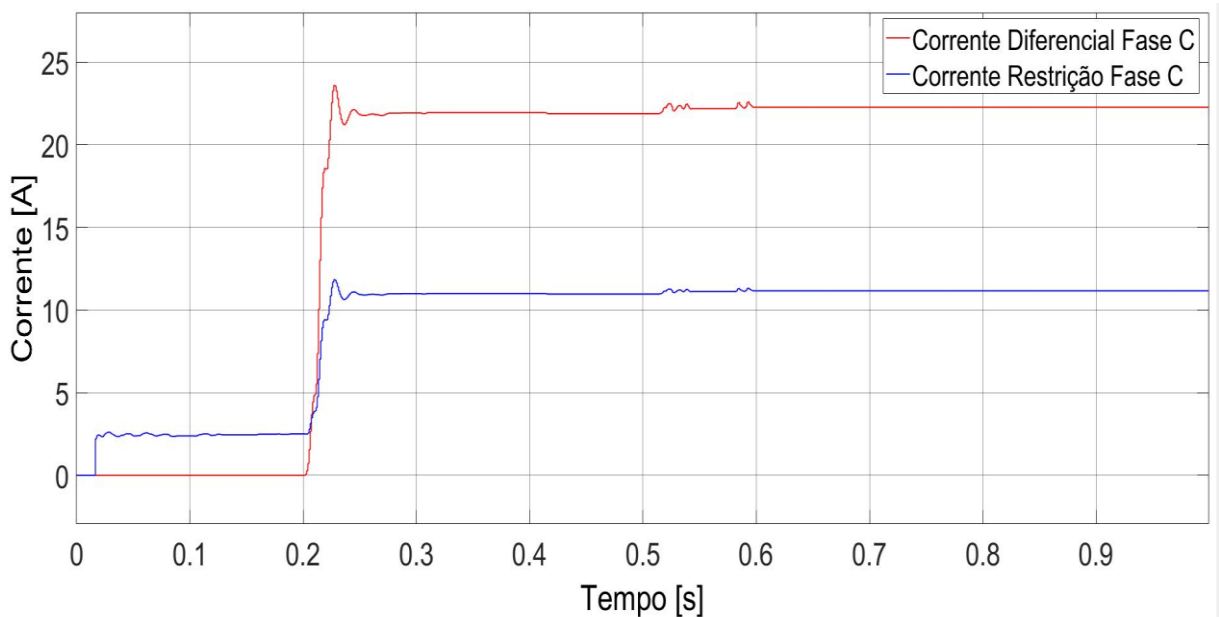
Fonte: Autoria Própria

Figura 31 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida



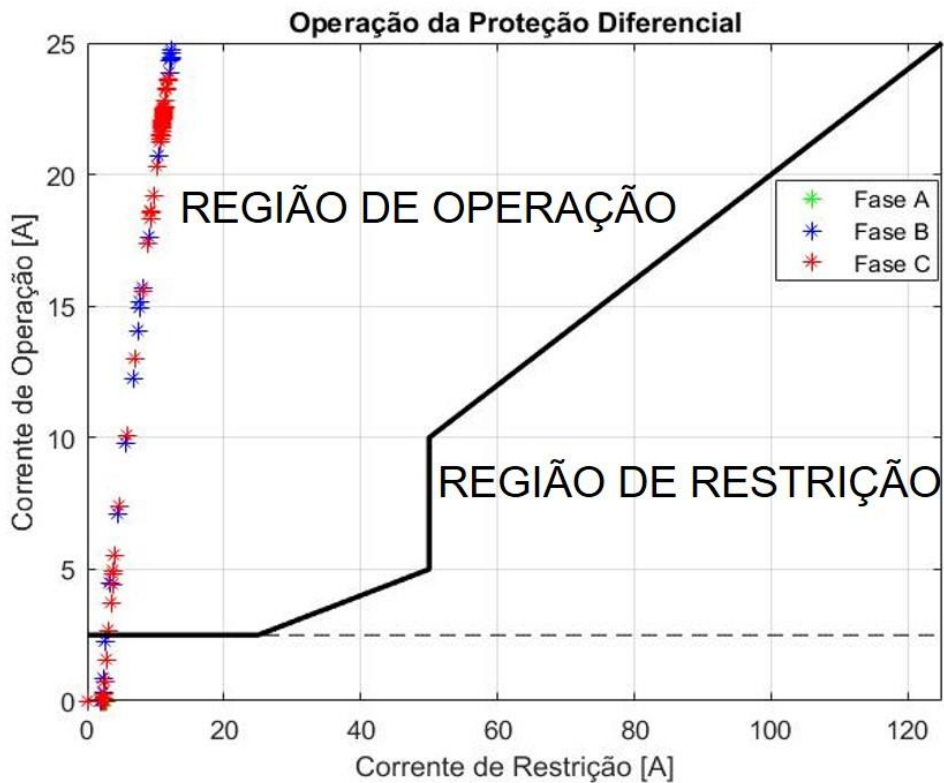
Fonte: Autoria Própria

Figura 32 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida



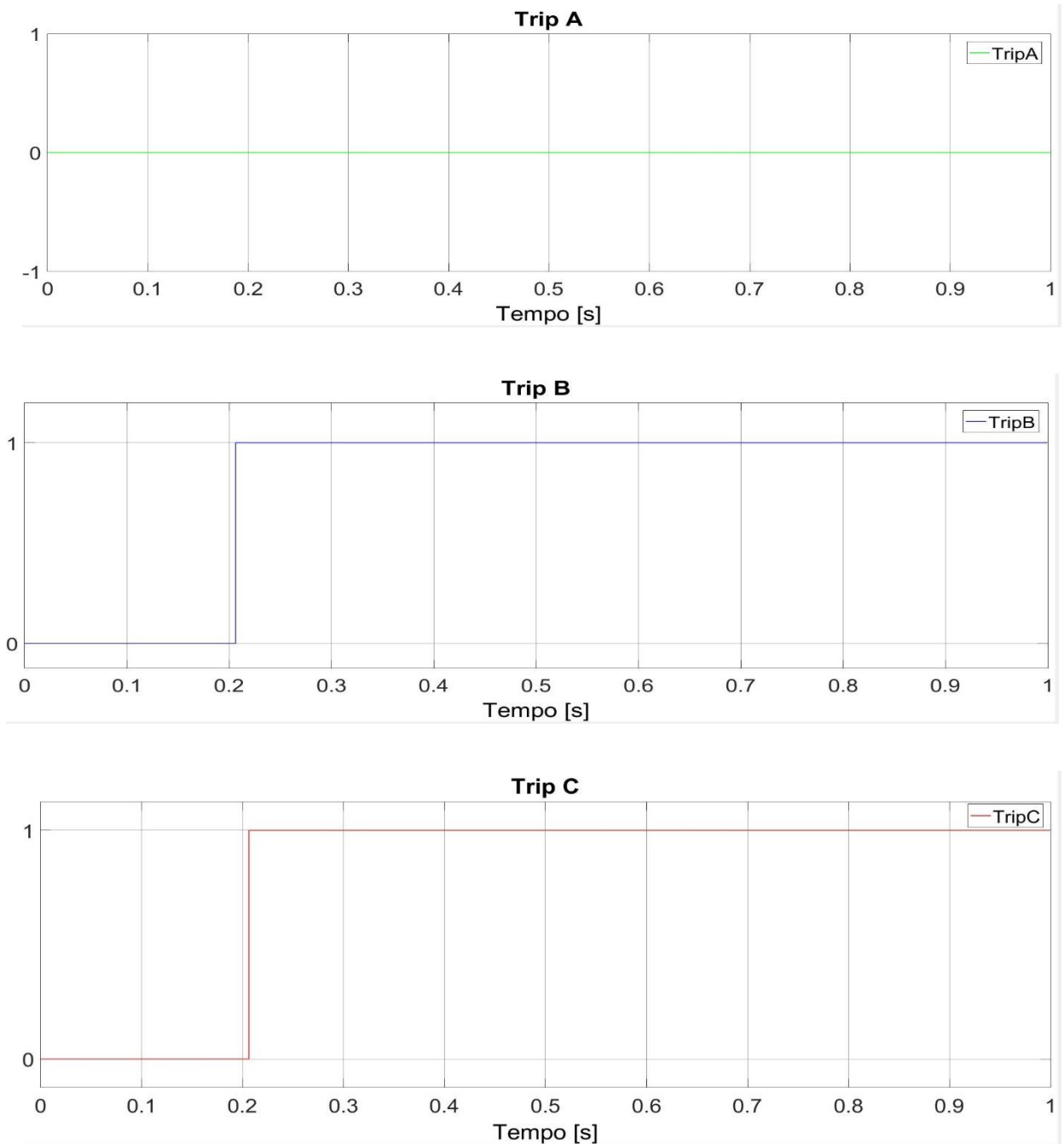
Fonte: Autoria Própria

Figura 33 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

Figura 34 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta bifásica-terra dentro da zona protegida

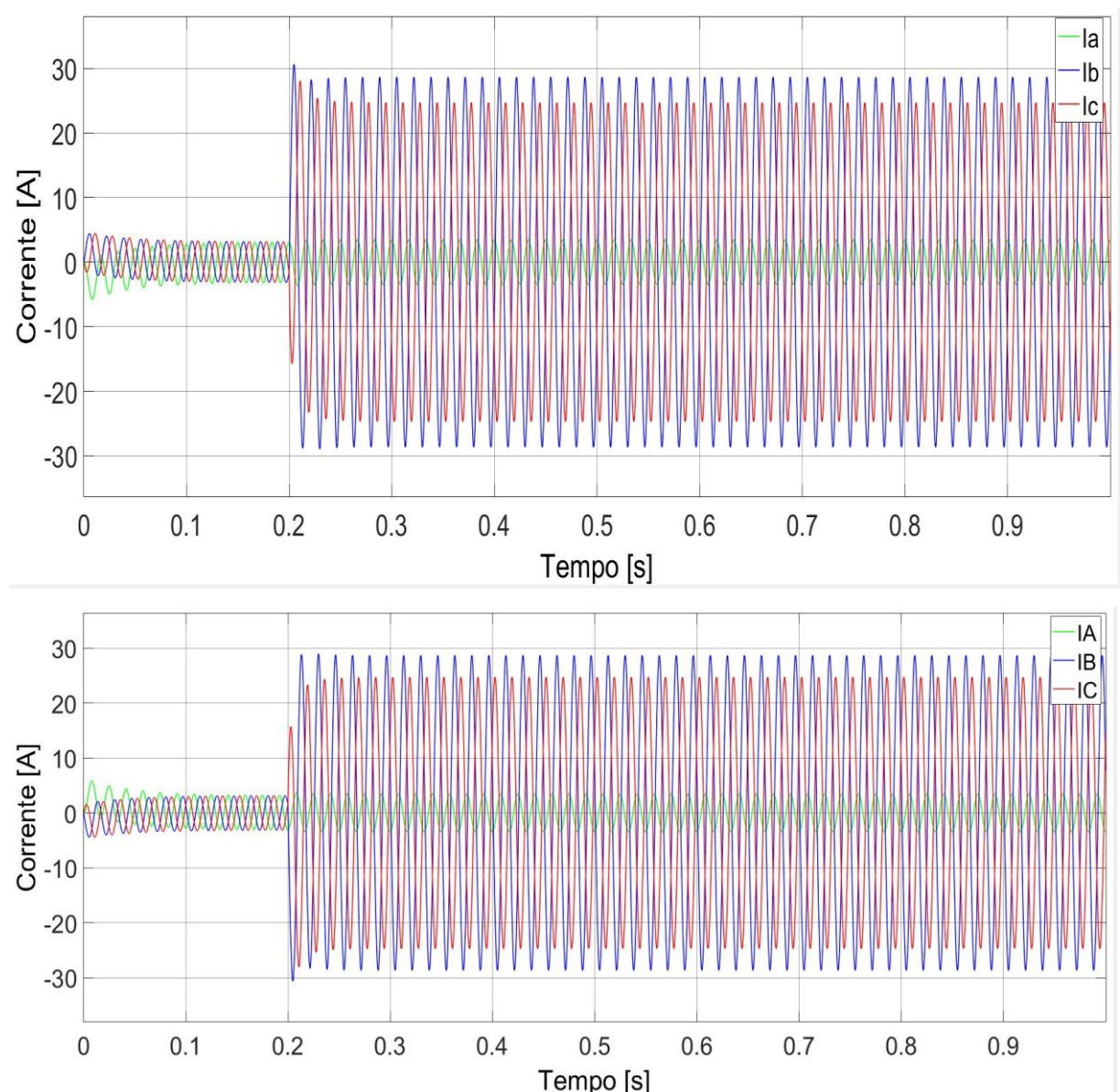


Fonte: Autoria Própria

O gráfico na figura 33 mostra os sinais das fases B e C na zona de operação, enquanto os sinais da fase A encontram-se na zona de restrição. De acordo com a figura 34 observamos o envio dos sinais de TRIP das fases B e C, atendendo novamente exigências do sistema operacional, neste caso para uma falta bifásica-terra.

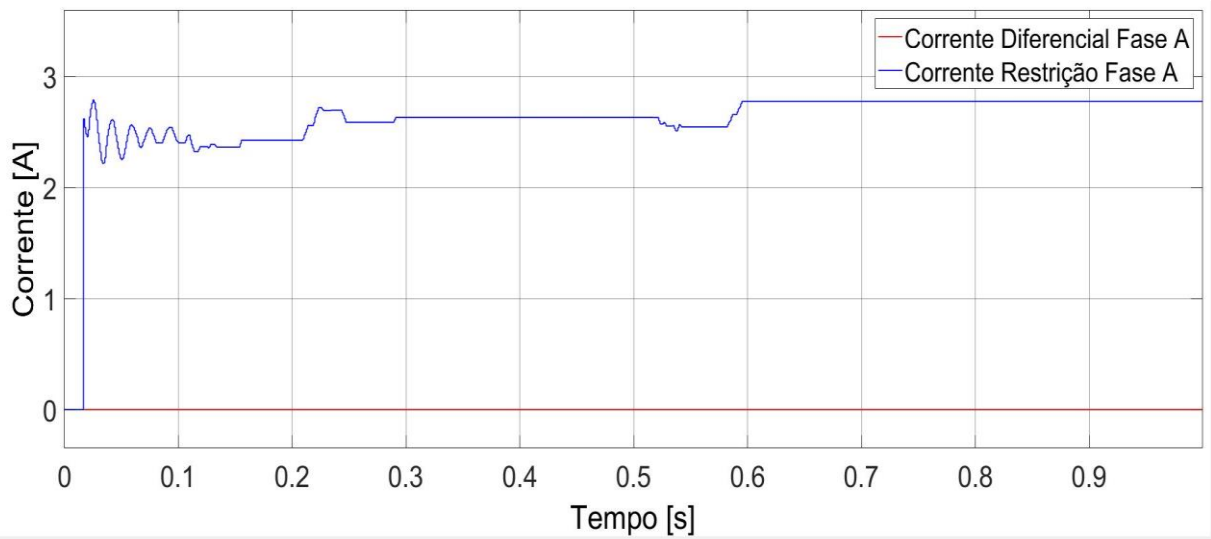
De forma semelhante, foi realizada uma falta bifásica-terra fora da zona de proteção do relé diferencial do gerador, a fim de analisar a operação da proteção quando aplicado uma falta bifásica-terra externa a zona de proteção. As figuras 35 a 40 mostram os resultados encontrados.

Figura 35 – Sinais de corrente para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida



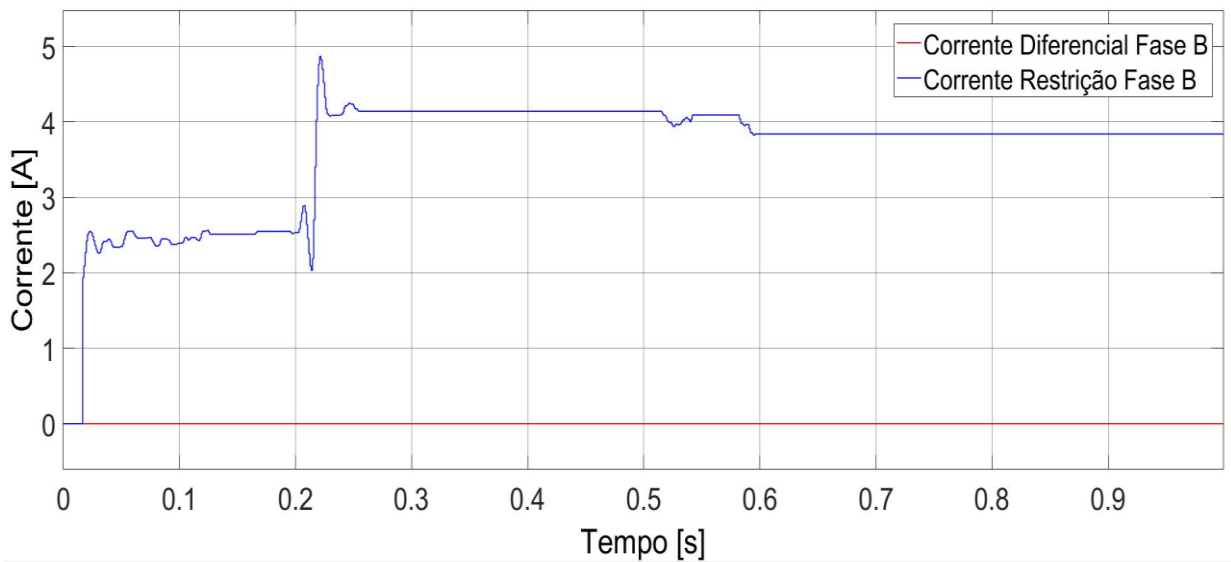
Fonte: Autoria Própria

Figura 36 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida



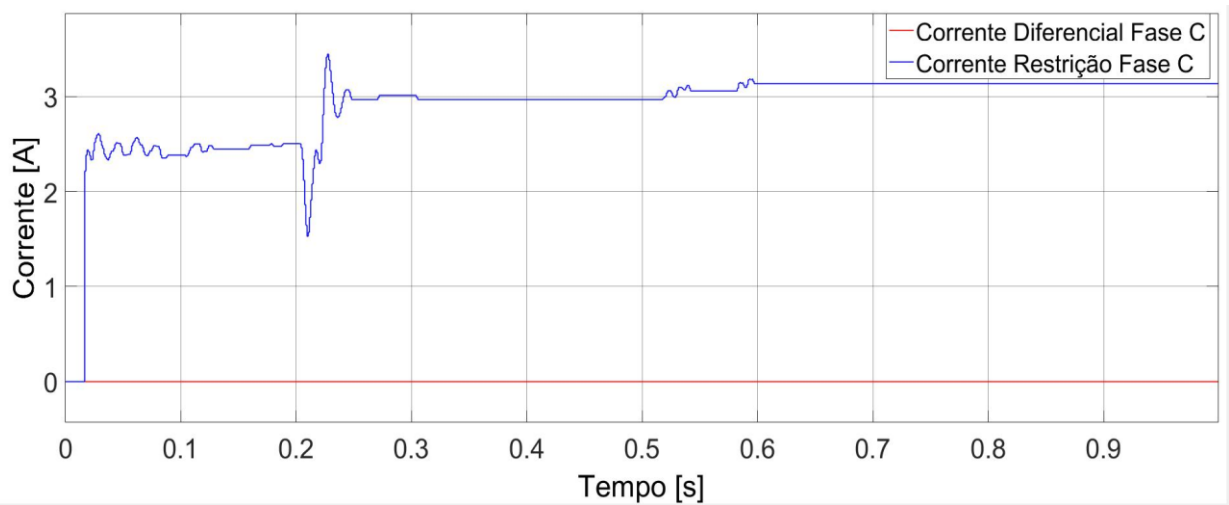
Fonte: Autoria Própria

Figura 37 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida



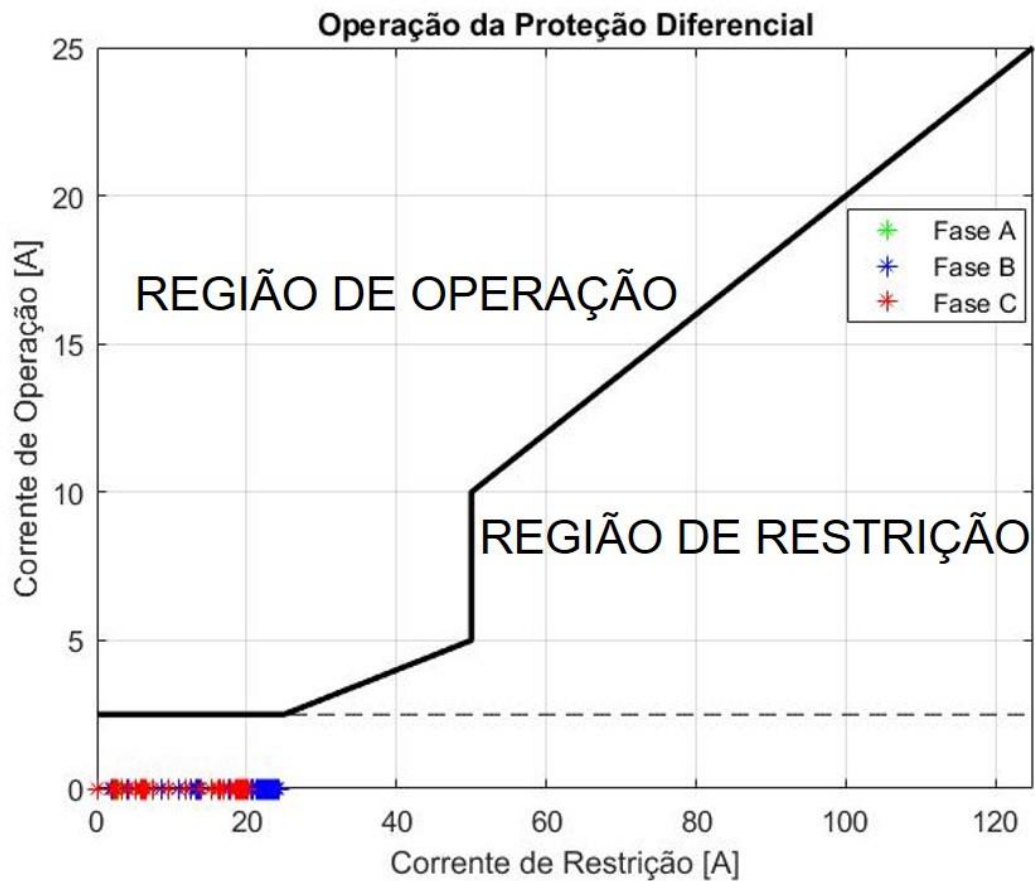
Fonte: Autoria Própria

Figura 38 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida

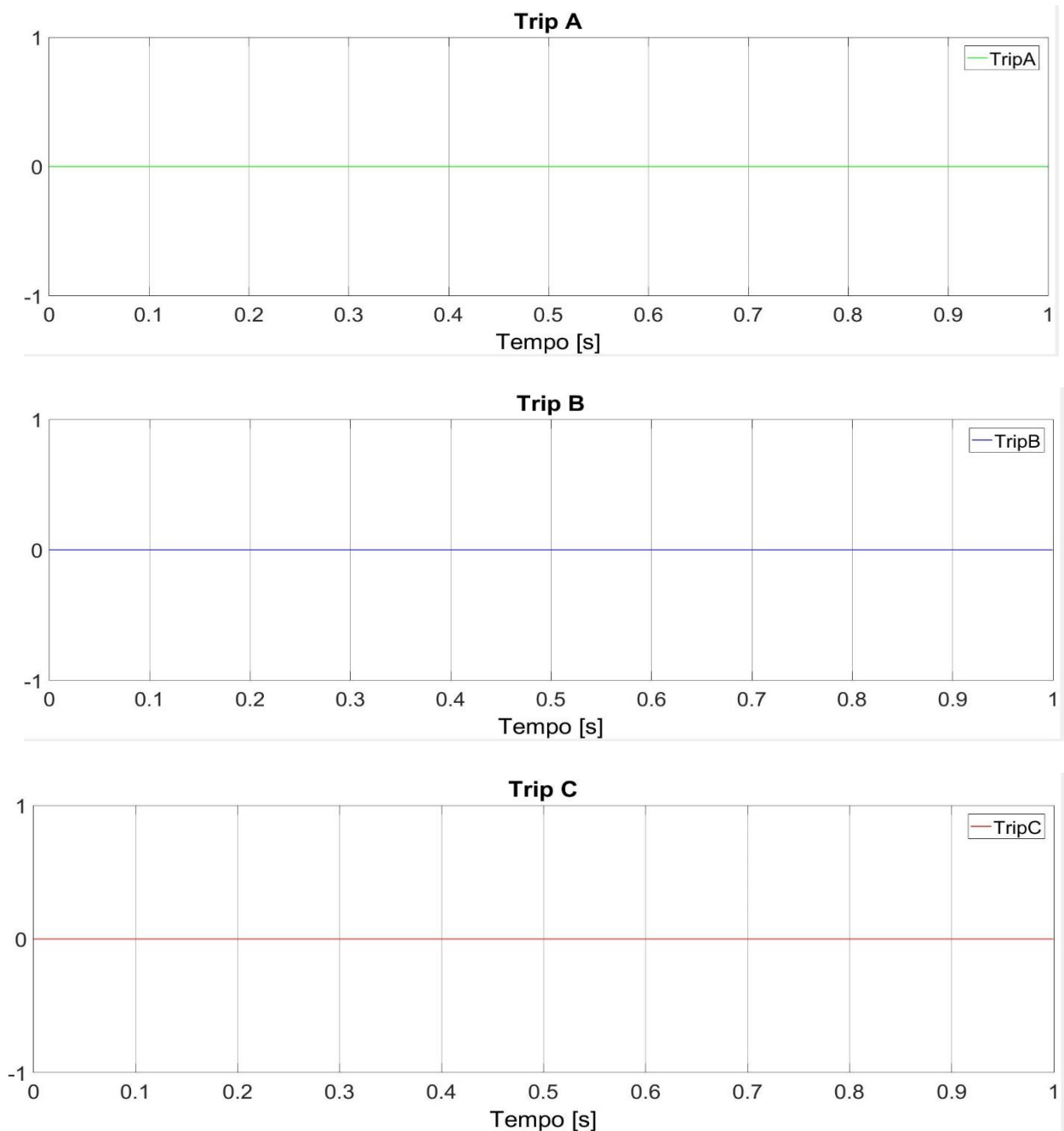


Fonte: Autoria Própria

Figura 39 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

Figura 40 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta bifásica-terra fora da zona protegida

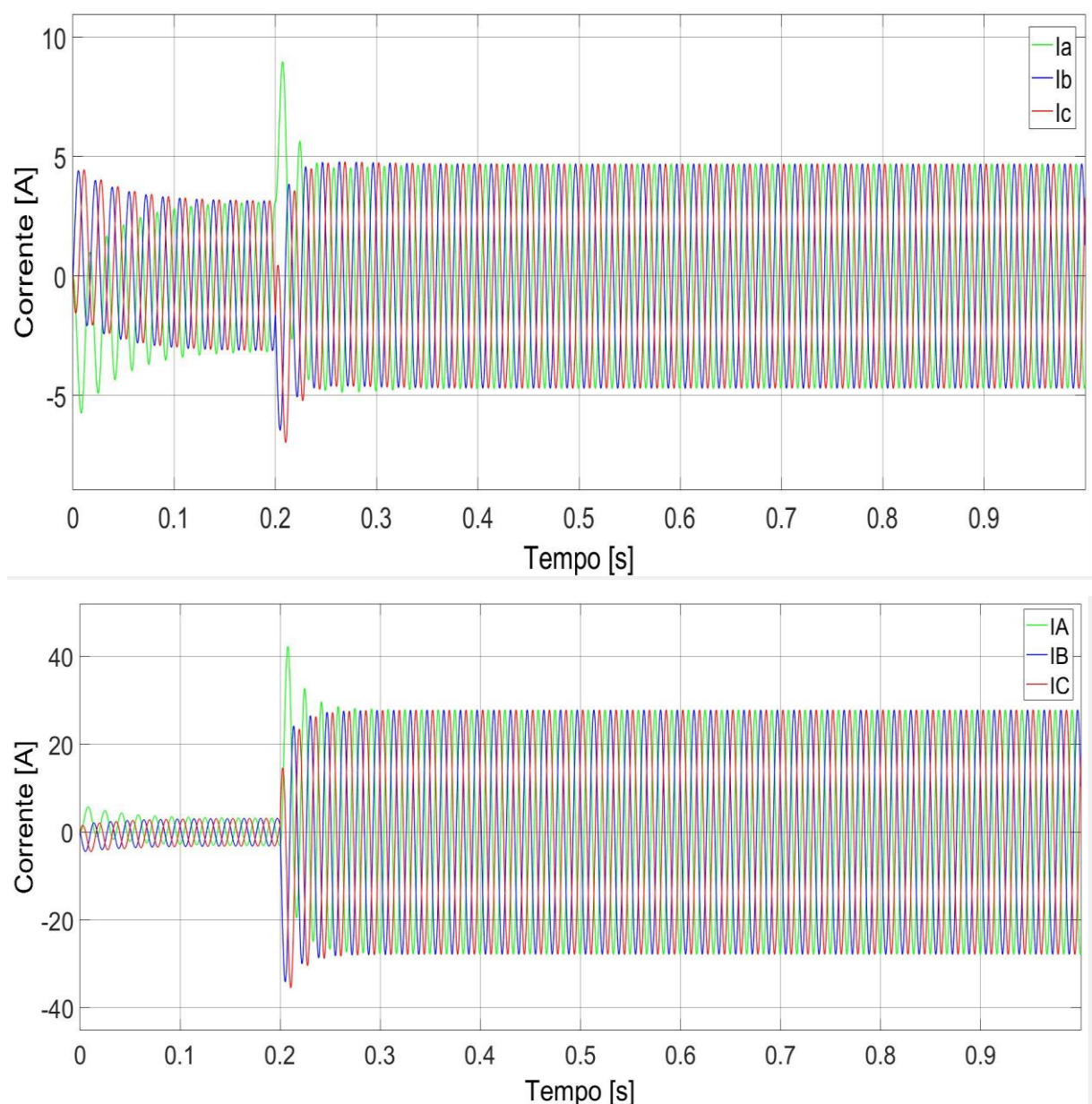
Fonte: Autoria Própria

Como esperado, a falta externa mesmo causando uma elevação da corrente nas fases B e C visto na figura 35, temos as correntes diferenciais das fases A, B e C resultando em zero mostrados nas figuras 36 a 38 e por consequência o sistema não entra em operação, a figura 39 mostra os sinais das fases A, B e C na zona de restrição e pela figura 40 vemos o não envio dos sinais de TRIP.

4.4 Falta trifásica-terra dentro e fora da zona protegida

Nesta seção serão apresentados os resultados envolvendo faltas trifásicas-terra na zona de proteção. A simulação foi realizada com uma falta trifásica-terra nas fases A, B e C que ocorre em $t = 0,2$ segundos. Os resultados são apresentados nas figuras 41 a 46, mostrando os sinais de correntes das três fases na saída do gerador, as correntes diferencial e de restrição, os resultados de TRIP e a curva característica de operação do relé diferencial.

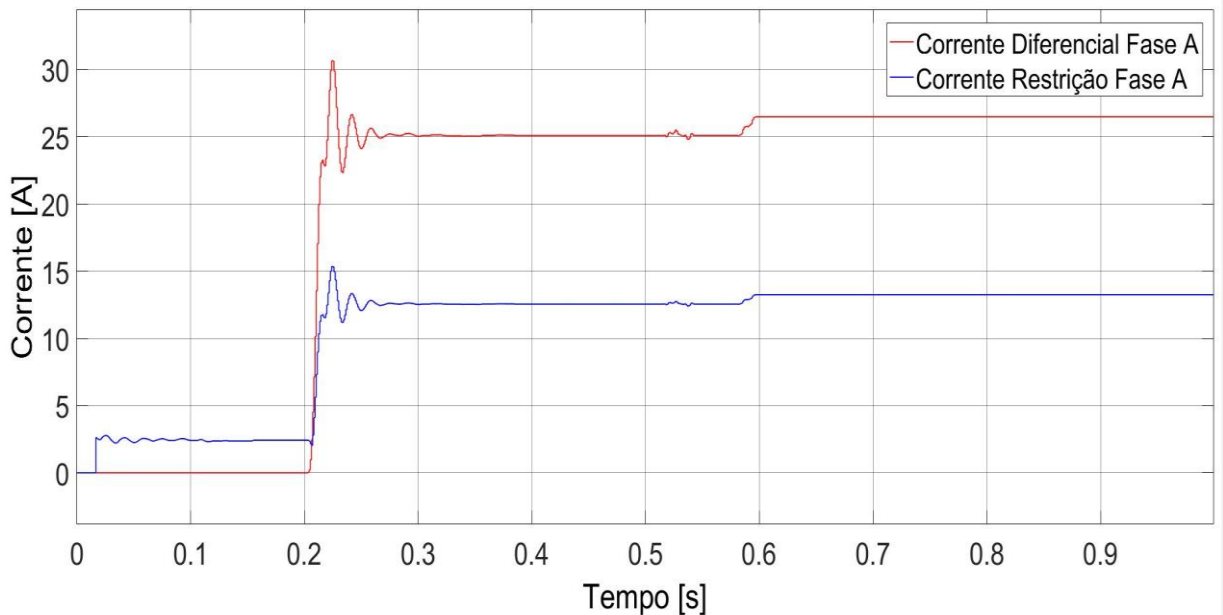
Figura 41 – Sinais de corrente para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

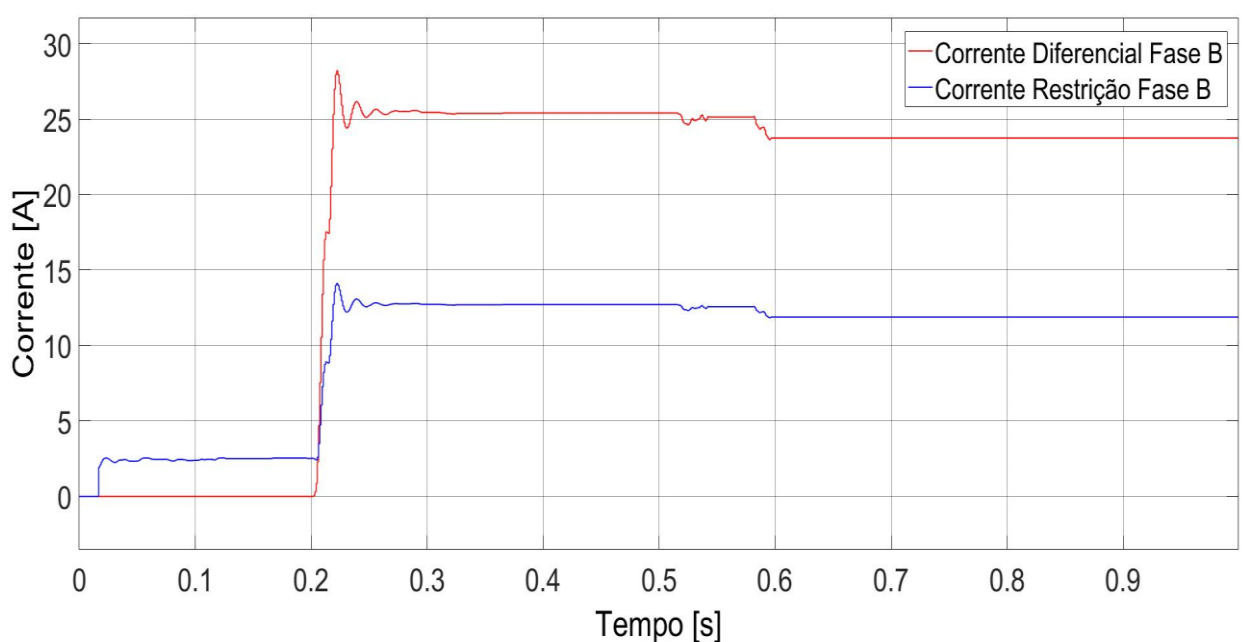
É observado na figura 41 o aumento de todas as correntes, devido à falta trifásica, alterando os módulos de corrente das fases A, B e C, como resultado da alteração temos correntes diferenciais nas três fases, visto nas figuras 42, 43 e 44.

Figura 42 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida



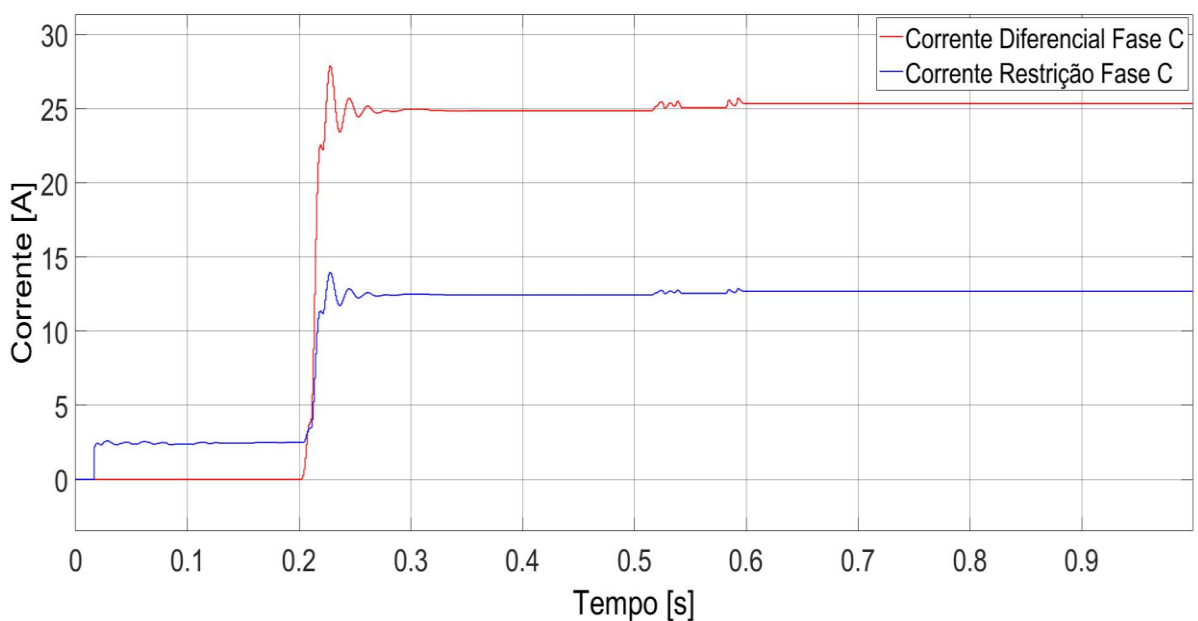
Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida



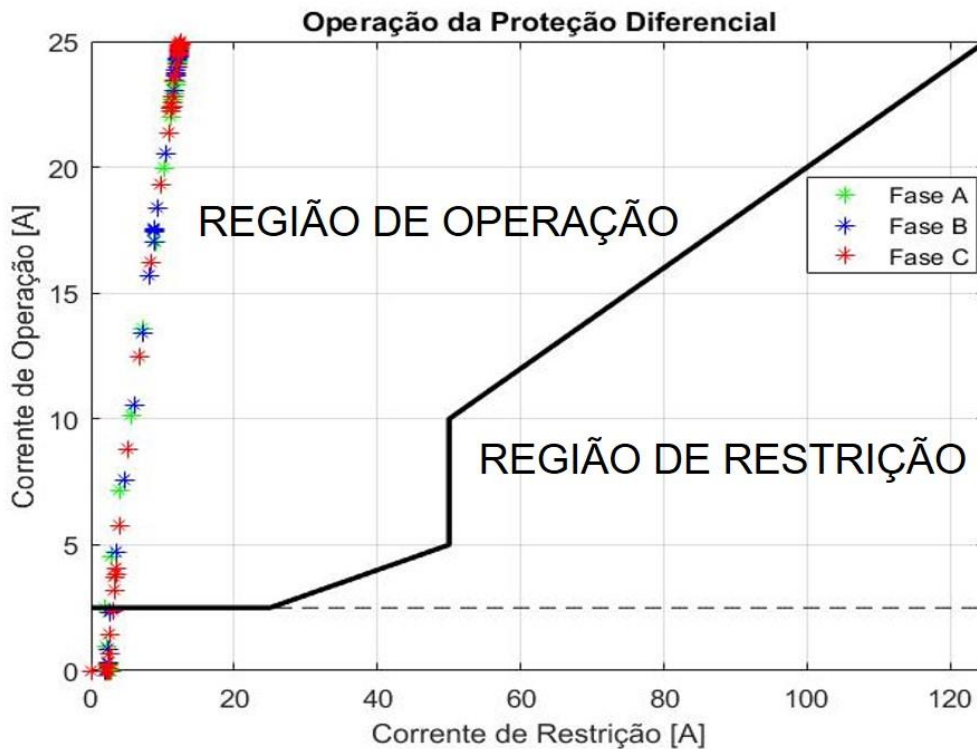
Fonte: Autoria Própria

Figura 44 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida



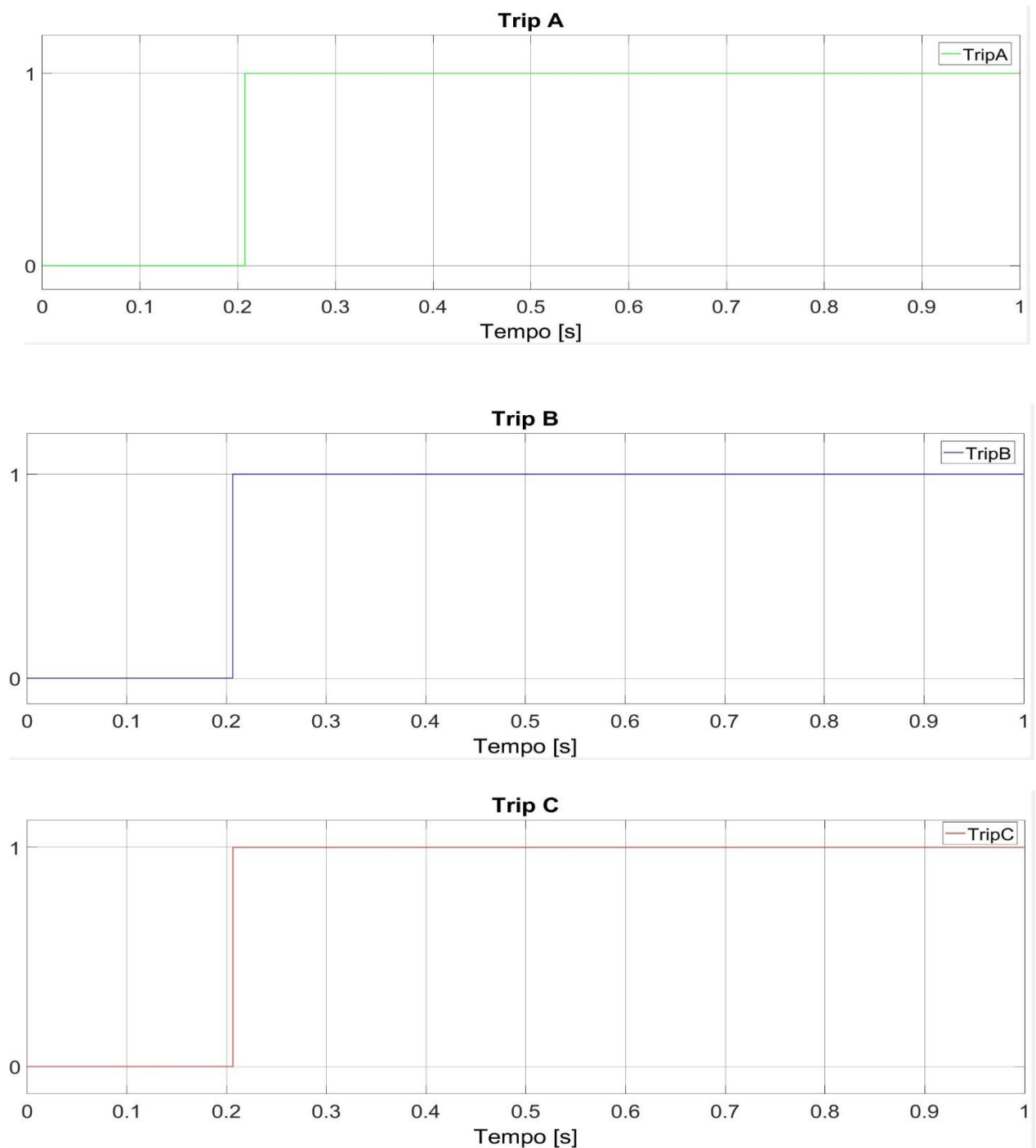
Fonte: Autoria Própria

Figura 45 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

Figura 46 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta trifásica-terra dentro da zona protegida

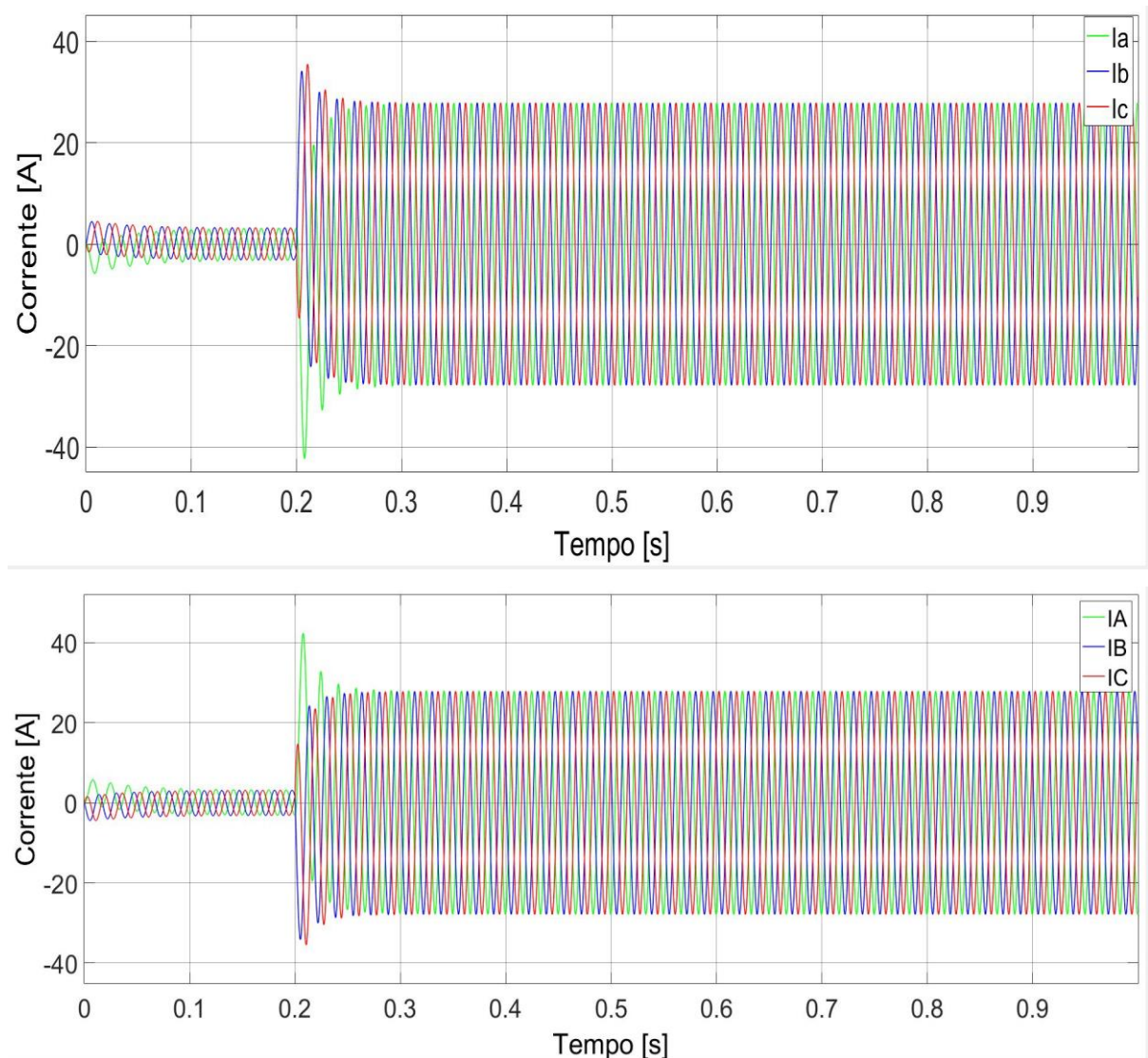


Fonte: Autoria Própria

De acordo com o gráfico da figura 45, temos os sinais das fases A, B e C na zona de operação, assim como esperado para uma falta trifásica. A figura 46 mostra que os sinais de TRIP das fases A, B e C foram enviados, atendendo novamente exigências do sistema operacional, neste caso para uma falta trifásica-terra.

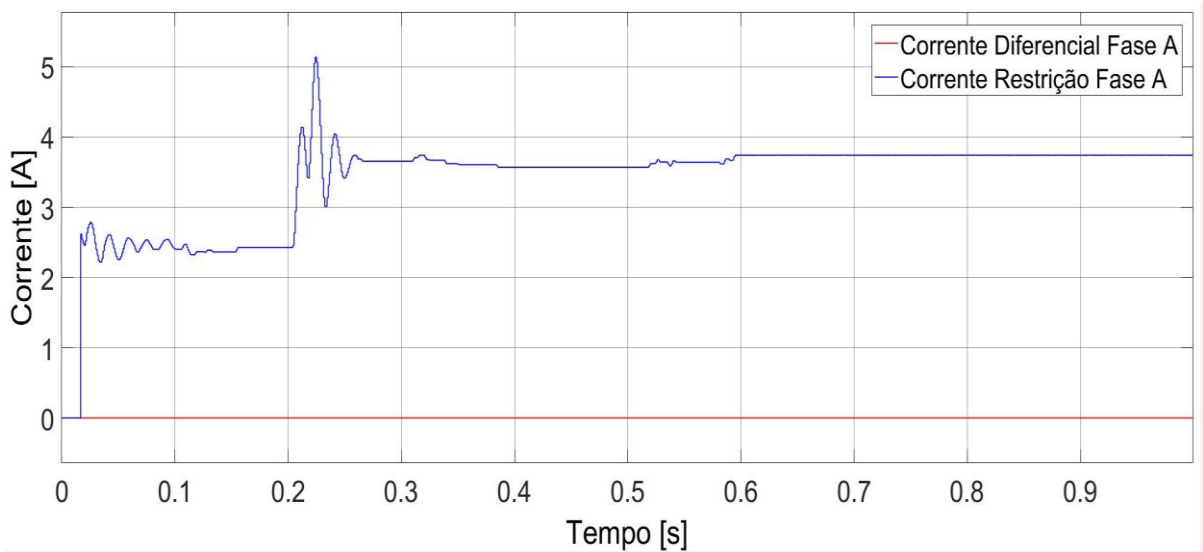
De forma semelhante foi realizada uma falta trifásica-terra fora da zona de proteção do relé diferencial do gerador, a fim de analisar agora a operação da proteção quando aplicado uma falta trifásica-terra a zona externa de proteção. As figuras 47 a 52 representam os resultados encontrados.

Figura 47 – Sinais de corrente para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida



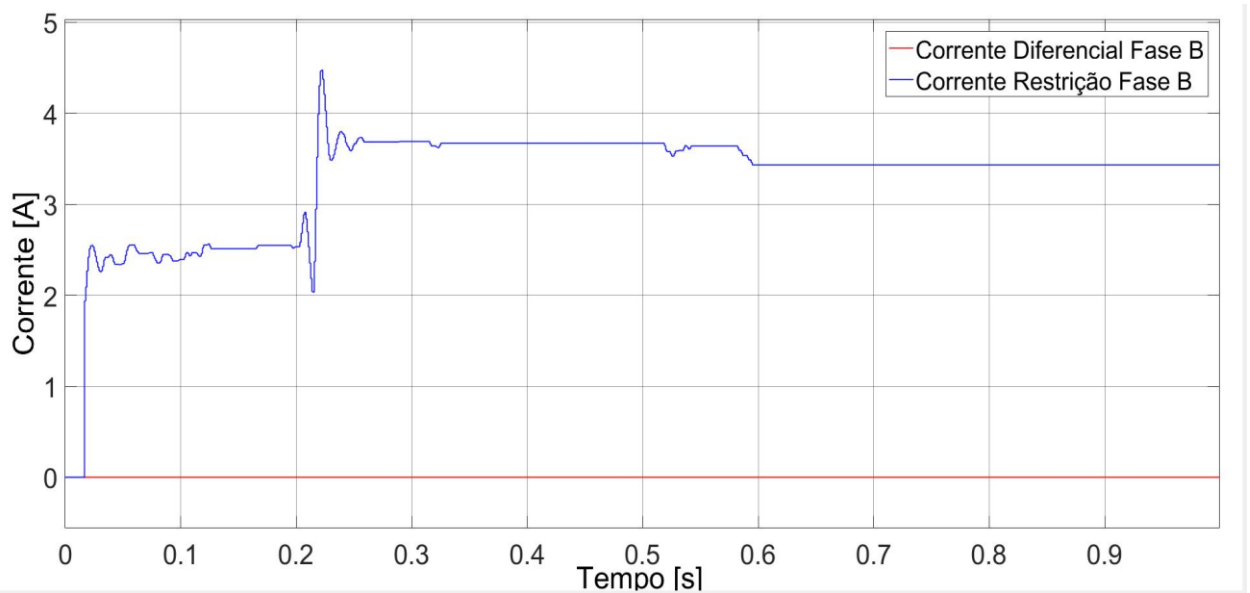
Fonte: Autoria Própria

Figura 48 – Corrente diferencial e restrição da fase A para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida



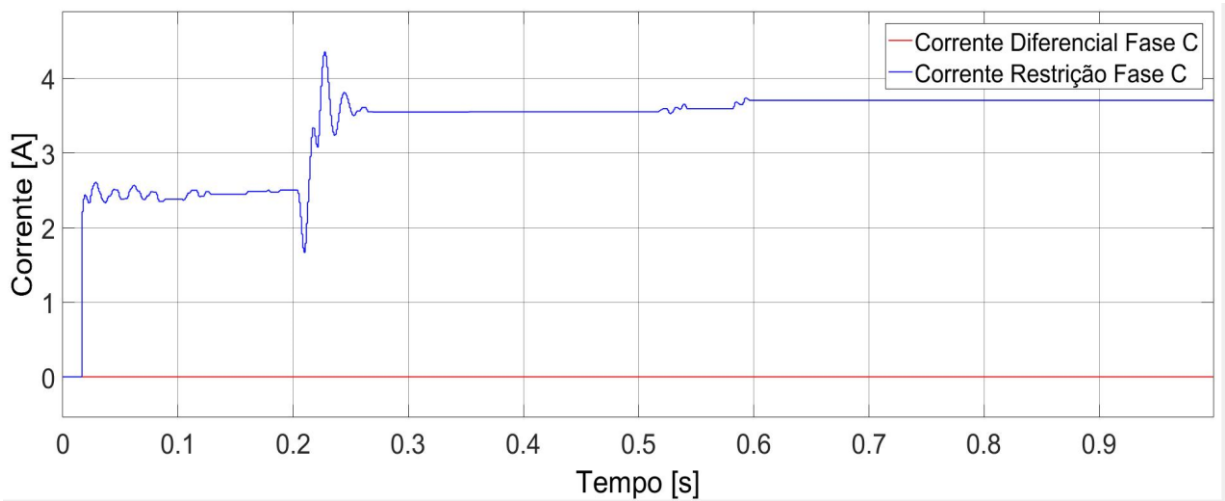
Fonte: Autoria Própria

Figura 49 – Corrente diferencial e restrição da fase B para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida



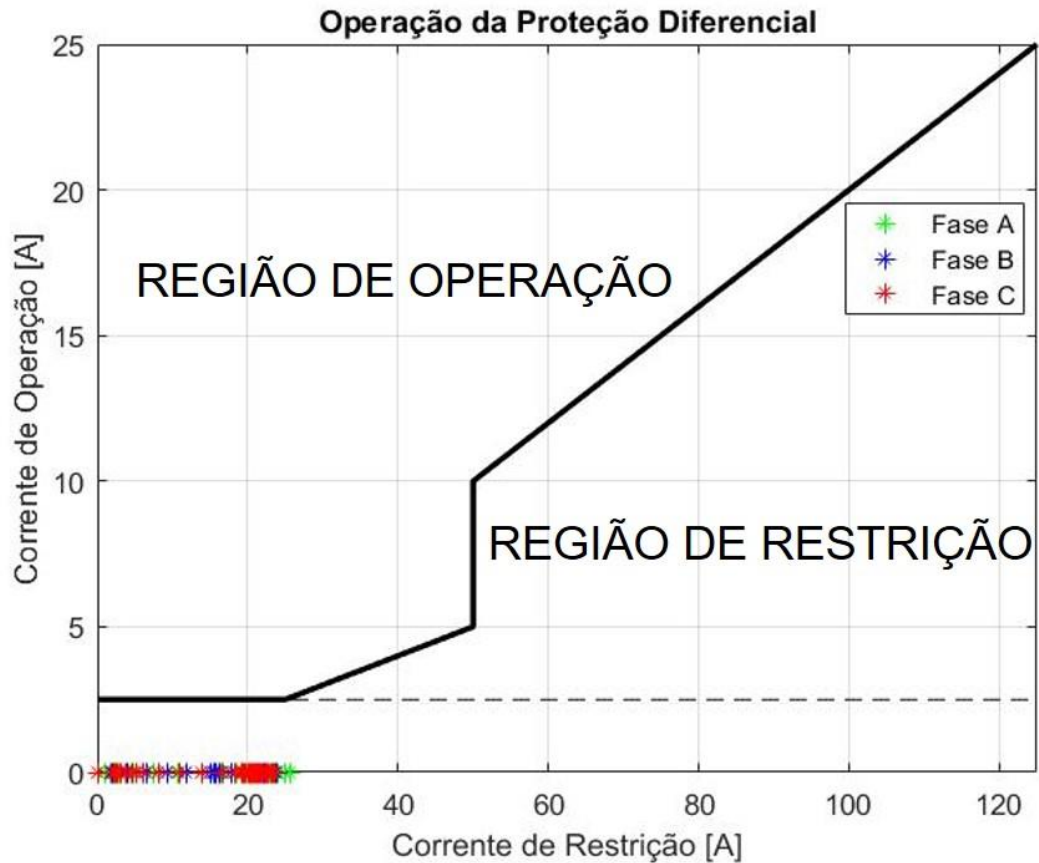
Fonte: Autoria Própria

Figura 50 – Corrente diferencial e restrição da fase C para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida



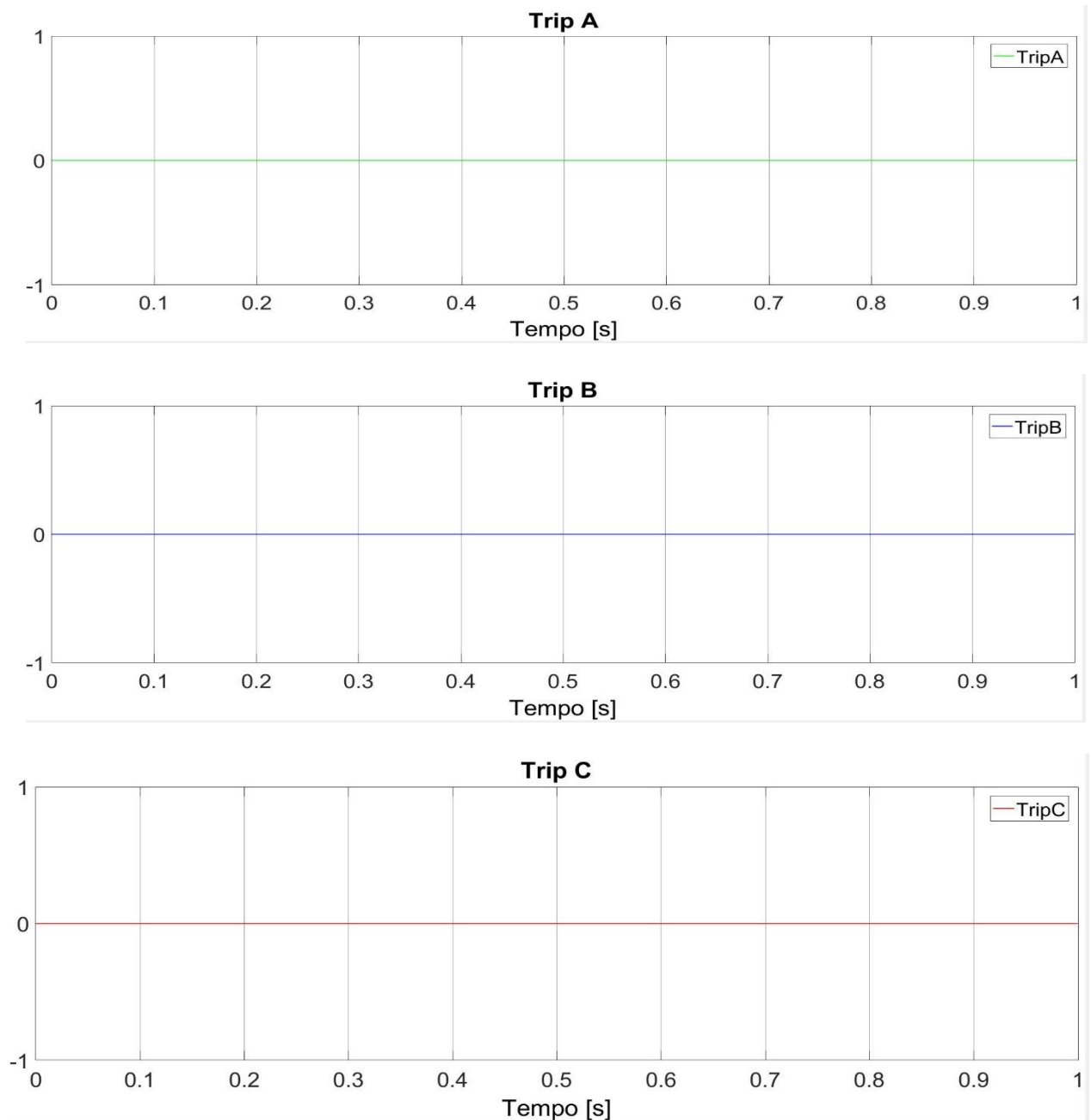
Fonte: Autoria Própria

Figura 51 – Curva característica de operação do relé diferencial para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

Figura 52 – Sinais de TRIP das fases A, B e C para uma falta trifásica-terra fora da zona protegida



Fonte: Autoria Própria

Como esperado, a falta externa mesmo causando uma elevação nas correntes das fases A, B e C visto na figura 47, temos as correntes diferenciais das fases A, B e C resultando em zero mostrados nas figuras 48 a 50, devido a aplicação de uma falta externa a zona de proteção, e por consequência o sistema não entra em operação, a figura 51 mostra os sinais na zona de restrição e pela figura 52 não temos o envio dos sinais de TRIP.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi demonstrado a importância da pesquisa para a proteção diferencial, quando aplicadas a geradores síncronos. Foram apresentados conceitos teóricos relevantes ao assunto, que justificam a importância do estudo.

Foram implementadas rotinas de aquisição de dados de corrente e condicionamento de sinais para a posterior aplicação da função diferencial. O desenvolvimento do módulo de proteção permitirá o usuário aplicar informações sobre tipo de falta e instante da ocorrência de falta, obtendo como resultado oscilografias e presença ou ausência do sinal de trip, comprovando as análises de eventos simulados.

Pode-se concluir, portanto, que o funcionamento dos relés de proteção diferencial aplicados a geradores síncronos foi demonstrado. O desenvolvimento do algoritmo destacou o método apresentado podendo este servir para auxílio no ensino de sistemas de proteção.

São sugeridos como possíveis pontos para continuidade deste trabalho:

- Implementação de um gerador no matlab, para ter acesso aos terminais para serem realizadas faltas internas ao gerador.
- Desenvolvimento de uma interface gráfica que possibilite mais parâmetros de simulação.

REFERÊNCIAS

- CAMARGO, Leonardo P. **Modelagem de um relé de distância com características MHO e quadrilateral para aplicação acadêmica**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.
- CAMINHA, Amadeu C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- COURY, Denis V.; OLESKOVICZ, Mario; GIOVANINI, Renan. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. 1. Ed. São Carlos: EDUSP, 2011.
- IEEE STD. C37. 102-1995. **IEEE guide for generator ground protection**. New York, 1993.
- IEEE STD. C57.13-2008. **IEEE guide for AC generator protection**. New York, 1993.
- KINDERMANN, B.; FINNEY D. (2005). **Generator protection and ct saturation Presented at the Texas A & M Protective Relay Conference**, April 5, 2005.
- LENZ, Everton P. **Avaliação do desempenho de relés digitais de proteção de unidades geradoras utilizando registros de oscilografia e sequência de eventos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- MATIAS, Lucas C. **Desenvolvimento de um módulo de proteção para transformador de potência no Matlab para aplicação acadêmica**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.
- REIMERT, D. (2006), **Protective relaying for power generation systems**. Boca Raton: CRC Press.
- SILVA, Rogério C. **Proteção diferencial de geradores síncronos: O uso de redes neurais artificiais para identificação e correção da saturação dos transformadores de corrente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- GENERAL ELETRIC. **489 Generator Management Relay**. Manual. 2010.
- MASCHER, L. J. D. **Análise do desempenho de algoritmos de proteção de distância frente às faltas monofásicas: abordagem tendo em vista uma proteção adaptativa**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.