

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO PEREIRA CAMARGO

**MODELAGEM DE UM RELÉ DE DISTÂNCIA COM
CARACTERÍSTICAS MHO E QUADRILATERAL PARA
APLICAÇÃO ACADÊMICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

LEONARDO PEREIRA CAMARGO

**MODELAGEM DE UM RELÉ DE DISTÂNCIA COM
CARACTERÍSTICAS MHO E QUADRILATERAL PARA
APLICAÇÃO ACADÊMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de 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
2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Pereira Camargo

Modelagem de um relé de distância com características mho e quadrilateral para aplicação acadêmica

Trabalho de conclusão de curso apresentado às hs do dia 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). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - (Membro)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Murilo da Silva, pela atenção e sabedoria com que me guiou desde a iniciação científica até este Trabalho de Conclusão de Curso.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento e eterno agradecimento à minha família, por todo seu apoio e incentivo para que eu pudesse concluir mais esta etapa. E agradecer também à minha namorada por todo apoio e paciência ao longo destes cinco anos.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

CAMARGO, L. P.. MODELAGEM DE UM RELÉ DE DISTÂNCIA COM CARACTERÍSTICAS MHO E QUADRILATERAL PARA APLICAÇÃO ACADÊMICA. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. CORNÉLIO PROCÓPIO, 2018.

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta como proposta a modelagem computacional de um relé de distância com característica MHO e Quadrilateral, ambos muito utilizados na proteção de linhas de transmissão para isolação de defeitos (curtos-circuitos), caso estes ocorram. Os relés de distância são instalados nos terminais das linhas de transmissão e são os responsáveis por enviar os sinais de acionamento para os disjuntores que realizam o isolamento do trecho afetado por algum distúrbio, para que este não venha a danificar equipamentos ou mesmo, prejudicar a continuidade da energia elétrica transmitida em linhas adjacentes. Este trabalho propõe, portanto, a modelagem computacional de duas filosofias de proteção de distância utilizadas no meio comercial, utilizando a plataforma Matlab/Simulink. Destaca-se que a simulação de filosofias de proteção promove a inovação do ensino acadêmico, bem como, podem ser alternativas de ensino atrativas devido às dificuldades técnicas e econômicas para modernização e atualizações constantes de laboratórios.

Palavras-chave: Proteção de sistemas. Características de proteção. Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

CAMARGO, L. P.. Modeling of a distance relay with MHO and Quadrilateral characteristics for academic application. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. CORNÉLIO PROCÓPIO, 2018.

This document presents the computational development of a distance relay with MHO and Quadrilateral characteristics, both widely used in the protection of transmission lines for the isolation of defects (short circuits), if these occur. The distance relays are installed on the terminals of the transmission lines and are responsible for sending the actuation signals to the switches that isolate the part affected by a disturbance so as not to damage the equipment or even damage the continuity of the transmitted electric power in adjacent lines. This study proposes the computational implementation of a philosophy of distance protection used in the commercial environment, through the Matlab/Simulink platform. It is worth emphasizing that the simulation of protection philosophies promotes the innovation of academic teaching, as well as, they can be attractive teaching alternatives due to the technical and economic difficulties for the modernization and constant updates of the laboratories.

Keywords: Protection of systems. Protection features. Electrical Power Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de funcionamento para um relé digital	5
Figura 2 – Relé de distância do tipo MHO com alcance $ r \cdot Z_{1L} $	8
Figura 3 – Elemento de distância do tipo Quadrilateral	10
Figura 4 – Diagrama unifilar de um sistema elétrico	11
Figura 5 – Elemento direcional de impedância de sequência positiva	12
Figura 6 – Zonas de proteção, 1 e 2, de um elemento de distância	14
Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema elétrico	16
Figura 8 – Sistema elétrico implementado	17
Figura 9 – Bloco <i>Three-phase fault</i> utilizado	17
Figura 10 – Subsistema "Tensão de rede defasada"	18
Figura 11 – Etapas do relé de distância implementado	19
Figura 12 – Sistema elétrico e os blocos de tratamento dos sinais	20
Figura 13 – Subsistema "TC" utilizado	20
Figura 14 – Subsistema "CORRENTES DE LINHA" expandido	21
Figura 15 – Módulo de proteção	23
Figura 16 – Módulo das correntes I_a , I_b e I_c , para uma falta BT	24
Figura 17 – Interface gráfica desenvolvida	25
Figura 18 – Menu: "Selecione o tipo de falta"	26
Figura 19 – Botão "Mensagem"	26
Figura 20 – Configuração da interface para falta AT aplicada na zona 1	33
Figura 21 – Malhas de impedância MAT, MBT e MCT obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra	34
Figura 22 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta AT na zona 1	34
Figura 23 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta AT na zona 1	35
Figura 24 – Configuração da interface para falta AT aplicada na zona 2	36
Figura 25 – Malhas de impedância MAT, MBT e MCT obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra	37
Figura 26 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta AT na zona 2	38
Figura 27 – Configuração da interface para falta AT com RF 90Ω aplicada na zona 1	39
Figura 28 – Malhas de impedância monofásicas AT, BT e CT	39
Figura 29 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta AT na zona 1	40
Figura 30 – Configuração da interface para falta AT com RF 90Ω aplicada na zona 2	41
Figura 31 – Malhas de impedância bifásicas AT, BT e CT	41
Figura 32 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta AT na zona 2	42
Figura 33 – Configuração da interface para falta AB aplicada na zona 1	43
Figura 34 – Malhas de impedância bifásicas AB, BC e CA	43

Figura 35 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta AB na zona 1	44
Figura 36 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta AB na zona 1	44
Figura 37 – Configuração da interface para falta AB aplicada na zona 2	45
Figura 38 – Malhas de impedância obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra	46
Figura 39 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta AB na zona 2	46
Figura 40 – Configuração da interface para falta ABT aplicada na zona 1	47
Figura 41 – Malhas de impedância bifásicas AB, BC e CA	48
Figura 42 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta ABT na zona 1	48
Figura 43 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta ABT na zona 1	49
Figura 44 – Configuração da interface para falta ABT aplicada na zona 2	50
Figura 45 – Malhas de impedância obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra	50
Figura 46 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta ABT na zona 2	51
Figura 47 – Configuração da interface para falta ABC aplicada na zona 1	52
Figura 48 – Malhas de impedância bifásicas AB, BC e CA	53
Figura 49 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta ABC na zona 1	53
Figura 50 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta ABC na zona 1	54
Figura 51 – Configuração da interface para falta ABC aplicada na zona 2	55
Figura 52 – Malhas de impedância obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra	55
Figura 53 – Sinais de corrente e <i>word bits</i> obtidas da falta ABC na zona 2	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 0,001 \Omega$	27
Tabela 2	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 10 \Omega$	28
Tabela 3	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 25 \Omega$	28
Tabela 4	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 50 \Omega$	28
Tabela 5	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 80 \Omega$	29
Tabela 6	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 90 \Omega$	29
Tabela 7	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 0,001 \Omega$	30
Tabela 8	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 10 \Omega$	30
Tabela 9	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 25 \Omega$	31
Tabela 10	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 50 \Omega$	31
Tabela 11	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 80 \Omega$	32
Tabela 12	– Resultados obtidos das simulações para $\Delta = 30^\circ$ e $R_F = 90 \Omega$	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
EPROM	<i>Eletronic Programming Read Only Memory</i>

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Delimitação do tema	1
1.2 Problemas e premissas	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo geral	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Dispositivos de proteção	4
2.2 Relé digital	5
2.2.1 Sinais de tensão e corrente	5
2.2.2 Filtros <i>anti-aliasing</i>	5
2.2.3 Amostragem e conversão analógica digital (CAD)	6
2.2.4 Processador, memórias e saídas digitais	6
2.3 Relé de distância	6
2.3.1 Relé de distância do tipo MHO	7
2.3.1.1 Equacionamento das malhas de impedância	8
2.3.2 Relé de distância do tipo Quadrilateral	9
2.3.2.1 Elemento de reatância	9
2.3.2.2 Elemento de resistência	11
2.3.2.3 Elemento direcional	11
2.3.3 Cálculo da impedância aparente	12
2.3.3.1 Loops de faltas fase-fase	12
2.3.3.2 Loops de faltas fase-terra	13
2.3.3.3 Loops de faltas trifásicas	13
2.3.3.4 Decisão de abertura – Zonas de proteção	13
2.3.4 Cálculo das componentes simétricas de tensão e corrente	14
3 – MÉTODOS DE PESQUISA	16
3.1 Sistema elétrico utilizado	16
3.1.1 Fontes de tensão da barra S e barra R	16
3.1.2 Linha de transmissão	16
3.1.3 Sistema elétrico implementado	16
3.1.3.1 Bloco <i>Three-phase fault</i>	17
3.1.3.2 Blocos de impedância e fontes	18
3.2 O relé implementado	18

3.2.1	Sinais de tensão e corrente	19
3.2.2	Filtragem digital	21
3.2.3	Detecção e classificação da falta	22
3.2.4	Malhas de impedância	22
3.2.5	Decisão de abertura / <i>trip</i>	24
3.3	Interface gráfica	24
3.3.1	Entradas de dados	25
4	– RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	Resultados referentes às faltas aplicadas com um valor fixo de Delta igual à 30°	27
4.1.1	Resultados obtidos para a zona 1 de proteção	27
4.1.2	Resultados obtidos para a zona 2 de proteção	29
4.2	Resultados gráficos obtidos para faltas F-T, F-F, F-F-T e F-F-F	33
4.2.1	Falta F-T com $R_F = 10 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$	33
4.2.1.1	Zona 1	33
4.2.1.2	Zona 2	35
4.2.2	Falta F-T com $R_F = 90 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$	38
4.2.2.1	Zona 2	40
4.2.3	Falta F-F com $R_F = 0.001 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$	42
4.2.3.1	Zona 1	42
4.2.3.2	Zona 2	45
4.2.4	Falta F-F-T com $R_F = 0.001 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$	47
4.2.4.1	Zona 1	47
4.2.4.2	Zona 2	49
4.2.5	Falta F-F-F com $R_F = 0.001 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$	51
4.2.5.1	Zona 1	51
4.2.5.2	Zona 2	54
5	– CONCLUSÃO	57
6	– TRABALHOS PUBLICADOS	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Percebe-se que a busca por mecanismos de controle, regulação e proteção dos sistemas elétricos é um processo contínuo, a fim de se garantir um fornecimento de energia confiável e com qualidade aos consumidores. Este fato deve-se em grande parte ao crescimento dos Sistemas de Energia Elétrica (SEE) e ao aumento da sua complexidade de operação, visto a variedade de fontes de energia elétrica, o aumento do consumo e a interligação do sistema de transmissão e geração do Brasil.

Para que curtos-circuitos, descargas elétricas ou quaisquer outros distúrbios ocorridos no sistema elétrico não venham a prejudicar o funcionamento de seus equipamentos, como transformadores e geradores, assim como das linhas de transmissão adjacentes, torna-se necessário o emprego de elementos de proteção que sejam rápidos e seletivos na identificação e isolamento do trecho com defeito, de modo que a continuidade da energia elétrica não seja interrompida.

A linha de transmissão (LT) é o elemento dos SEE mais susceptível a faltas, devido à sua abrangência, presença em locais de difícil acesso, suas dimensões físicas e à variabilidade de climas aos quais as mesmas se encontram expostas (CARRAMASCHI, 2006). De acordo com Filho e Mamede (2013), 68% das interrupções ocorridas no sistema elétrico brasileiro, tem sua origem nas LT.

Os relés de proteção são os principais dispositivos utilizados na proteção dos elementos do SEE, sendo o relé de distância o mais empregado para proteção de linhas de transmissão, visto que sua atuação não é prejudicada pelo comprimento das linhas.

Diante dos fatos apresentados, e visto a importância da proteção de distância, este trabalho abordará os princípios de funcionamento dos elementos de distância MHO e Quadrilateral, assim como suas características.

1.1 Delimitação do tema

O planejamento e operação dos SEE são realizados por meio de simulações computacionais afim de verificar o comportamento de equipamentos existentes, com relação às tensões e correntes às quais os mesmos são submetidos em situações normais de operação, como manobras de inserção e retirada de cargas, religamento e ocorrência de curtos-circuitos, de maneira à dimensioná-los e ajustá-los corretamente, prolongando a vida útil e melhorando o funcionamento de tais equipamentos (GONZALEZ, 2007).

Com o desenvolvimento e evolução dos computadores digitais passou a ser viável efetuar tais simulações por meio de cálculos matemáticos que reproduzem o comportamento de diversos equipamentos, tornando possível a representação dos mesmos em *softwares* para o cálculo de curtos-circuitos, fluxo de potência, transitórios, entre outros (GONZALEZ, 2007).

A plataforma Matlab/Simulink® é uma das mais conhecidas no meio acadêmico, que juntamente com a biblioteca *SymPowerSystems*, possibilita a modelagem e simulação de diversos tipos de sistemas, inclusive os Sistemas Elétricos de Potência, o que tem trazido novas perspectivas para o ensino da teoria de proteção de SEE, assim como para pesquisas relacionadas ao tema.

Este trabalho propõe a modelagem computacional da filosofia de proteção de distância, comumente encontrada no mercado, utilizando a plataforma Matlab/Simulink®. A proteção de distância a ser modelada abordará as características MHO e Quadrilateral, muito utilizadas na prática.

1.2 Problemas e premissas

Tendo em vista o elevado custo de equipamentos para a composição de laboratórios de proteção, e a importância do estudo de suas características e aplicações, torna-se necessário a busca por soluções alternativas que auxiliem os estudantes e pesquisadores da área. Sendo assim, uma opção para esta situação, é o estudo por meio de *softwares* que possibilitem as simulações dos sistemas elétricos, bem como, dos equipamentos empregados na segurança dos mesmos.

Existem modelos sofisticados que representam boa parte dos componentes presentes nos SEE, o que possibilita o estudo e análise do funcionamento destes equipamentos, entretanto, não há modelos específicos de relés que permitam estudos aprofundados dos mesmos, relacionados aos seus princípios de funcionamento e características.

Diante das dificuldades técnicas e econômicas apresentadas, justifica-se o desenvolvimento deste trabalho tendo como principal objetivo o ensino e pesquisa na área de proteção de sistemas elétricos de potência.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um módulo de proteção de distância com características MHO e Quadrilateral utilizando a plataforma Matlab/Simulink®, direcionado ao ensino e pesquisa de proteção de sistemas elétricos de potência.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre proteção de SEE, filosofias de proteção, aplicações e simuladores computacionais;
- Realizar pesquisa sobre condicionamento e aquisição de sinais para utilização em relés de proteção;
- Modelar o sistema elétrico de transmissão a ser utilizado nos testes;

- Implementar o módulo de condicionamento de sinais: transdutores (transformadores de potencial e corrente), filtro anti-aliasing, Sample/Hold e do conversor analógico/digital (CAD);
- Implementar a filosofia de proteção de distância dos tipos MHO e Quadrilateral para LT no ambiente Matlab/Simulink®;
- Testar e validar os resultados do módulo de proteção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dispositivos de proteção

Os fusíveis e os relés são os dispositivos mais empregados na proteção dos SEE. Os fusíveis operam por meio da fusão do elemento metálico empregado na sua construção, o qual apresenta características específicas de tempo *versus* corrente. Já os relés constituem uma grande variedade de elementos, com uma ou mais características e técnicas que os definem para exercer suas funções, de maneira a atender a particularidade de cada sistema elétrico dentro dos limites exigidos pelos esquemas de proteção (MAMEDE; FILHO, 2013).

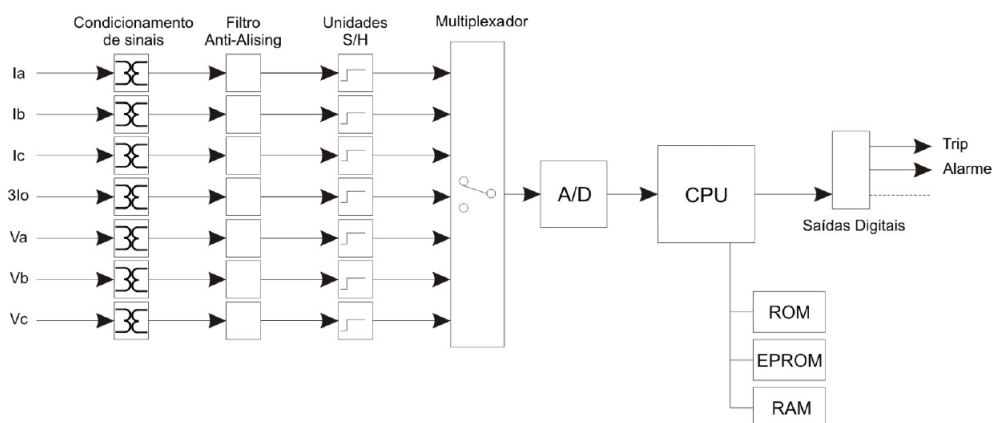
Os relés podem atuar de várias formas, de acordo com a característica do distúrbio para qual o mesmo foi projetado para identificar, como por exemplo: sobrecarga, distância, sobrecorrente, diferencial, etc.

Os primeiros relés projetados eram dispositivos eletromecânicos que utilizavam as forças que eram produzidas pela interação eletromagnética entre correntes e fluxos, assim como ocorre em um motor. Tais forças são criadas pela combinação dos sinais de entrada e a energia armazenada nas bobinas dos enrolamentos internos do relé (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007). Os relés estáticos, ou eletrônicos, surgiram anos depois, após os avanços da eletrônica analógica e o desenvolvimento dos transistores e amplificadores operacionais.

O desenvolvimento dos primeiros relés digitais se deu após a evolução da tecnologia digital, os quais passaram a ser "gerenciados por um microprocessador específico controlado por um software, onde os dados de entrada são digitalizados"(COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007, p. 2).

Os relés digitais oferecem grandes vantagens com relação aos seus antecessores, pois além das funções de proteção propriamente ditas, estes realizam funções de comunicação, medidas elétricas, controle, sinalização remota, acesso remoto, etc., funções estas, que contribuíram para que estes dispositivos revolucionassem os esquemas de proteção e dominassem o mercado (MAMEDE; FILHO, 2013, p. 10). A Figura 1 apresenta o diagrama simplificado de um relé digital.

Figura 1 – Diagrama de funcionamento para um relé digital



Fonte: Adaptado de Mascher (2010, p. 59).

2.2 Relé digital

Conforme apresentado na Figura 1, o relé digital é composto basicamente pelos seguintes processos:

2.2.1 Sinais de tensão e corrente

As leituras dos sinais de tensão e corrente da linha de transmissão são realizadas por transformadores de potencial (TP's) e transformadores de corrente (TC's), respectivamente, instalados nos terminais da linha protegida. Sinais analógicos de tensão e corrente da ordem de mV (milivolts) e mA (miliampères), são gerados proporcionais às formas de onda recebidas (MASCHER, 2010).

2.2.2 Filtros *anti-aliasing*

Os sinais provenientes da etapa anterior apresentam várias componentes de alta frequência, as quais devem ser eliminadas para que o fenômeno chamado de aliasing não ocorra. Este fenômeno ocorre quando o critério de Nyquist é desrespeitado, isto é, quando a frequência de amostragem é menor do que duas vezes a mais alta frequência amostrada. Se este critério não for obedecido, as componentes de alta frequência serão reconhecidas como componentes de baixa frequência, contaminando a amostragem com significantes erros que não podem ser corrigidos posteriormente (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007, p. 2).

Portanto, tais sinais podem ser aplicados à filtros analógicos do tipo passa-baixa passivos, *Butterworth* ou *Bessel*, de segunda ou terceira ordem, chamados filtros *anti-aliasing* (MASCHER, 2010), os quais satisfazem os requisitos dos relés digitais.

2.2.3 Amostragem e conversão analógica digital (CAD)

Os sinais analógicos filtrados chegam às unidades *Sample and Holding* (S/H), onde são amostrados no mesmo instante e disponibilizados ao multiplexador. Este elemento minimiza a deformação provocada pela amostragem não sequencial, e conseqüentemente, a operação incorreta da proteção (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007, p. 6).

O multiplexador torna possível a utilização de apenas um conversor A/D (Analógico Digital), para várias entradas analógicas, o qual realiza a digitalização dos valores instantâneos das formas de onda em intervalos definidos pela taxa amostral.

2.2.4 Processador, memórias e saídas digitais

O processador realiza a extração da componente fundamental, executa os cálculos e decide as atuações do relé. As memórias ROM e RAM, são utilizadas para o armazenamento do software lógico e quantidades obtidas em operações intermediárias no algoritmo do relé, respectivamente, enquanto a EPROM armazena os ajustes do dispositivo (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007, p. 8).

O módulo de saídas digitais é responsável pelo envio de sinais para a atuação de disjuntores e alarmes, provenientes das decisões tomadas pelo processamento.

2.3 Relé de distância

Os relés de distância operam com base nos valores de tensão e corrente medidos em seus terminais. O princípio de funcionamento destes dispositivos baseia-se nos princípios dos relés eletromecânicos, os quais empregavam unidades de torque em discos ou cilindros de metal.

Linhas de transmissão são normalmente protegidas por relés de sobrecorrente temporizados, mas seu desempenho diminui à medida que as LT adquirem maiores extensões. Sendo assim, torna-se necessário o emprego de relés de distância, cuja atuação é proporcional à distância entre o ponto de defeito e o ponto de instalação do relé.

A tensão no ponto de defeito da LT é praticamente nula, e conforme se distancia deste ponto, esta tende a aumentar devido à queda de tensão. Uma vez que a impedância de uma LT é proporcional ao seu comprimento, o relé é capaz de determinar o local de ocorrência de uma falta por meio do cálculo da impedância aparente, verificando se esta encontra-se dentro dos limites da zona de proteção definida para o dispositivo.

Portanto, a função destes relés é retirar instantaneamente de serviço os elementos que se encontrem em sua zona de proteção, no caso de curtos-circuitos ou demais fenômenos que levem o sistema de potência a operar de maneira irregular. Os relés não têm, então, a finalidade de prevenir danos, e sim, o objetivo de evitar que o dano já ocorrido comprometa os sistemas adjacentes.

2.3.1 Relé de distância do tipo MHO

A característica de operação de um elemento MHO é um círculo que passa pela origem do sistema de eixos coordenados do diagrama R-X.

Uma das maneiras de se obter esta característica, é empregando um comparador de fase do tipo cosseno, entre os sinais de operação S_{op} , vide Equação (1), e de polarização S_{pol} , vide Equação (2), a fim de se obter o ângulo de fase Θ , para $-90^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$. Os ângulos $\Theta = -90^\circ$ e $\Theta = 90^\circ$, definem os limites da característica no plano R-X (ROBERTS; SCHWEITZER; GUZMAN, 1993).

$$S_{op} = r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R \quad (1)$$

$$S_{pol} = V_{pol} \quad (2)$$

Sendo r o alcance do elemento MHO em por unidade, Z_{1L} a impedância de sequência positiva da linha, V_R a tensão de linha correspondente ao loop de falta, I_R a corrente de linha correspondente ao loop de falta e V_{pol} a tensão de polarização. A Equação (3) descreve a expressão do torque (P) para este comparador de fase tipo cosseno. Sendo \Re a parte real de um número complexo e * o seu conjugado.

$$P = \Re[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R) \cdot V_R^*] = \Re[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R^*) \cdot |V_R|^2] \quad (3)$$

Os pontos onde $P > 0$, representam a área dentro do círculo de alcance $r \cdot |Z_{1L}|$, e $P < 0$ representa a área fora do círculo de alcance $r \cdot |Z_{1L}|$. $P = 0$ define o limite do círculo de alcance $r \cdot |Z_{1L}|$ (ROBERTS; SCHWEITZER; GUZMAN, 1993). A Figura 2 apresenta o limite da característica MHO. Substituindo V_{pol} por V_R , e fazendo $P = 0$ na Equação (3), obtém-se a seguinte equação:

$$0 = \Re[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R) \cdot V_R^*] = \Re[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R^*) \cdot |V_R|^2] \quad (4)$$

Fazendo $r \cdot Z_{1L} = |r \cdot Z_{1L}| \angle \Theta_L$:

$$|r \cdot Z_{1L}| = \frac{|V_R|^2}{\Re(1 \angle \Theta_L \cdot I_R \cdot V_R^*)} \quad (5)$$

$$|r \cdot Z_{1L}| = \frac{|V_R|}{I_R \cdot \cos[\Theta_L - (\Theta_V - \Theta_I)]} \quad (6)$$

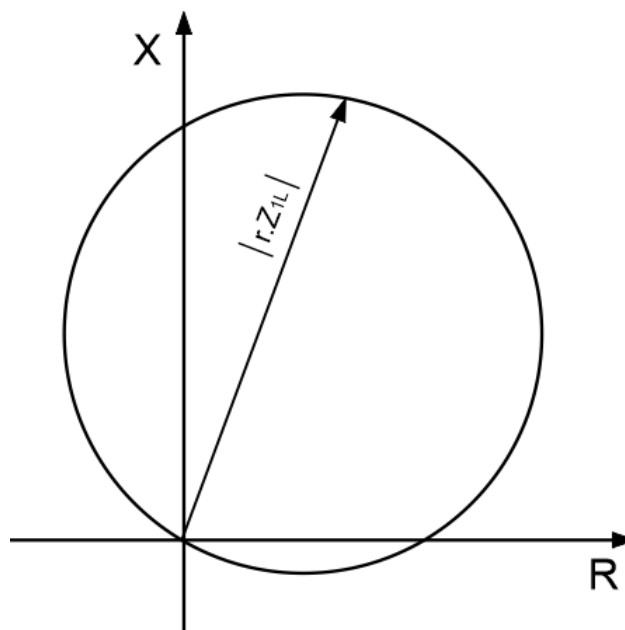
Sendo Θ_L o ângulo de sequência positiva da linha, Θ_I o ângulo de I_R , Θ_V o ângulo de V_R .

E finalmente, fazendo $Z = |Z| \angle \phi$, onde $\phi = (\Theta_V - \Theta_I)$, obtém-se:

$$|Z| = |r \cdot Z_{1L}| \cdot \cos(\Theta_L - \phi) \quad (7)$$

A Equação (7) descreve um círculo no plano de impedância, passando pela origem e por $|r \cdot Z_{1L}|$, como apresentado na Figura 2. É possível verificar por meio desta equação que utilizar o elemento tipo MHO auto-polarizado, é o análogo a testar $Z = V/I$ contra uma característica circular no plano R-X (ROBERTS; SCHWEITZER; GUZMAN, 1993).

Figura 2 – Relé de distância do tipo MHO com alcance $|r \cdot Z_{1L}|$



Fonte: Adaptado de Mascher (2010, p. 27).

2.3.1.1 Equacionamento das malhas de impedância

O modelo implementado utiliza três malhas de impedância para a detecção de faltas entre as fases AB, BC e CA. Um relé de distância tipo MHO detectará uma falta quando a diferença angular entre os fasores S_{pol} e S_{op} for menor que 90° . Esta afirmação é representada matematicamente pela Equação (8) e Equação (9).

$$\Re(S_{pol} \cdot S_{op}) > 0 \quad (8)$$

$$\Re[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R) \cdot V_R^*] \quad (9)$$

Para o relé apontar uma falta à frente, é necessário que a impedância calculada seja menor ou igual à impedância ajustada para determinada zona de operação ($|r \cdot Z_{1L}|$) (SALLES, 2007). Após algumas manipulações algébricas o termo $|r \cdot Z_{1L}|$ é isolado para que seja expressa a condição de operação do relé:

$$|r \cdot Z_{1L}| \geq Z_R = \frac{\Re(V_R \cdot V_{pol}^*)}{\Re(1 \angle \Theta_L \cdot I_R \cdot V_{pol}^*)} \quad (10)$$

A Equação (10) pode ser adaptada para as três malhas de impedância de faltas bifásicas, definidos pelas Equação (11), Equação (12) e Equação (13). Onde a tensão V_{pol} é substituída pelo fasor da tensão de sequência positiva de linha.

$$MAB = \frac{\Re[V_{AB} \cdot (V_{A1} \cdot V_{B1})^*]}{\Re[1\angle\Theta_L \cdot I_{AB} \cdot (V_{A1} \cdot V_{B1})^*]} \quad (11)$$

$$MBC = \frac{\Re[V_{BC} \cdot (V_{B1} \cdot V_{C1})^*]}{\Re[1\angle\Theta_L \cdot I_{BC} \cdot (V_{B1} \cdot V_{C1})^*]} \quad (12)$$

$$MCA = \frac{\Re[V_{CA} \cdot (V_{C1} \cdot V_{A1})^*]}{\Re[1\angle\Theta_L \cdot I_{CA} \cdot (V_{C1} \cdot V_{A1})^*]} \quad (13)$$

Os denominadores da Equação (11), Equação (12) e Equação (13) são torques utilizados como elemento de direcionalidade. Será apontado uma falta à frente, se o sinal do torque for positivo, e uma falta na direção reversa, caso o sinal do torque seja negativo. Uma vez que a falta esteja na direção à frente, o comparador verifica de acordo com a Equação (10) se a falta se encontra dentro do círculo característico do elemento MHO (SALLES, 2007).

2.3.2 Relé de distância do tipo Quadrilateral

O relé de distância do tipo Quadrilateral combina as características do relé de reatância com propriedades de controle de limite resistivo e direcional. Estas características são ideais para a proteção de faltas fase-terra em linhas de médio e curto alcance, onde um alto grau de tolerância à resistência de falta é requerida, uma vez que este relé permite a cobertura de altos valores de resistência de falta (SAENGSUWAN, 1999).

Para o desenvolvimento deste relé é preciso implementar os seguintes elementos (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010):

- Um elemento direcional.
- Um elemento de reatância.
- Os elementos de resistência dos lados direito e esquerdo.

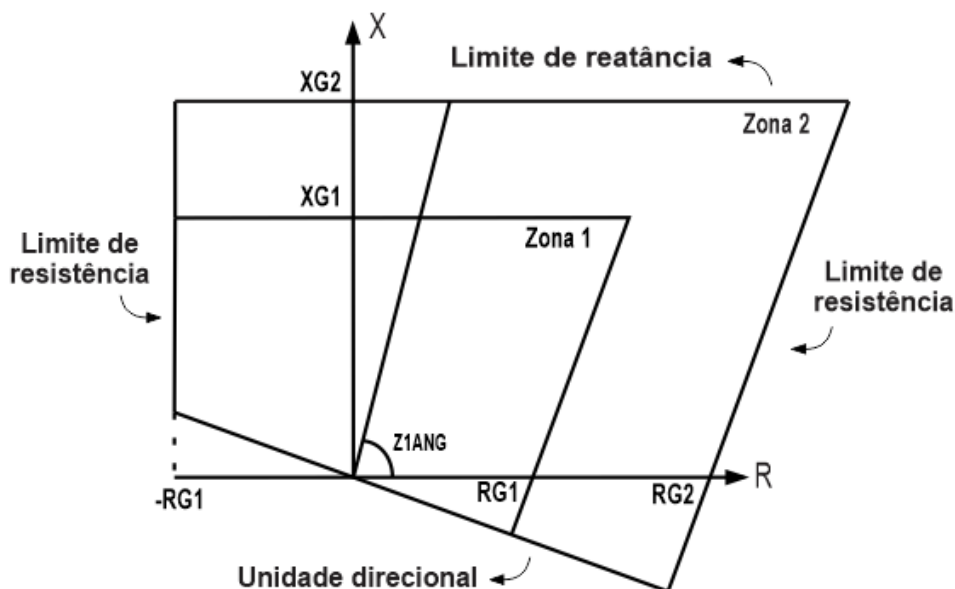
A Figura 3 representa um elemento Quadrilateral típico.

O elemento de reatância X estabelece o limite da impedância, enquanto que o elemento de resistência do lado direito determina a cobertura resistiva para as faltas. O elemento de resistência do lado esquerdo é responsável por limitar a operação do relé para o fluxo de carga reverso. O elemento direcional mantém a unidade detectando somente faltas à frente (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010)

2.3.2.1 Elemento de reatância

O elemento de reatância mede o ângulo de fase Θ entre os sinais de operação S_{op} , Equação (14), e de polarização S_{pol} , Equação (15), por meio de um comparador de fase do tipo seno. A característica de operação é uma linha reta, e o torque é positivo, para $0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$.

Figura 3 – Elemento de distância do tipo Quadrilateral



Fonte: Adaptado de Schweitzer Engineering Laboratories, Inc (2010).

Os ângulos $\Theta = 0^\circ$ e $\Theta = 180^\circ$ definem o limite de reatância no plano R-X (ROBERTS; SCHWEITZER; GUZMAN, 1993).

$$S_{op} = r \cdot Z_{1L} \cdot I - V \quad (14)$$

$$S_{pol} = I_p \quad (15)$$

Sendo:

V = Tensão de fase A.

I_p = corrente de polarização.

$$I = I_A + k_0 \cdot I_r$$

$$k_0 = (Z_{0L} - Z_{1L})/Z_{0L}$$

I_r = corrente residual da barra S

Z_{0L} = Impedância de sequência zero da linha.

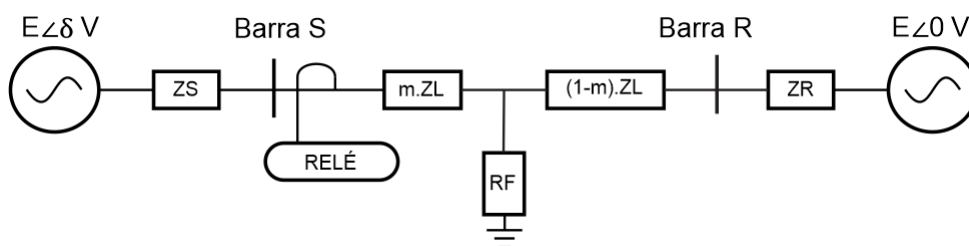
Para um sistema como o da Figura 4, I_r pode ser calculado em termos da corrente total de falta I_F , por meio da Equação (16). Para sistemas homogêneos, onde $\angle Z_{0S} = \angle Z_{0L} = \angle Z_{0R}$, o ângulo de fase de I_r é igual ao de I_F , independentemente das condições de carregamento e da resistência de falta. Diante disto, I_r se mostra uma opção apropriada para o cálculo do elemento de reatância (ROBERTS; SCHWEITZER; GUZMAN, 1993).

$$I_r = \frac{(1 - m) \cdot Z_{0L} + Z_{0R}}{Z_{0S} + Z_{0L} + Z_{0R}} \quad (16)$$

Sendo:

m = distância em por-unidade da falta até a barra S.

Figura 4 – Diagrama unifilar de um sistema elétrico



Fonte: Adaptado de Roberts, Schweitzer e Guzman (1993, p. 8).

Z_{0S} = impedância de sequência zero na barra S.

Z_{0R} = impedância de sequência zero na barra R.

A Equação (17) define o alcance de um elemento de reatância polarizado por I_r de alcance \bar{r} para uma condição de falta no limite do alcance ajustado. Onde \Im representa a parte imaginária de um número complexo. Para faltas internas à uma zona $\bar{r} \leq r$.

$$\bar{r} = \frac{\Im(V \cdot I_r^*)}{\Im(I \cdot Z_{1L} \cdot I_r^*)} \quad (17)$$

2.3.2.2 Elemento de resistência

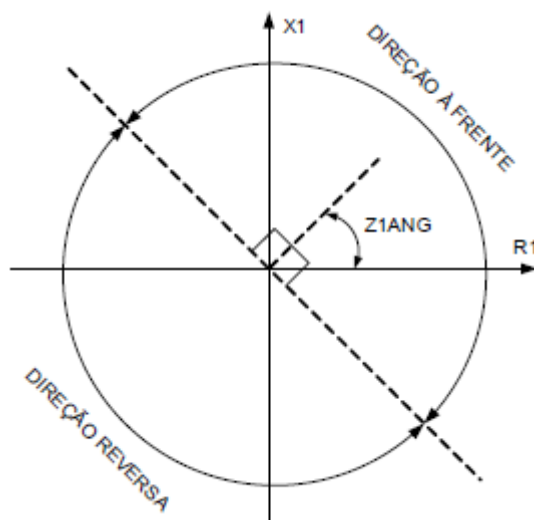
De acordo com Schweitzer e Roberts (2010), ao invés de se usar dois comparadores diferentes, deve-se aplicar um método de mapeamento digital para calcular a resistência de falta (R_F) e testá-la contra os limites de resistência dos lados direito e esquerdo. O cálculo de R_F é dado pela Equação (18), onde I_0 é o fasor da corrente de sequência zero e I_2 o fasor da corrente de sequência negativa.

$$R_F = \frac{\Im[V \cdot (I \cdot Z_{1L})^*]}{\Im[(3/2) \cdot (I_0 + I_2) \cdot (I \cdot Z_{1L})^*]} \quad (18)$$

2.3.2.3 Elemento direcional

Segundo Salles (2007), as únicas grandezas presentes em faltas trifásicas são tensões e correntes de sequência positiva, as quais podem ser utilizadas para produzir um único elemento direcional trifásico. A característica de um elemento direcional que mede a impedância de sequência positiva da linha é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Elemento direcional de impedância de sequência positiva



Fonte: Adaptado de Salles (2007, p. 86).

A impedância de sequência negativa pode ser calculada através da seguinte equação:

$$Z_1 = \frac{\Re[V_1 \cdot (I_1 \cdot 1 \angle Z_{L1})^*]}{|I_1|^2} \quad (19)$$

O elemento direcional indica uma falta à frente quando o ângulo da impedância de sequência positiva ($Z1ANG$) estiver entre $Z1ANG - 90^\circ$ e $Z1ANG + 90^\circ$, fora destes limites, a falta é declarada na direção reversa (SALLES, 2007).

2.3.3 Cálculo da impedância aparente

Em caso de curto-circuito, ou demais distúrbios ocorridos em linhas de transmissão, o relé determina o valor da impedância aparente do local onde ocorreu a falta até o ponto no qual o mesmo está instalado, por meio da divisão entre os valores de tensão e corrente medidos nos terminais do elemento de distância. Estes valores de impedância são calculados tanto para os chamados loops de falta fase-terra, quanto para os loops fase-fase, por meio das equações a seguir (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007):

2.3.3.1 Loops de faltas fase-fase

As Equações 20, 21 e 22 são utilizadas para o cálculo da impedância aparente de faltas que envolvam duas fases.

$$Z_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} \quad (20)$$

$$Z_{BC} = \frac{V_B - V_C}{I_B - I_C} \quad (21)$$

$$Z_{CA} = \frac{V_C - V_A}{I_C - I_A} \quad (22)$$

Onde V_A e I_A representam os fasores de tensão e corrente da fase A, assim como V_B e I_B , e V_C e I_C representam os valores de tensão e corrente nas fases B e C, respectivamente.

2.3.3.2 Loops de faltas fase-terra

De forma similar, o valor da impedância para faltas fase-terra pode ser determinado por meio das seguintes equações:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A + k_0 \cdot I_0} \quad (23)$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B + k_0 \cdot I_0} \quad (24)$$

$$Z_C = \frac{V_C}{I_C + k_0 \cdot I_0} \quad (25)$$

Sendo I_0 a corrente de sequência zero do sistema.

2.3.3.3 Loops de faltas trifásicas

O cálculo da impedância aparente para faltas trifásicas pode ser efetuado por qualquer uma das equações anteriores.

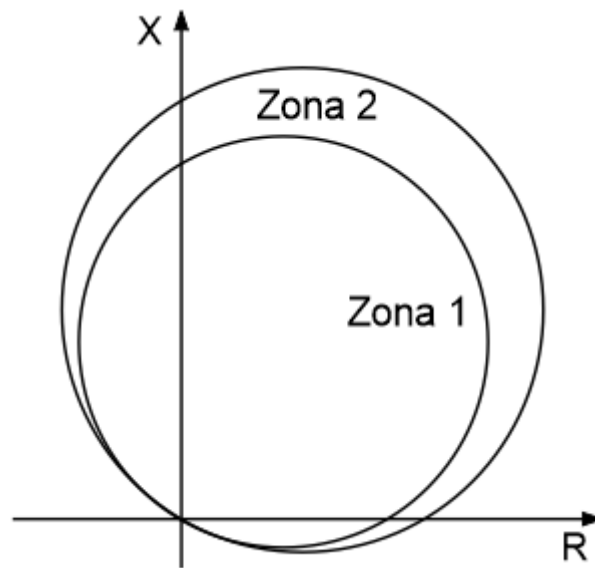
2.3.3.4 Decisão de abertura – Zonas de proteção

Após o cálculo da impedância aparente/distância vista pelo relé, o algoritmo determina a zona de proteção na qual a falta se encontra. Uma zona de proteção é caracterizada por uma porção ou equipamento que venha a ser protegido por um sistema de proteção, o qual pode consistir em um ou vários relés, responsáveis por todas as faltas ocorridas dentro desta zona de proteção (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007).

De acordo com (REIS, 2015), o desempenho de relés de distância próximo às suas zonas limites não é previsível devido à imprecisão na medição de distância, resultantes de erros em transdutores, TC's, e até mesmo por imprecisões decorrentes dos cálculos do próprio relé. Sendo assim, não é possível a cobertura de 100% da linha de transmissão na prática, tornando-se necessário o uso de duas ou mais zonas de proteção para garantir a cobertura total da linha, como apresentado na Figura 6.

A zona 1 é geralmente ajustada para atuar instantaneamente alcançando 80% da impedância de sequência positiva da linha, afim de evitar sua atuação para uma falta fora da linha; já a zona 2 é ajustada para proteger, no mínimo 120%, com um tempo de atuação em torno de 0,3 à 0,5 segundo, afim de assegurar a seletividade da zona 1 das zonas proteção das linhas adjacentes (SALLES, 2007).

Figura 6 – Zonas de proteção, 1 e 2, de um elemento de distância



Fonte: Adaptado de Mascher (2010, p. 27).

2.3.4 Cálculo das componentes simétricas de tensão e corrente

De acordo com Sato e Freitas (2015), o método das Componentes simétricas desenvolvido por Charles Legeyt Fortescue (1876-1936) é utilizado para a análise de sistemas trifásicos desequilibrados, decompondo estes em três sistemas equilibrados, denominados: sequência positiva, negativa e zero:

- Componente de sequência positiva(+): é composta por três fasores de módulos iguais e defasados 120° entre si, tendo a mesma sequência de fases do sistema original.
- Componente de sequência negativa(-): é composta por três fasores de módulos iguais e defasados 120° entre si, tendo a sequência de fases inversa do sistema original.
- Componente de sequência zero($_0$): é composta por três fasores de módulos iguais e em fase.

As Equações 26, 27 e 28 apresentam analiticamente método das componentes simétricas:

$$A = A_+ + A_- + A_0 \quad (26)$$

$$B = B_+ + B_- + B_0 \quad (27)$$

$$C = C_+ + C_- + C_0 \quad (28)$$

Sendo A , B e C , a representação dos fasores do sistema original.

Para que a solução deste sistema seja única é necessário reduzir o número de incógnitas para três, utilizando as equações de equivalência apresentadas abaixo:

$$B_+ = a^2 \cdot A_+ \quad (29)$$

$$C_+ = a \cdot A_+ \quad (30)$$

$$B_- = a \cdot A_- \quad (31)$$

$$C_- = a^2 \cdot A_- \quad (32)$$

Sendo a^2 e a operadores dados pelas Equações 33 e 34. O operador a^2 rotaciona o fasor em 240° , enquanto que o operador a rotaciona fasor em 120° .

$$a^2 = e^{j240} \quad (33)$$

$$a = e^{j120} \quad (34)$$

Substituindo as equações de equivalência nas Equações 26, 27 e 28, pode-se escrever os fasores A , B e C na forma matricial a seguir:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_+ \\ A_- \\ A_0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

ou na forma compacta:

$$P = [T] \cdot S \quad (36)$$

Sendo $[T]$ denominada: Matriz de transformação de componentes simétricas. Fazendo a inversa de $[T]$ e isolando S , obtém-se, na forma matricial, a Equação 37, a qual foi utilizada para a identificação das componentes simétricas deste projeto.

$$\begin{bmatrix} A_+ \\ A_- \\ A_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (37)$$

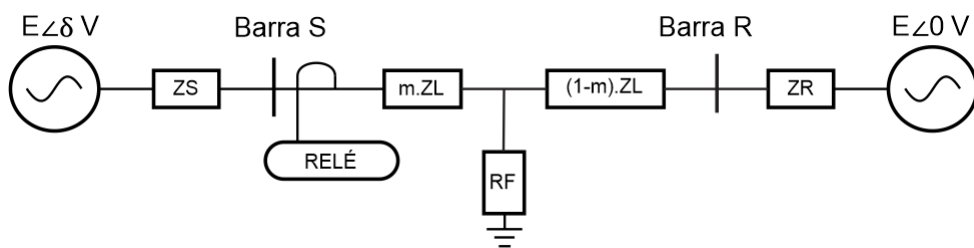
3 MÉTODOS DE PESQUISA

Esta seção tem o propósito de apresentar a metodologia e lógica utilizada para elaboração deste trabalho.

3.1 Sistema elétrico utilizado

A Figura 7 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado.

Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema elétrico



Fonte: Adaptado de Roberts, Schweitzer e Guzman (1993, p. 8).

O sistema é composto por duas fontes de tensão de 400 kV, a primeira com ângulo de fase 0° , e a segunda com um ângulo de fase δ . Na barra S são conectados os equipamentos para aquisição dos dados de tensão e corrente. Foi utilizado um TC com relação de transformação 320:1, e um TP com relação de transformação de 3500:1. Todos os parâmetros apresentados a seguir, foram obtidos do artigo de Roberts, Schweitzer e Guzman (1993, p. 8).

3.1.1 Fontes de tensão da barra S e barra R

- Tensão de linha: $V_L = 400kV$.
- Dados da sequência positiva: $R_{1S} = R_{1R} = 1\Omega$ e $L_{1S} = L_{1R} = 0.0292H$.
- Dados da sequência zero: $R_{0S} = R_{0R} = 1\Omega$ e $L_{0S} = L_{0R} = 0.0292H$.

3.1.2 Linha de transmissão

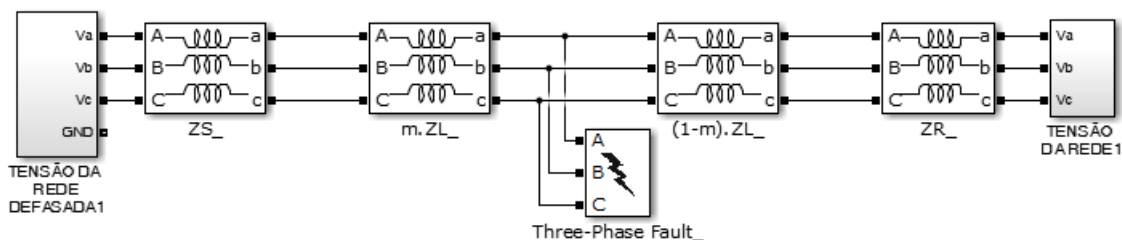
As especificações das impedâncias utilizadas na modelagem da linha de distribuição são apresentadas a baixo.

- Dados da sequência positiva (Z_{1L}): $R_{1L} = 1\Omega$ e $L_{1L} = 0.0292H$.
- Dados da sequência zero (Z_{0L}): $R_0 = 3\Omega$ e $L_0 = 0.0875H$.

3.1.3 Sistema elétrico implementado

A Figura 8 mostra o sistema trifásico implementado utilizado para a obtenção dos dados de tensão e corrente bem como seus subsistemas.

Figura 8 – Sistema elétrico implementado

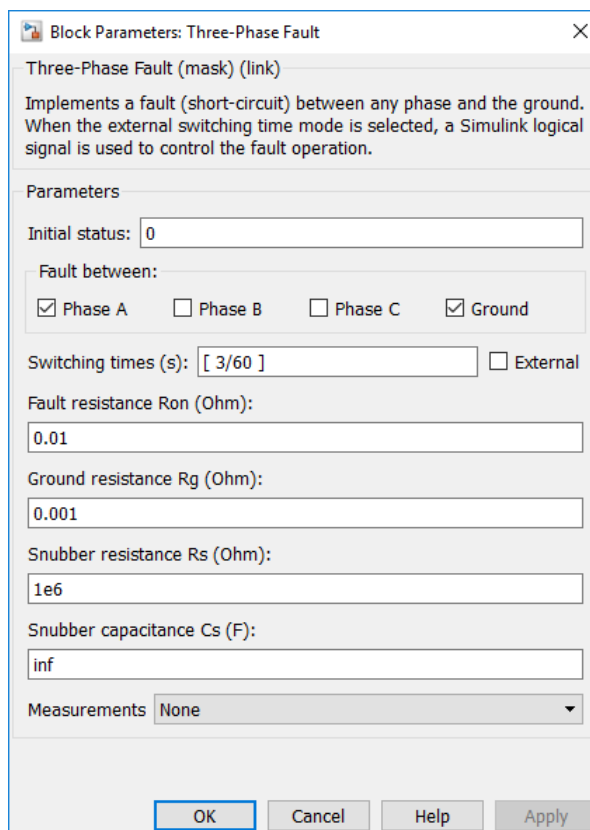


Fonte: Autoria própria.

3.1.3.1 Bloco *Three-phase fault*

A Figura 9 apresenta as configurações do bloco *Three-phase fault*, utilizado para aplicação de faltas no sistema elétrico. Neste bloco é possível determinar as fases envolvidas, se envolve ou não a terra, bem como o momento no qual a falta será aplicada. Mais abaixo são apresentadas as opções de resistência e capacitância a serem configuradas, e o se bloco realizará ou não medições, na opção "*Measurements*".

Figura 9 – Bloco *Three-phase fault* utilizado

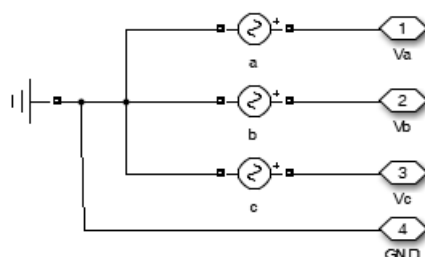


Fonte: Autoria própria.

3.1.3.2 Blocos de impedância e fontes

Para a fonte de tensão trifásica utilizou-se três fontes monofásicas, presentes na biblioteca *SimPowerSystems*. A Figura 10 mostra o interior do bloco "Tensão de rede defasada".

Figura 10 – Subsistema "Tensão de rede defasada"



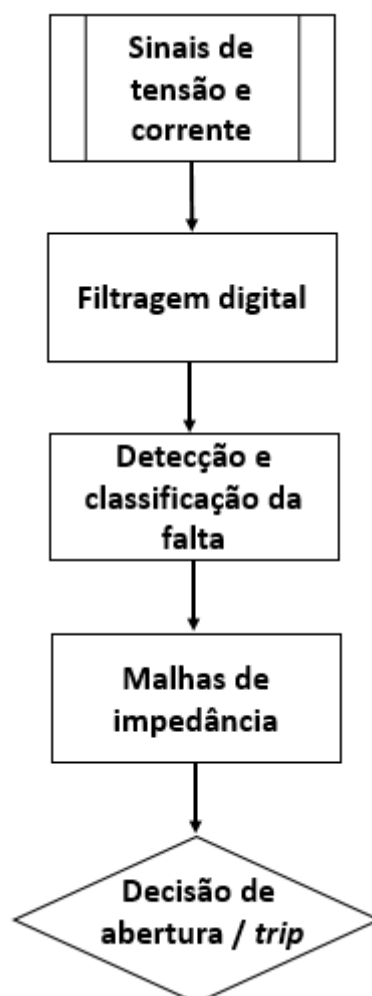
Fonte: Autoria própria.

O bloco utilizado na representação das impedâncias, tanto da linha, quanto das fontes, foi o *Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0*, os quais foram configurados com os dados apresentados nas subseções 3.1.1 e 3.1.2.

3.2 O relé implementado

O fluxograma dado pela Figura 11 apresenta as etapas do relé implementado.

Figura 11 – Etapas do relé de distância implementado

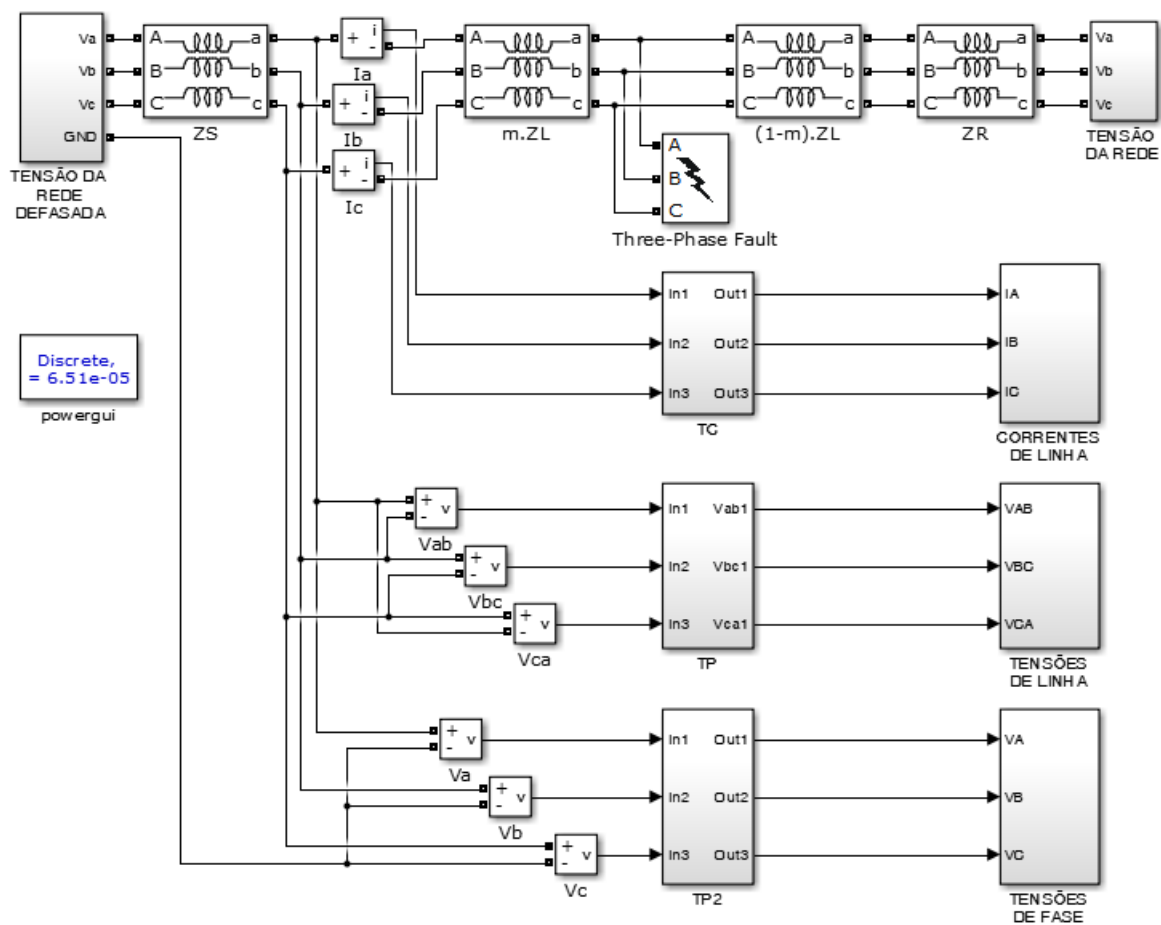


Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Sinais de tensão e corrente

A Figura 12 mostra o sistema elétrico e os subsistemas TC, TP e TP2, os quais representam os transformadores de corrente e tensão, utilizados na adequação dos níveis destes sinais.

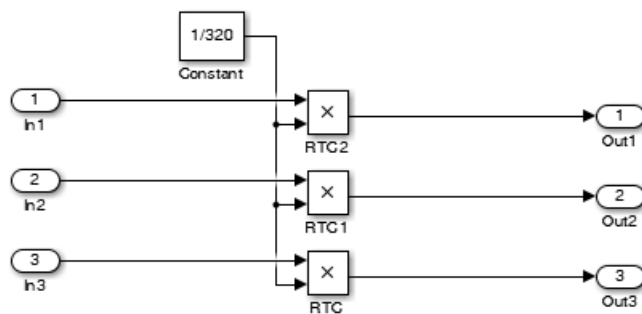
Figura 12 – Sistema elétrico e os blocos de tratamento dos sinais



Fonte: Autoria própria.

É apresentado na Figura 13 o subsistema TC expandido. Neste bloco as correntes lidas pelos medidores são multiplicadas pelo fator de transformação (1/320). Os subsistemas TP e TP2 possuem a mesma configuração, mas para um fator de transformação de (1/3500).

Figura 13 – Subsistema "TC" utilizado



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Filtragem digital

Dentre as inúmeras maneiras de se obter os fasores da componente fundamental de um sinal, está a Transformada de Fourier. Esta técnica fundamenta-se na teoria de transformadas ortogonais, onde “admite-se que a forma de onda medida consiste de um componente fundamental, acrescida de uma infinita soma de componentes harmônicas” (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007, p. 64).

Por meio desta técnica, são obtidos os fasores na frequência fundamental da rede, os quais serão utilizados nos cálculos de operação do relé, apresentados a seguir.

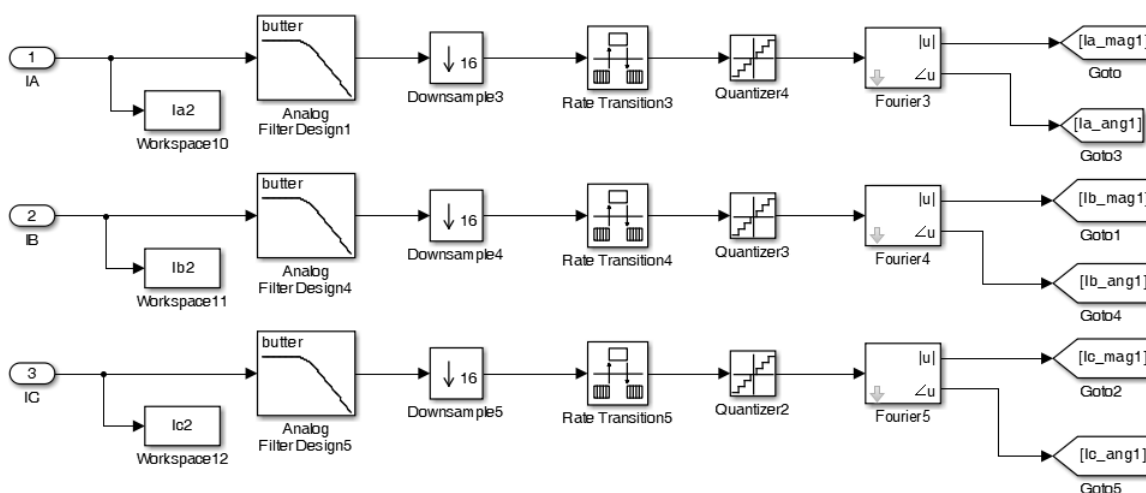
A Figura 14 mostra o subsistema “CORRENTES DE LINHA” expandido. Neste subsistema as correntes passam primeiramente por um filtro *Butterworth* passa-baixas de segunda ordem, e em seguida pelo bloco “Downsample”, responsável por alterar a taxa amostral do sinal, de 256 para 16 amostras por ciclo.

Os blocos “Rate transition” e “Quantizer” são responsáveis pela digitalização dos sinais. O primeiro é utilizado devido à sua função de “Zero Order Hold”, enquanto que no segundo, “Quantizer”, é definido o intervalo de digitalização.

O bloco Fourier realiza a transformada de Fourier do sinal de entrada, e fornece como saída o módulo e o ângulo de fase da componente fundamental do sinal. Em seguida estes dados são enviados por meio dos blocos “goto” para o módulo de proteção de distância, implementado no bloco “Matlab function”, o qual será abordado na subseção à seguir.

Os subsistemas “TENSÕES DE LINHA” e “TENSÕES DE FASE”, apresentam a mesma configuração mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Subsistema “CORRENTES DE LINHA” expandido



Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Detecção e classificação da falta

A Figura 15 apresenta o módulo de proteção implementado. Este possui 29 entradas e 21 saídas. Dentre as entradas estão os valores das magnitudes e fases oriundas dos subsistemas de digitalização e filtragem digital. Os demais sinais de entradas são valores obtidos na saída, necessários para o funcionamento da lógica do programa.

Dentre os valores de saída, estão os sinais de *trip* referentes à primeira zona e à segunda zona, sendo estes, os sinais que indicam a ação do relé diante à uma falta. Os demais valores são os valores armazenados a cada ação do programa, para que possam ser plotados posteriormente. As últimas oito saídas são os valores reintroduzidos no programa, necessários para o funcionamento de sua lógica.

A detecção de faltas foi implementada com base na magnitude das correntes de linha. Uma vez que, em casos de curto-circuito, o valor do módulo da corrente aumenta, é possível identificar o defeito comparando com o valor absoluto nominal. O relé identificará o envolvimento de uma fase em uma falta se o valor absoluto da corrente desta fase for 5% maior que o valor nominal, durante 1 ciclo.

Este método é análogo ao utilizado em Macedo e Coury (2003), onde amostras absolutas de correntes das três fases são comparadas às suas correspondentes um ciclo anterior. Em caso de mudanças superiores à 5% do valor de pico na magnitude da amostra entre os dois casos, o relé indica a ocorrência de uma falta.

Para faltas envolvendo a terra, verifica-se se o valor da corrente residual é maior que zero, também por um período de 1 ciclo.

A Figura 16 mostra o comportamento do módulo das correntes diante uma falta envolvendo a fase B e o terra. Neste caso, para o valor absoluto das correntes de aproximadamente 2,8 A em condições normais, o relé começará a contar o número de amostras acima de 3 A, 5% maior que 2,8. Se após 1 ciclo, 16 amostras, o valor de corrente medido ainda permanecer acima dos 5% do valor da corrente nominal, o relé indicará o envolvimento desta fase em uma falta.

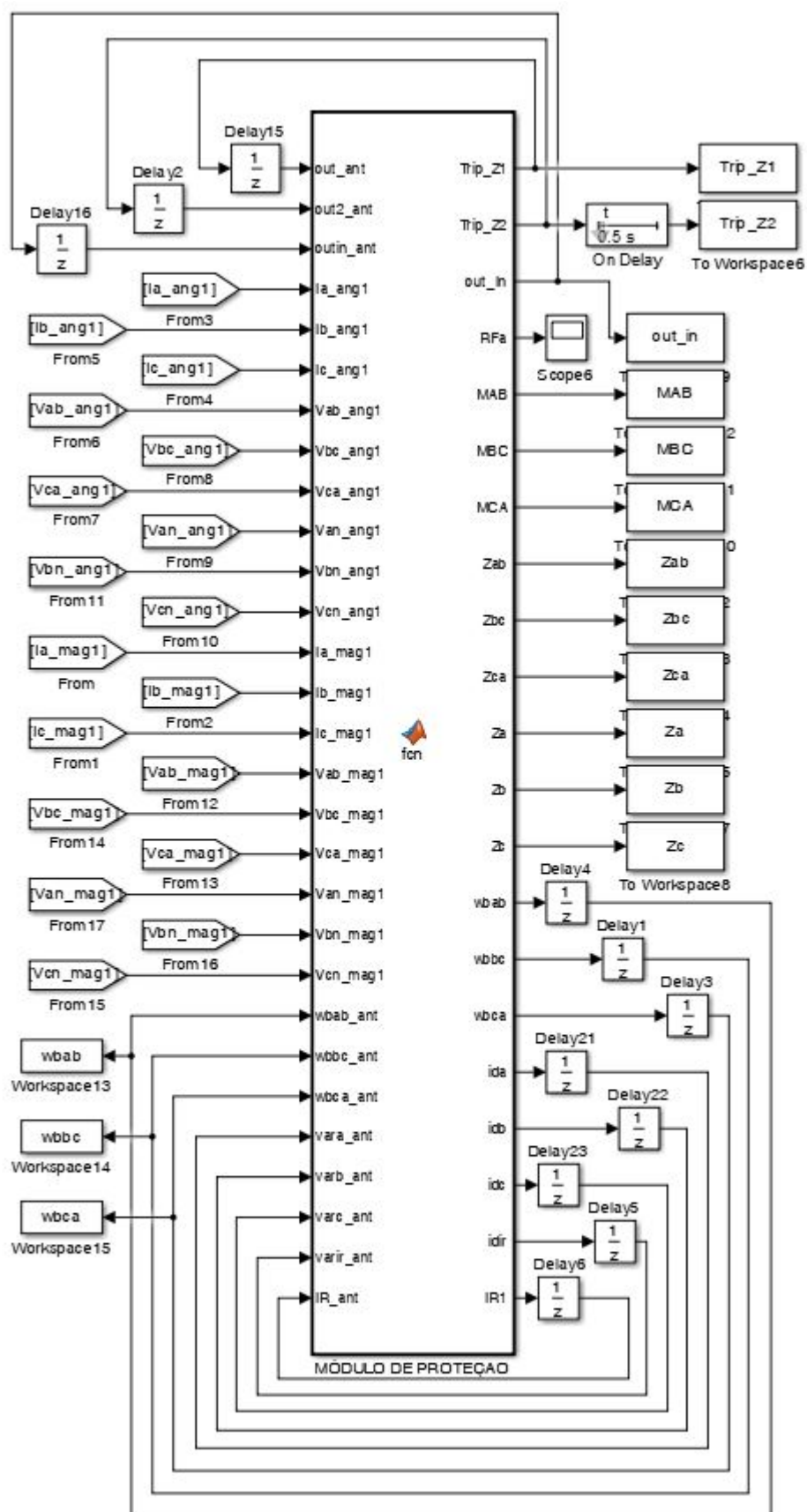
A classificação é realizada por meio da análise das fases envolvidas na falta, e se houve ou não envolvimento da terra.

Para faltas do tipo Fase-Fase (F-F), Fase-Fase-Terra (F-F-T) e Fase-Fase-Fase (F-F-F), a característica de proteção utilizada é a MHO, enquanto que para faltas Fase-Terra (F-T), a característica utilizada é a quadrilateral.

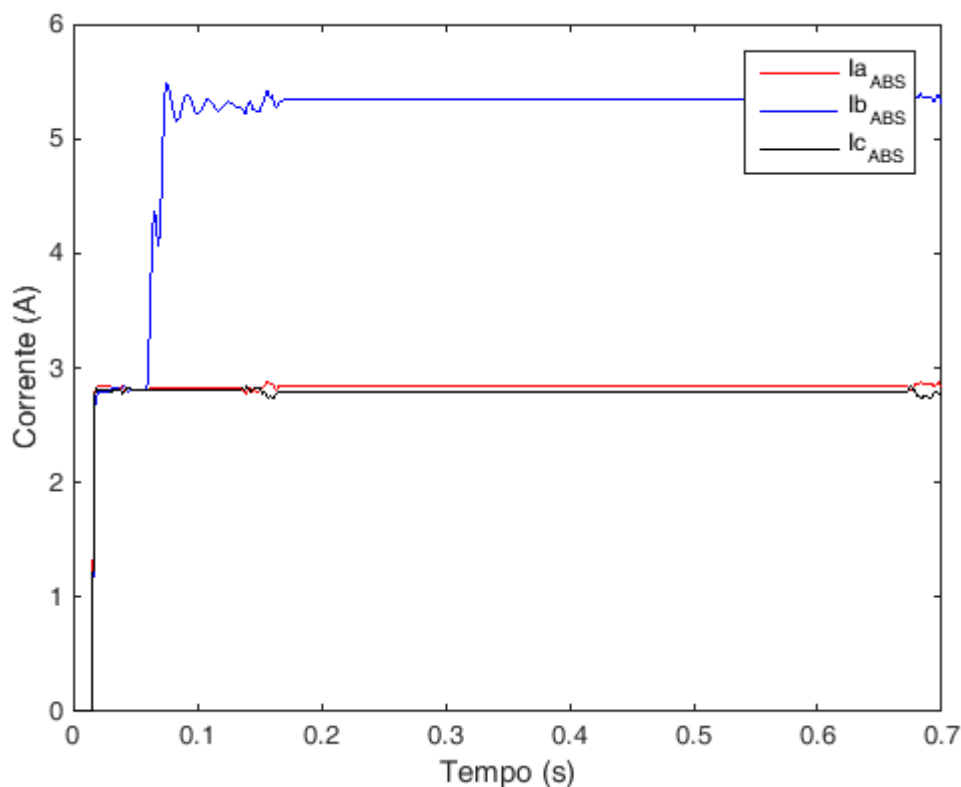
3.2.4 Malhas de impedância

Após classificada a falta, o programa efetua os cálculos das malhas de impedância de acordo com a característica de proteção de distância. O elemento MHO determina se a falta ocorreu ou não em sua zona de proteção, por meio do cálculo das malhas de impedância bifásicas, dadas pelas equações 11, 12 e 13, definidas na subseção 2.3.2.1.

Figura 15 – Módulo de proteção



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Módulo das correntes I_a , I_b e I_c , para uma falta BT

Fonte: Autoria própria.

A característica quadrilateral verifica se há ocorrência ou não de uma falta em alguma de suas zonas de proteção, por meio do cálculo das malhas de impedância monofásicas obtidas por meio da Equação 17, apresentada na seção 2.3.3.1.

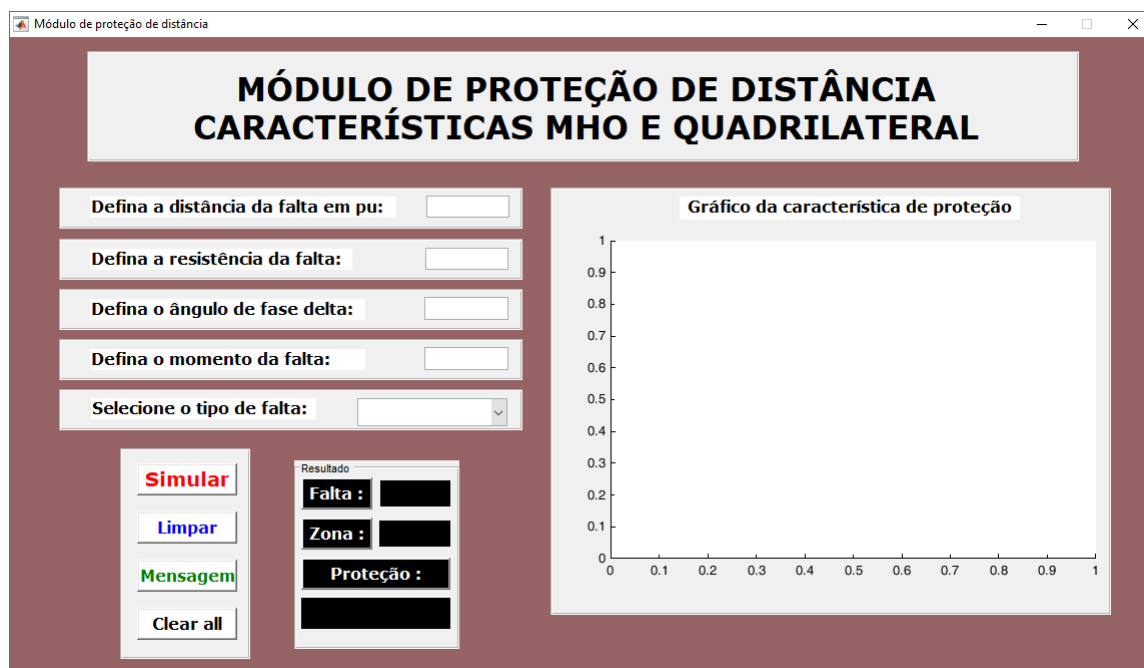
3.2.5 Decisão de abertura / *trip*

A decisão de abertura é tomada de acordo com a zona de ocorrência da falta, a qual é identificada consoante com o tipo de falta classificada.

3.3 Interface gráfica

Afim de tornar o programa mais didático, desenvolveu-se uma interface gráfica por meio da ferramenta *Graphical User Interface* (GUI) do Matlab, a qual é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Interface gráfica desenvolvida



Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Entradas de dados

A primeira entrada é a "Distância da falta em pu", onde o usuário determina a que distância do relé a falta será aplicada.

A segunda entrada é a "Resistência de falta", a qual permite ao usuário definir se haverá ou não a presença de resistência de falta, sendo que o valor mínimo deve ser de 0.001 ohm.

A terceira entrada permite que o usuário defina o ângulo de fase delta, o qual determinará a direção do fluxo de carga.

O momento de aplicação da falta pode ser determinada por meio da quarta entrada, em segundos.

O tipo de falta é definida por meio de um menu, como mostrado na figura 18.

Após preenchidos os dados e selecionado o tipo de falta, o usuário deve pressionar o botão "Simular". Ao final da simulação é mostrado no *display* o tipo de falta detectada, em qual zona ocorreu e qual a característica de proteção de distância foi utilizada.

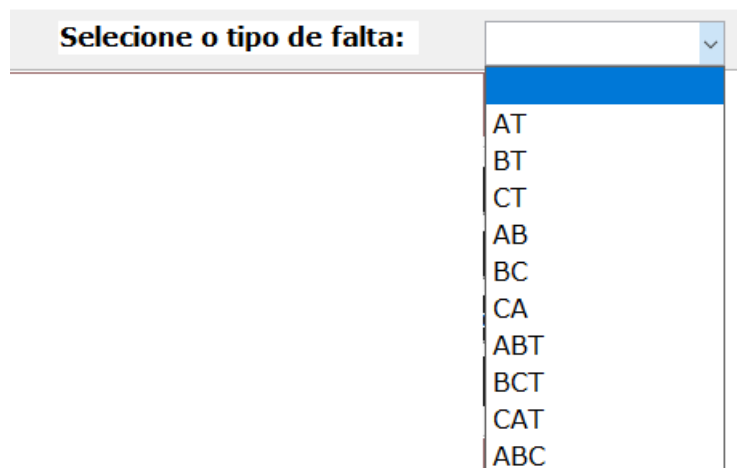
Os demais botões possuem as seguintes funções:

- "Limpar": Utilizado para limpar a área gráfica antes de uma nova simulação.
- "Mensagem": Mostra ao usuário informações úteis sobre o programa e sobre a interface, vide Figura 19.
- "Clear all": Limpa os valores armazenados na área de trabalho e na janela de comando do Matlab.

Ao final da simulação é mostrado na área gráfica, o gráfico da característica de

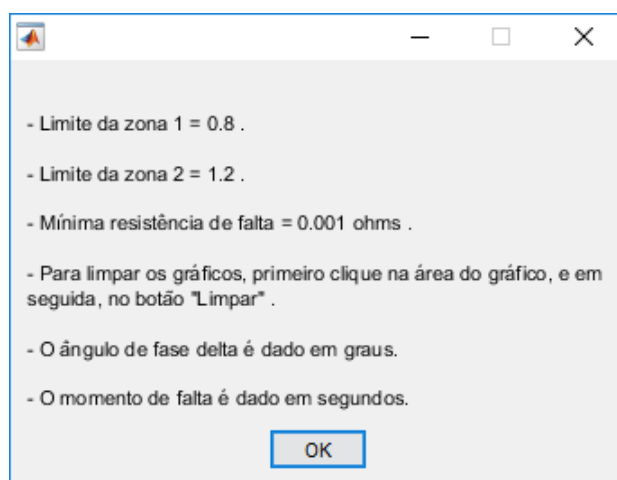
proteção utilizada, a impedância aparente da linha calculada e a impedância de sequência positiva da linha.

Figura 18 – Menu: "Selecione o tipo de falta"



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Botão "Mensagem"



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados de algumas das simulações realizadas, afim de demonstrar o funcionamento dos modelos implementados, e também a eficácia dos mesmos na detecção de faltas aplicadas entre diferentes fases, com a participação ou não do terra, e em diferentes zonas. As faltas ajustadas para as zonas 1 e 2, foram aplicadas à 70 % e à 95 % da impedância de sequência positiva da linha, respectivamente.

4.1 Resultados referentes às faltas aplicadas com um valor fixo de Delta igual à 30°

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio de testes realizados para valores de Delta igual à 30° , de RF iguais à 0,001, 10, 25, 50 e 80 Ω , com o propósito de avaliar o desempenho do módulo de proteção implementado.

4.1.1 Resultados obtidos para a zona 1 de proteção

As Tabelas de 1 à 6 apresentam os resultados dos testes para Delta = 30° , e RF iguais à 0,001, 10, 25, 50, 80 e 90 Ω . A coluna "Resultados" mostra os resultados exibidos no *display* da interface, sendo F a falta classificada, Z a zona de proteção onde ocorreu a falta e C a característica utilizada na identificação e classificação.

Tabela 1 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 0,001 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	0,001	1	F = AT / Z = 1 / C = Quad
BT	0,001	1	F = BT / Z = 1 / C = Quad
CT	0,001	1	F = CT / Z = 1 / C = Quad
AB	0,001	1	F = AB / Z = 1 / C = MHO
BC	0,001	1	F = BC / Z = 1 / C = MHO
CA	0,001	1	F = CA / Z = 1 / C = MHO
ABT	0,001	1	F = ABT / Z = 1 / C = MHO
BCT	0,001	1	F = BCT / Z = 1 / C = MHO
CAT	0,001	1	F = CAT / Z = 1 / C = MHO
ABC	0,001	1	F = ABC / Z = 1 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 10 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	10	1	F = AT / Z = 1 / C = Quad
BT	10	1	F = BT / Z = 1 / C = Quad
CT	10	1	F = CT / Z = 1 / C = Quad
AB	10	1	F = AB / Z = 1 / C = MHO
BC	10	1	F = BC / Z = 1 / C = MHO
CA	10	1	F = CA / Z = 1 / C = MHO
ABT	10	1	F = ABT / Z = 1 / C = MHO
BCT	10	1	F = BCT / Z = 1 / C = MHO
CAT	10	1	F = CAT / Z = 1 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 25 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	25	1	F = AT / Z = 1 / C = Quad
BT	25	1	F = BT / Z = 1 / C = Quad
CT	25	1	F = CT / Z = 1 / C = Quad
AB	25	1	F = AB / Z = 1 / C = MHO
BC	25	1	F = BC / Z = 1 / C = MHO
CA	25	1	F = CA / Z = 1 / C = MHO
ABT	25	1	F = ABT / Z = 1 / C = MHO
BCT	25	1	F = BCT / Z = 1 / C = MHO
CAT	25	1	F = CAT / Z = 1 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 50 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	50	1	F = AT / Z = 1 / C = Quad
BT	50	1	F = BT / Z = 1 / C = Quad
CT	50	1	F = CT / Z = 1 / C = Quad
AB	50	1	F = AB / Z = 1 / C = MHO
BC	50	1	F = BC / Z = 1 / C = MHO
CA	50	1	F = CA / Z = 1 / C = MHO
ABT	50	1	F = ABT / Z = 1 / C = MHO
BCT	50	1	F = BCT / Z = 1 / C = MHO
CAT	50	1	F = CAT / Z = 1 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 80 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	80	1	F = AT / Z = 1 / C = Quad
BT	80	1	F = BT / Z = 1 / C = Quad
CT	80	1	F = CT / Z = 1 / C = Quad
AB	80	1	F = AB / Z = 1 / C = MHO
BC	80	1	F = BC / Z = 1 / C = MHO
CA	80	1	F = CA / Z = 1 / C = MHO
ABT	80	1	F = ABT / Z = 1 / C = MHO
BCT	80	1	F = BCT / Z = 1 / C = MHO
CAT	80	1	F = CAT / Z = 1 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 90 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	90	1	F = AT / Z = 2 / C = Quad
BT	90	1	F = BT / Z = 2 / C = Quad
CT	90	1	F = CT / Z = 2 / C = Quad
AB	90	1	F = AB / Z = 1 / C = MHO
BC	90	1	F = BC / Z = 1 / C = MHO
CA	90	1	F = CA / Z = 1 / C = MHO
ABT	90	1	F = ABT / Z = 1 / C = MHO
BCT	90	1	F = BCT / Z = 1 / C = MHO
CAT	90	1	F = CAT / Z = 1 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Com base nos dados apresentados nas tabelas de 1 à 6, é possível notar que o módulo funciona corretamente na identificação e classificação de faltas monofásica, bifásicas e trifásicas, localizadas na zona 1 de proteção, para resistências de falta até 80 Ω. Para faltas monofásicas com RF igual ou maior que 90 Ω, o relé identifica esta como ocorrida na segunda zona, uma vez que as malhas de impedância demoram mais tempo para estabilizarem e o módulo de proteção identifica a zona de ocorrência da falta após um ciclo. As faltas bifásicas e trifásicas continuam sendo localizadas corretamente pois não são influenciadas pela resistência de falta RF.

4.1.2 Resultados obtidos para a zona 2 de proteção

As Tabelas a seguir apresentam os resultados dos testes para Delta = 30°, e RF iguais à 0,001, 10, 25, 50 e 80 Ω, aplicados na zona 2 de proteção.

Tabela 7 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 0,001 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	0,001	2	F = AT / Z = 2 / C = Quad
BT	0,001	2	F = BT / Z = 2 / C = Quad
CT	0,001	2	F = CT / Z = 2 / C = Quad
AB	0,001	2	F = AB / Z = 2 / C = MHO
BC	0,001	2	F = BC / Z = 2 / C = MHO
CA	0,001	2	F = CA / Z = 2 / C = MHO
ABT	0,001	2	F = ABT / Z = 2 / C = MHO
BCT	0,001	2	F = BCT / Z = 2 / C = MHO
CAT	0,001	2	F = CAT / Z = 2 / C = MHO
ABC	0,001	2	F = ABC / Z = 2 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 10 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	10	2	F = AT / Z = 2 / C = Quad
BT	10	2	F = BT / Z = 2 / C = Quad
CT	10	2	F = CT / Z = 2 / C = Quad
AB	10	2	F = AB / Z = 2 / C = MHO
BC	10	2	F = BC / Z = 2 / C = MHO
CA	10	2	F = CA / Z = 2 / C = MHO
ABT	10	2	F = ABT / Z = 2 / C = MHO
BCT	10	2	F = BCT / Z = 2 / C = MHO
CAT	10	2	F = CAT / Z = 2 / C = MHO
ABC	10	2	F = ABC / Z = 2 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 25 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	25	2	F = AT / Z = 2 / C = Quad
BT	25	2	F = BT / Z = 2 / C = Quad
CT	25	2	F = CT / Z = 2 / C = Quad
AB	25	2	F = AB / Z = 2 / C = MHO
BC	25	2	F = BC / Z = 2 / C = MHO
CA	25	2	F = CA / Z = 2 / C = MHO
ABT	25	2	F = ABT / Z = 2 / C = MHO
BCT	25	2	F = BCT / Z = 2 / C = MHO
CAT	25	2	F = CAT / Z = 2 / C = MHO
ABC	25	2	F = ABC / Z = 2 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 50 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	50	2	F = AT / Z = 2 / C = Quad
BT	50	2	F = BT / Z = 2 / C = Quad
CT	50	2	F = CT / Z = 2 / C = Quad
AB	50	2	F = AB / Z = 2 / C = MHO
BC	50	2	F = BC / Z = 2 / C = MHO
CA	50	2	F = CA / Z = 2 / C = MHO
ABT	50	2	F = ABT / Z = 2 / C = MHO
BCT	50	2	F = BCT / Z = 2 / C = MHO
CAT	50	2	F = CAT / Z = 2 / C = MHO
ABC	50	2	F = ABC / Z = 2 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 80 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	80	2	F = AT / Z = 2 / C = Quad
BT	80	2	F = BT / Z = 2 / C = Quad
CT	80	2	F = CT / Z = 2 / C = Quad
AB	80	2	F = AB / Z = 2 / C = MHO
BC	80	2	F = BC / Z = 2 / C = MHO
CA	80	2	F = CA / Z = 2 / C = MHO
ABT	80	2	F = ABT / Z = 2 / C = MHO
BCT	80	2	F = BCT / Z = 2 / C = MHO
CAT	80	2	F = CAT / Z = 2 / C = MHO
ABC	80	2	F = ABC / Z = 2 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 – Resultados obtidos das simulações para Delta = 30° e RF = 90 Ω

Falta	RF	Zona	Resultado
AT	90	2	F = AT / Z = OUT / C = Quad
BT	90	2	F = BT / Z = OUT / C = Quad
CT	90	2	F = CT / Z = OUT / C = Quad
AB	90	2	F = AB / Z = 2 / C = MHO
BC	90	2	F = BC / Z = 2 / C = MHO
CA	90	2	F = CA / Z = 2 / C = MHO
ABT	90	2	F = ABT / Z = 2 / C = MHO
BCT	90	2	F = BCT / Z = 2 / C = MHO
CAT	90	2	F = CAT / Z = 2 / C = MHO
ABC	90	2	F = ABC / Z = 2 / C = MHO

Fonte: Autoria própria.

Sendo OUT a mensagem que indica a ocorrência da falta fora das zonas de proteção do relé.

Os dados apresentados nas tabelas de 7 à 12 mostram que o módulo funciona de maneira eficaz na identificação e classificação de faltas monofásica, bifásicas e trifásicas, localizadas na zona 2 de proteção, para resistências de falta até 80 Ω. Para faltas monofásicas com RF igual ou maior que 90 Ω, o relé identifica esta como ocorrida fora dos limites da zona 2, uma vez que as malhas de impedância demoram mais tempo para estabilizarem e o módulo de proteção identifica a zona de ocorrência da falta após um ciclo. As faltas bifásicas e trifásicas continuam sendo localizadas corretamente pois não são influenciadas pela resistência de falta RF.

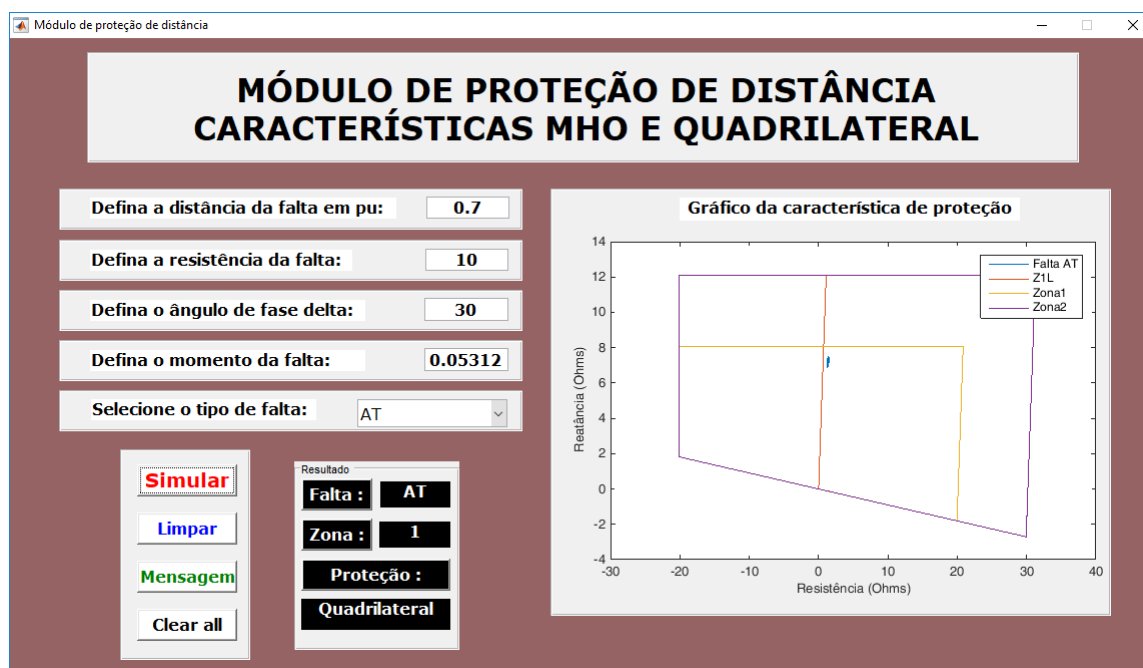
4.2 Resultados gráficos obtidos para faltas F-T, F-F, F-F-T e F-F-F

4.2.1 Falta F-T com $R_F = 10 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$

4.2.1.1 Zona 1

O processo de simulação se iniciou com uma falta aplicada entre a fase A e o terra, na primeira zona de proteção e com um ângulo de fase delta igual à 30° . As configurações da interface e a característica de distância utilizada pelo programa são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Configuração da interface para falta AT aplicada na zona 1

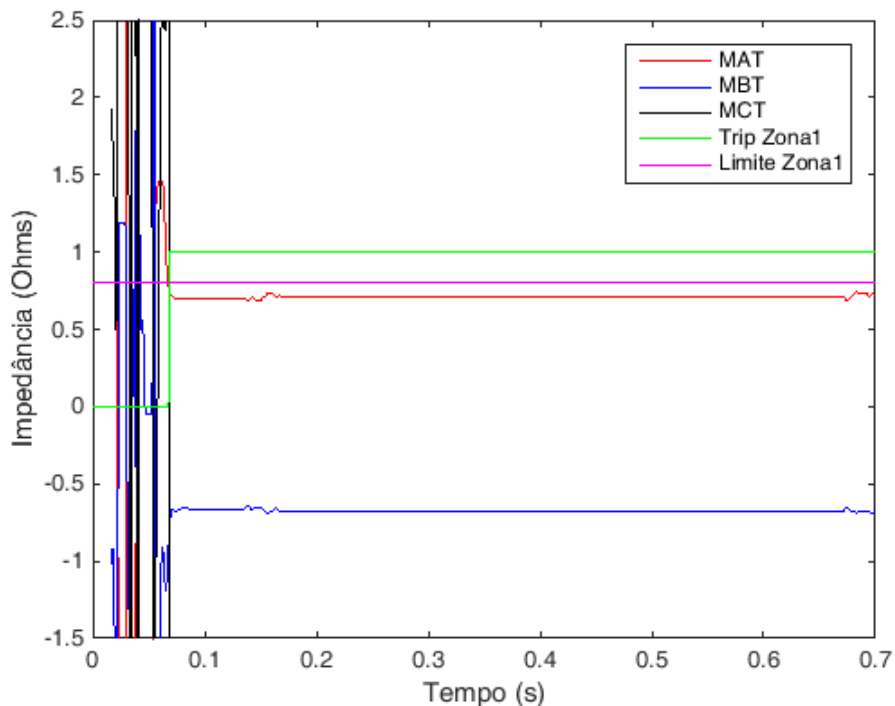


Fonte: Autoria própria.

A falta ocorre aproximadamente no terceiro ciclo, em $t = 0.05312 \text{ s}$, momento no qual a fase A possui um ângulo de incidência de 90° . As Figuras 21, 22 e 23 apresentam os principais resultados obtidos, sendo estes, as curvas das malhas de impedância, oscilografias das tensões e correntes, e o sinal de *trip*, sendo este último o comando individual de disparo do relé.

Na Figura 21 é possível observar o momento em que a curva da malha de impedância AT fica abaixo do limite estabelecido para zona 1, e também o instante no qual é emitido o sinal de *trip* pelo relé, em $t = 0,07083 \text{ s}$, ou seja, 1,06 ciclo após o momento da falta. É possível notar também, que a curva BT está abaixo do limite da zona 1, mas somente a falta AT é indicada. Isto ocorre devido ao fato do programa considerar a ocorrência de faltas apenas para valores positivos dentro das zonas de proteção.

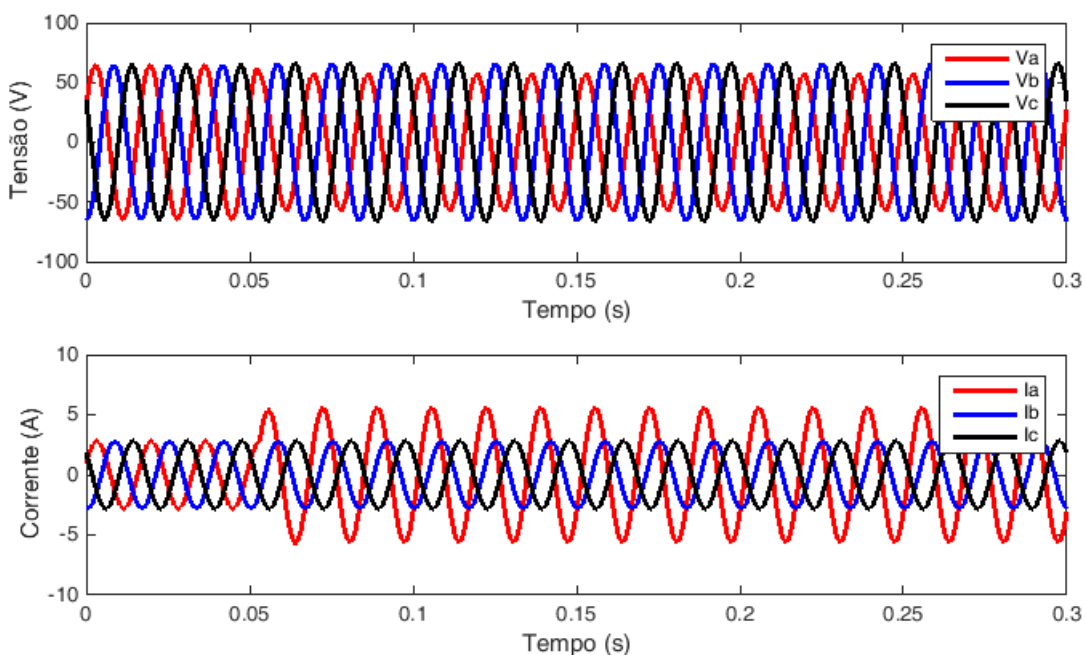
Figura 21 – Malhas de impedância MAT, MBT e MCT obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra



Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 mostra os sinais de tensão e corrente para as três fases, sendo possível observar um pequeno afundamento da tensão e uma elevação da corrente da fase A, o que indica o envolvimento da mesma na falta.

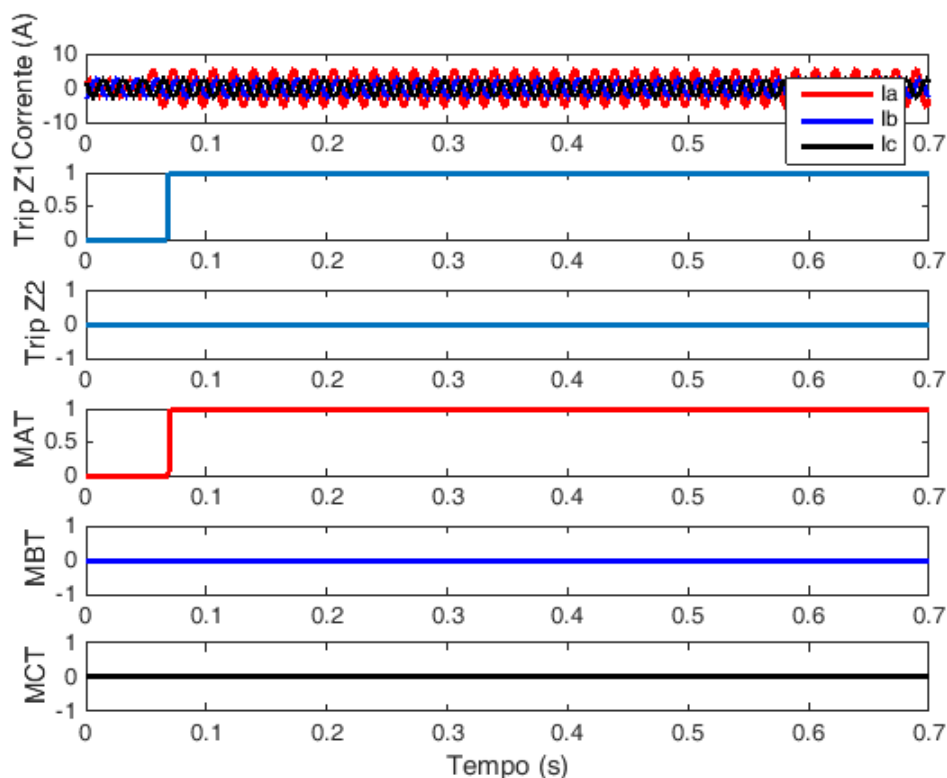
Figura 22 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta AT na zona 1



Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 apresenta as formas de onda das correntes A, B e C, juntamente com os valores digitais dos *trips* da zona 1 (TripZ1) e da zona 2 (TripZ2), e das malhas de impedância MAT, MBT e MCT, indicando o tipo de falta e o momento no qual esta foi identificada. É possível observar também, com base no sinal de corrente, que o *trip* é dado aproximadamente após um ciclo do instante da falta.

Figura 23 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta AT na zona 1

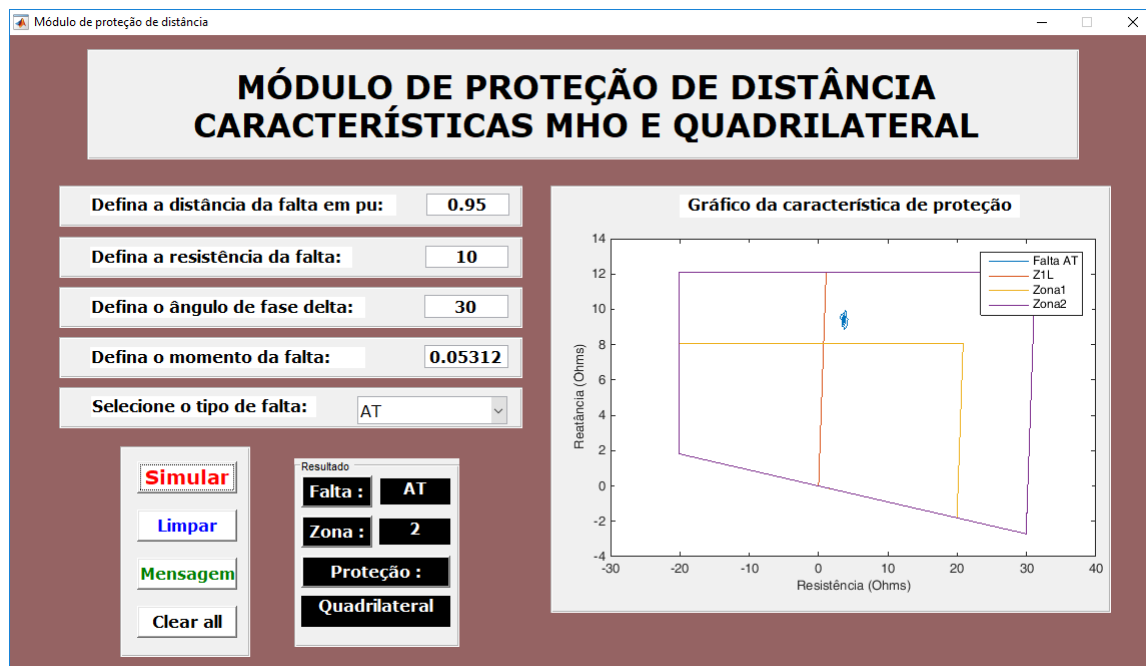


Fonte: Autoria própria.

4.2.1.2 Zona 2

Os resultados obtidos para a zona 2 são apresentados nas figuras a seguir. A Figura 24 exhibe os ajustes para a falta aplicada, juntamente com a representação gráfica da característica quadrilateral e a localização da falta na zona 2 de proteção.

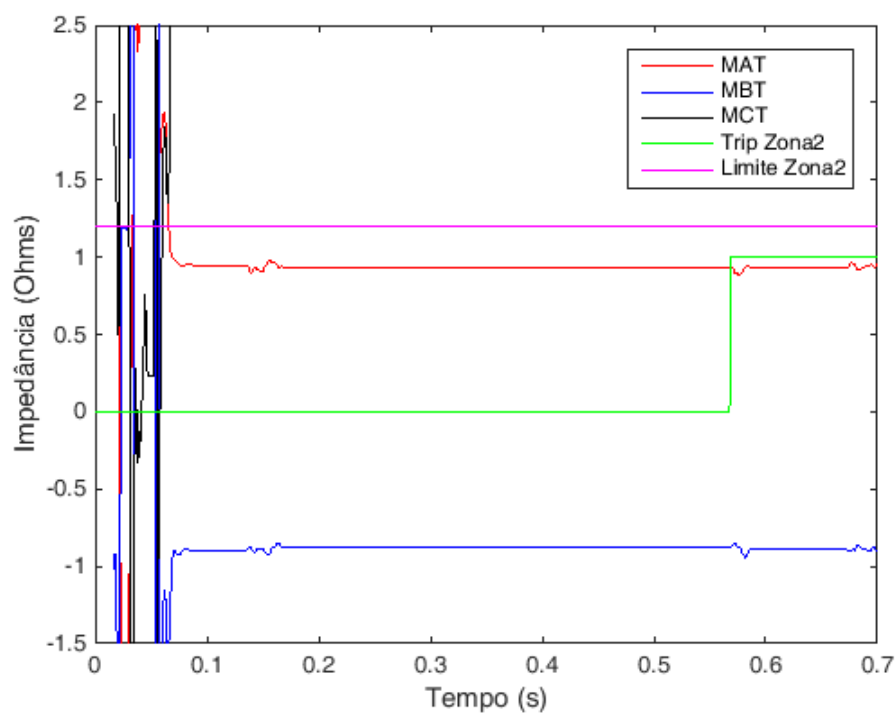
Figura 24 – Configuração da interface para falta AT aplicada na zona 2



Fonte: Autoria própria.

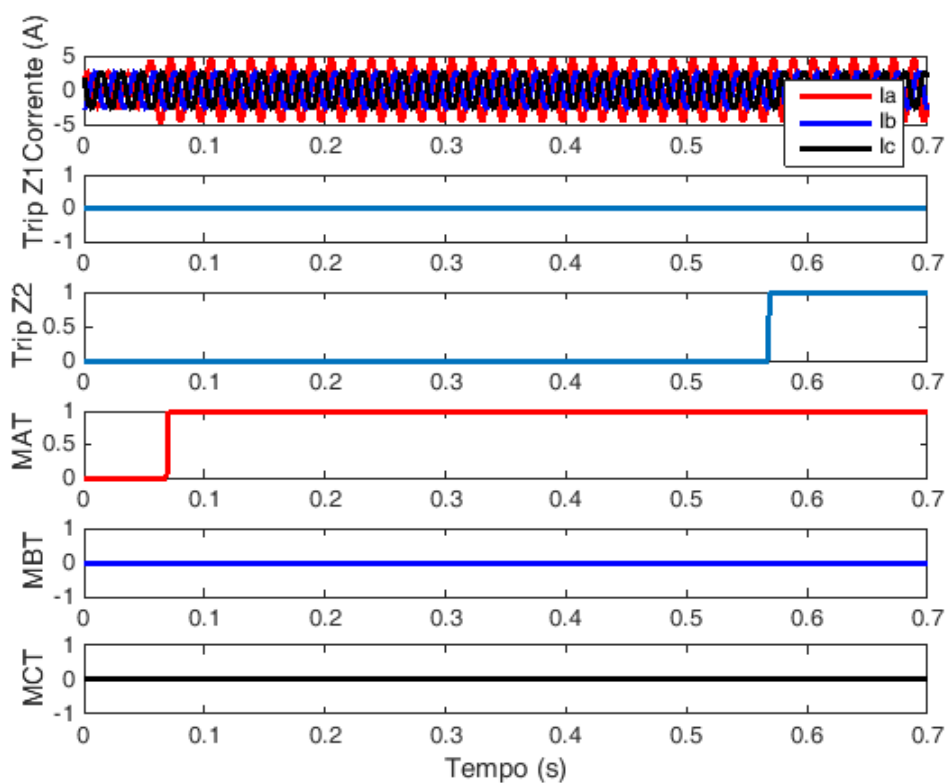
A Figura 25 mostra o momento no qual a malha AT, fica abaixo do limite estabelecido para a zona 2, sendo o sinal de *trip* dado em $t = 0,5792$ s, 0,5 segundo após o instante em que a falta foi identificada, afim de garantir a seletividade da proteção. As curvas de tensão e corrente para esta falta são iguais às apresentadas na Figura 22.

Figura 25 – Malhas de impedância MAT, MBT e MCT obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra



Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 mostra os instantes de identificação e de disparo do *trip*, sendo este último emitido 0,5 segundo após identificada a falta, como especificado.

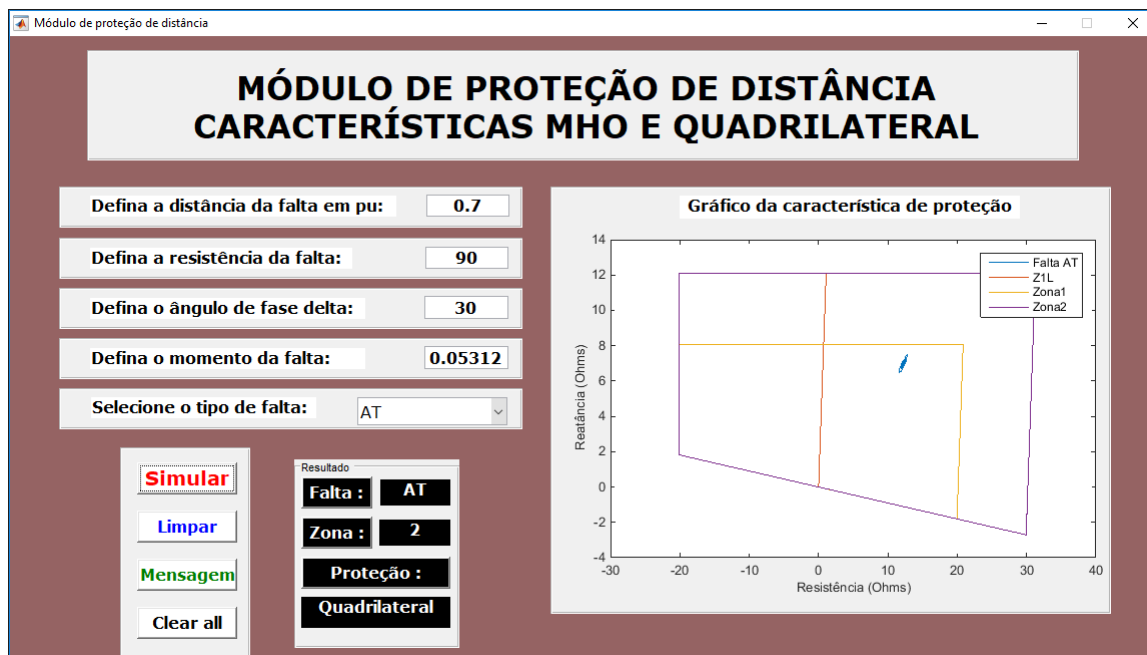
Figura 26 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta AT na zona 2

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Falta F-T com $R_F = 90 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$

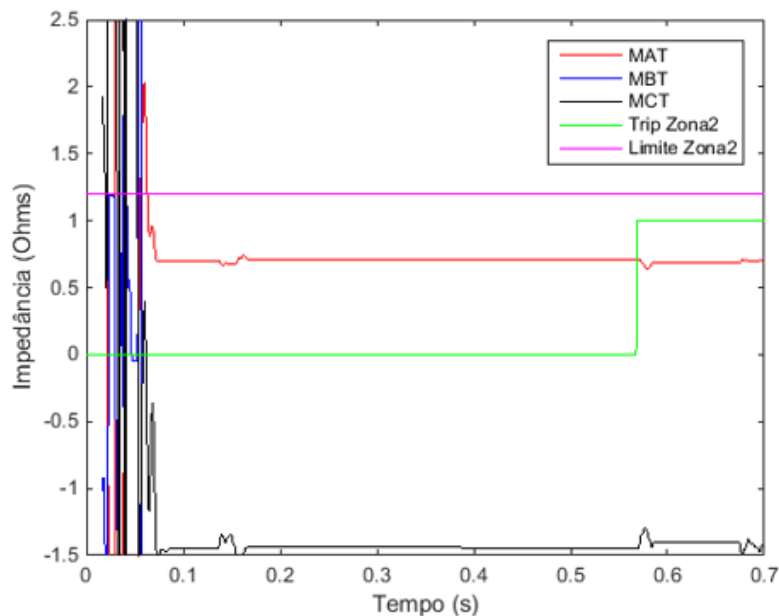
A Figura 27 mostra as configurações ajustadas no módulo de proteção. A falta foi classificada como ocorrida na zona 2, embora o gráfico mostra que a mesma ocorreu na zona 1. Isto ocorre devido ao atraso na estabilização dos valores das malhas de impedância, como pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 27 – Configuração da interface para falta AT com RF 90 Ω aplicada na zona 1



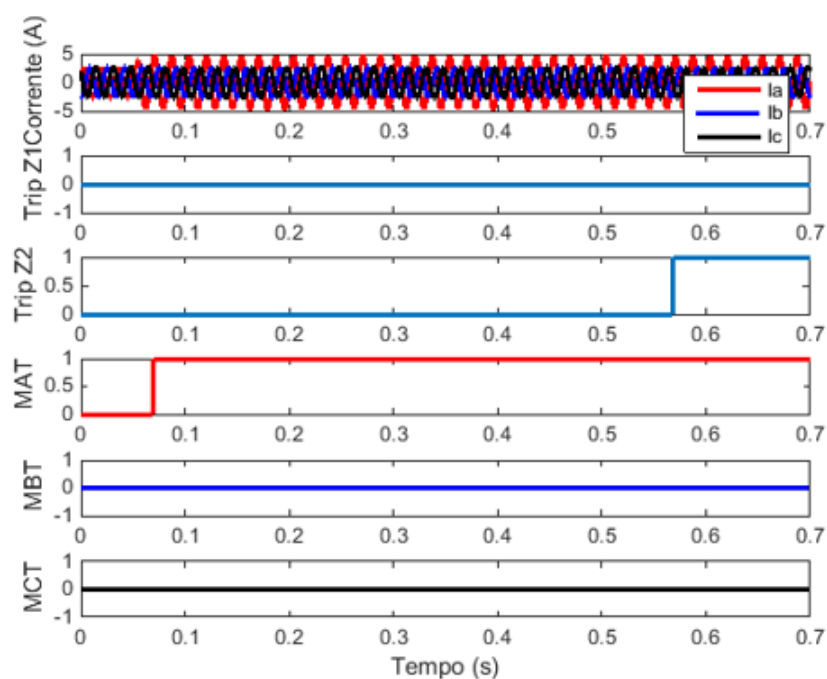
Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Malhas de impedância monofásicas AT, BT e CT



Fonte: Autoria própria.

A Figura 29 mostra as correntes de linha e os *word bits*, onde o sinal de *trip* é emitido 0,5 segundo após a classificação da falta.

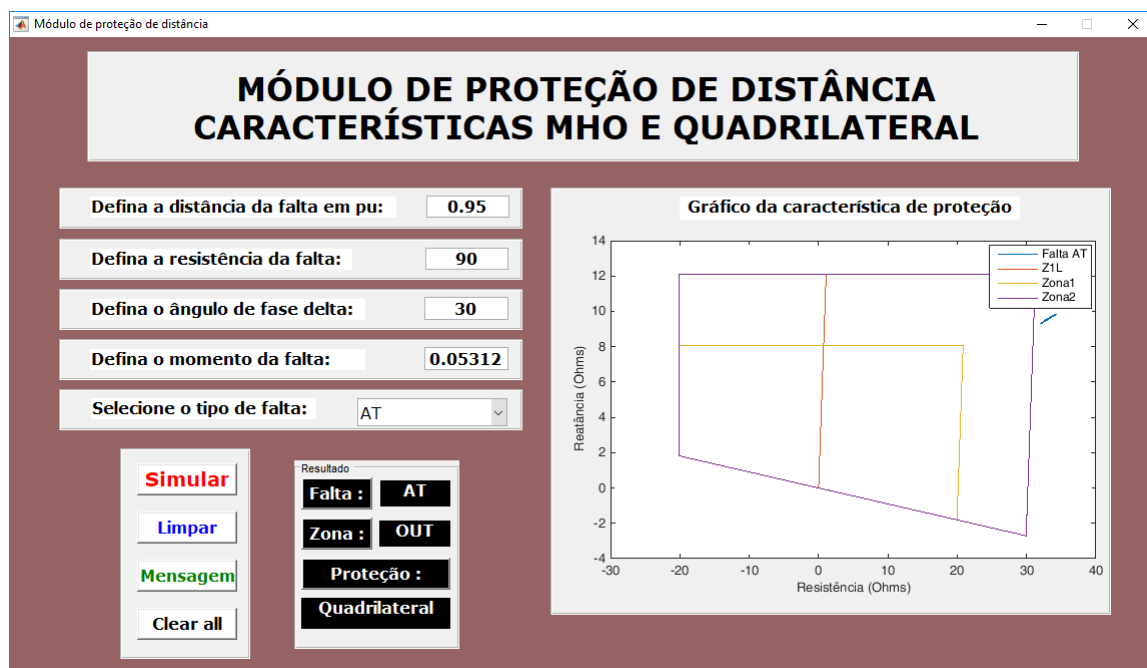
Figura 29 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta AT na zona 1

Fonte: Autoria própria.

4.2.2.1 Zona 2

Os resultados obtidos para a zona 2 são apresentados nas figuras a seguir. A Figura 30 exibe os ajustes para a falta aplicada, juntamente com a representação gráfica da característica quadrilateral a qual mostra a localização da falta fora dos limites da zona 2 de proteção.

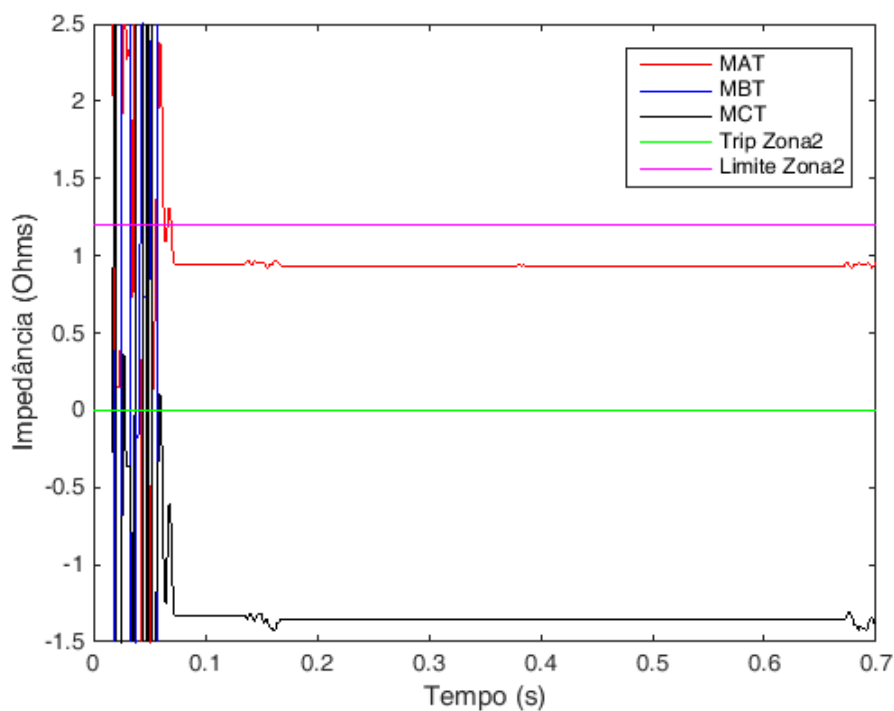
Figura 30 – Configuração da interface para falta AT com RF 90 Ω aplicada na zona 2



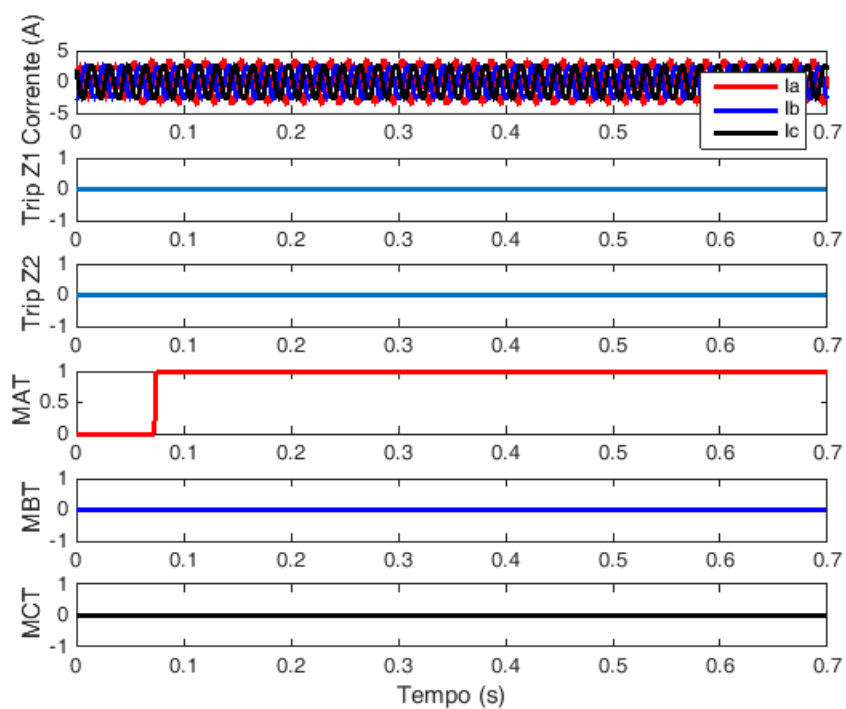
Fonte: Autoria própria.

A Figura 31 mostra o momento em que os valores da malha de impedância AT ficam abaixo do limite da zona 2 de proteção, enquanto que o sinal de *trip* da zona 2 não é emitido, como pode-se observar também na Figura 32.

Figura 31 – Malhas de impedância bifásicas AT, BT e CT



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta AT na zona 2

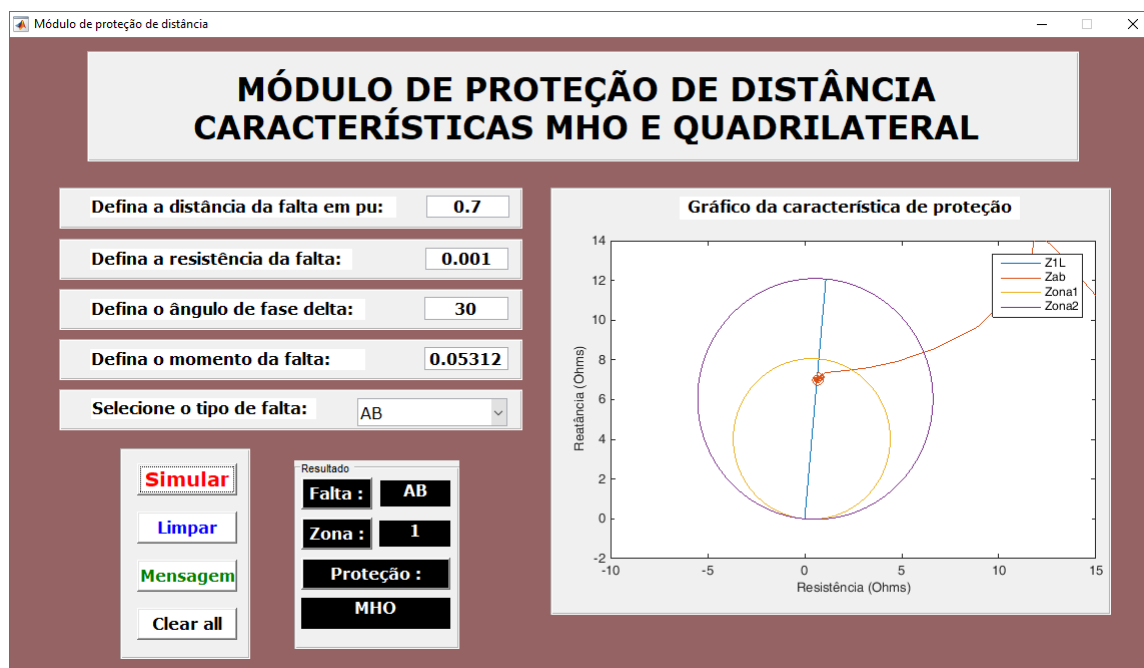
Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Falta F-F com $R_F = 0.001 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$

4.2.3.1 Zona 1

Afim de testar a ação do relé frente à faltas F-F, aplicou-se uma falta entre as fases A e B, com resistência de falta igual à $0,001 \Omega$. A Figura 33 mostra a interface com as configurações utilizadas.

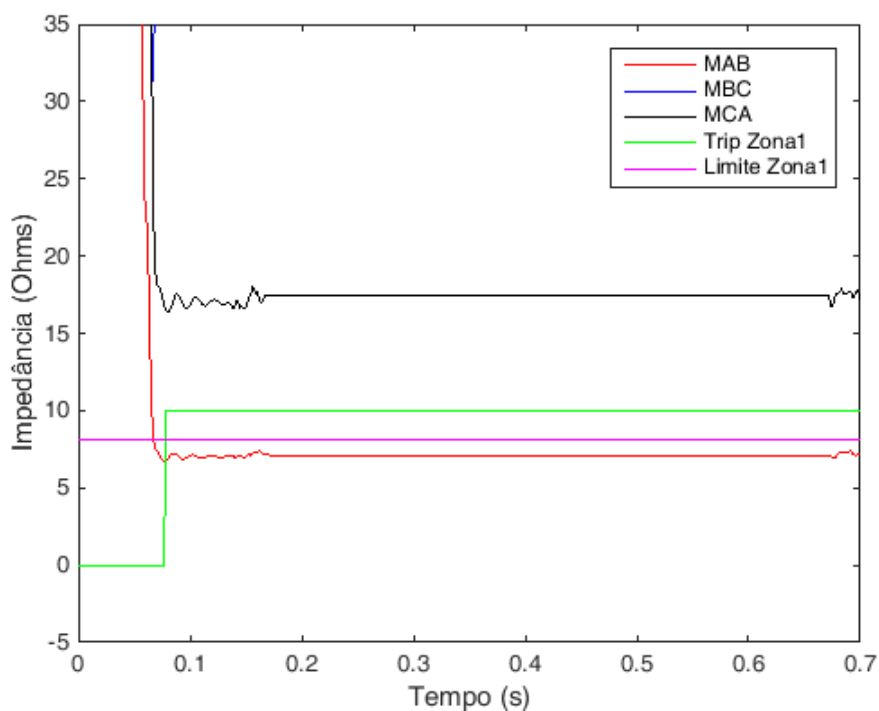
Figura 33 – Configuração da interface para falta AB aplicada na zona 1



Fonte: Autoria própria.

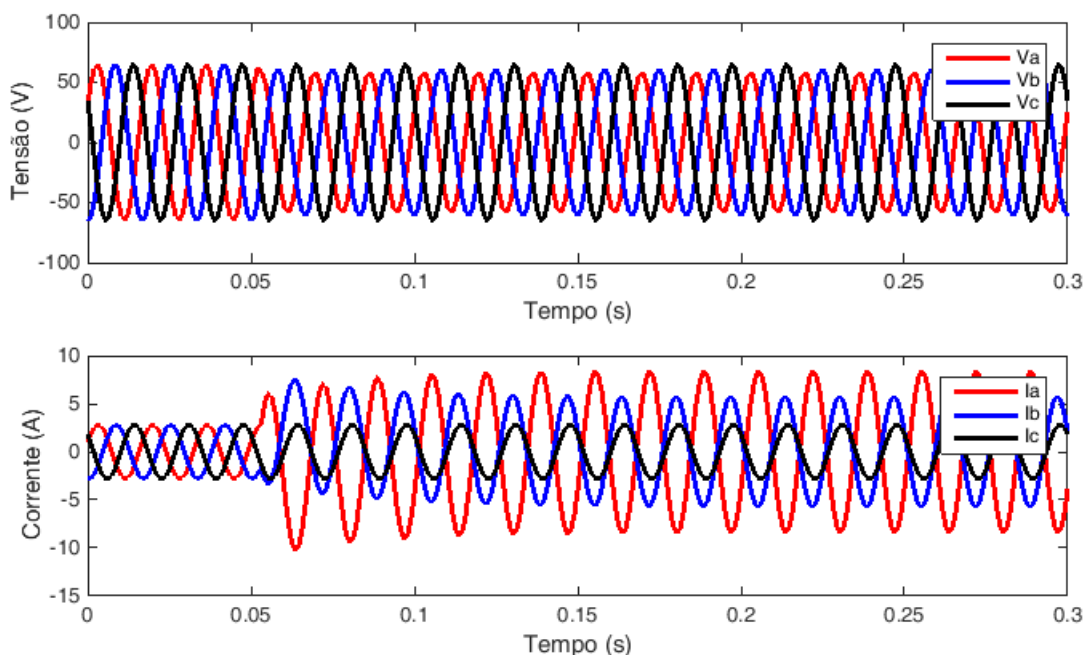
A Figura 34 mostra o momento no qual a curva da malha de impedância fica abaixo do limite definido para primeira zona de proteção, e o sinal de *trip* emitido em $t = 0,07813 s$, 1,5 *ciclo* após o instante da falta.

Figura 34 – Malhas de impedância bifásicas AB, BC e CA



Fonte: Autoria própria.

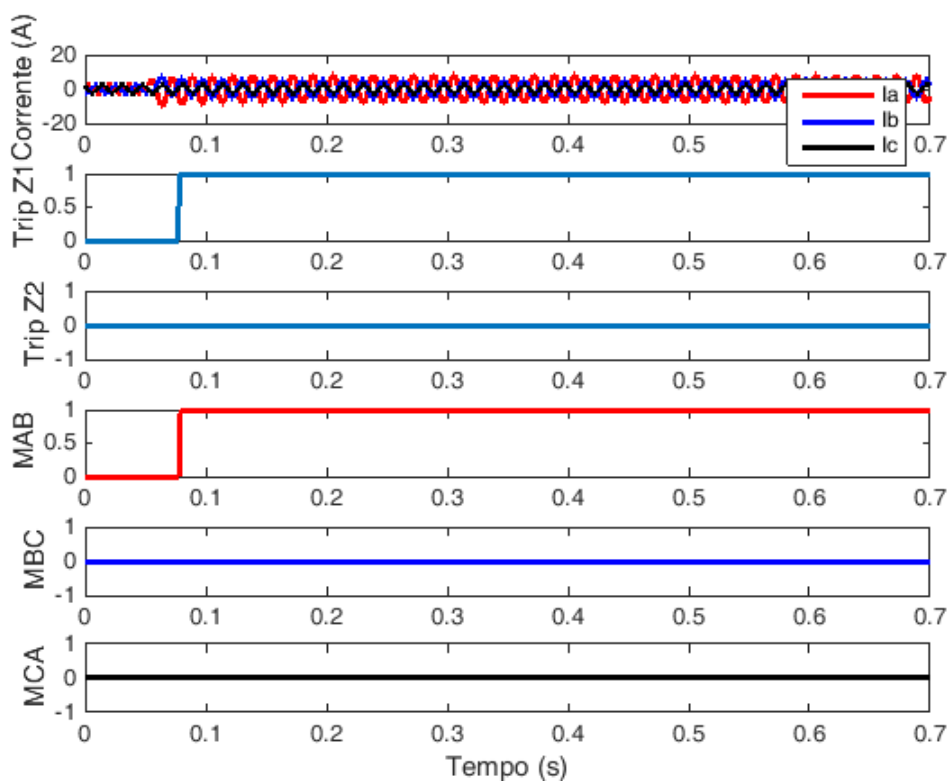
Figura 35 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta AB na zona 1



Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 exibe os sinais de corrente, e os valores digitais dos sinais de *trip* e das malhas de impedância.

Figura 36 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta AB na zona 1

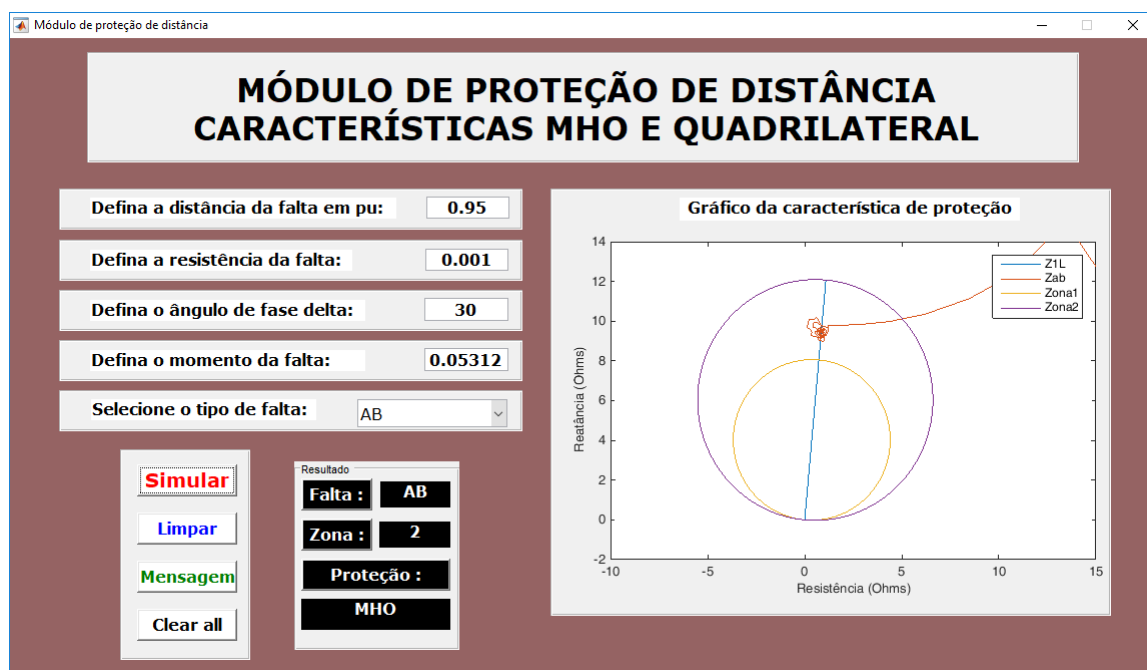


Fonte: Autoria própria.

4.2.3.2 Zona 2

Os resultados obtidos para a zona 2 são apresentados nas figuras a seguir, nas quais é possível observar o sinal de *trip* sendo enviado 0,5 segundo após o instante no qual a falta foi apontada.

Figura 37 – Configuração da interface para falta AB aplicada na zona 2



Fonte: Autoria própria.

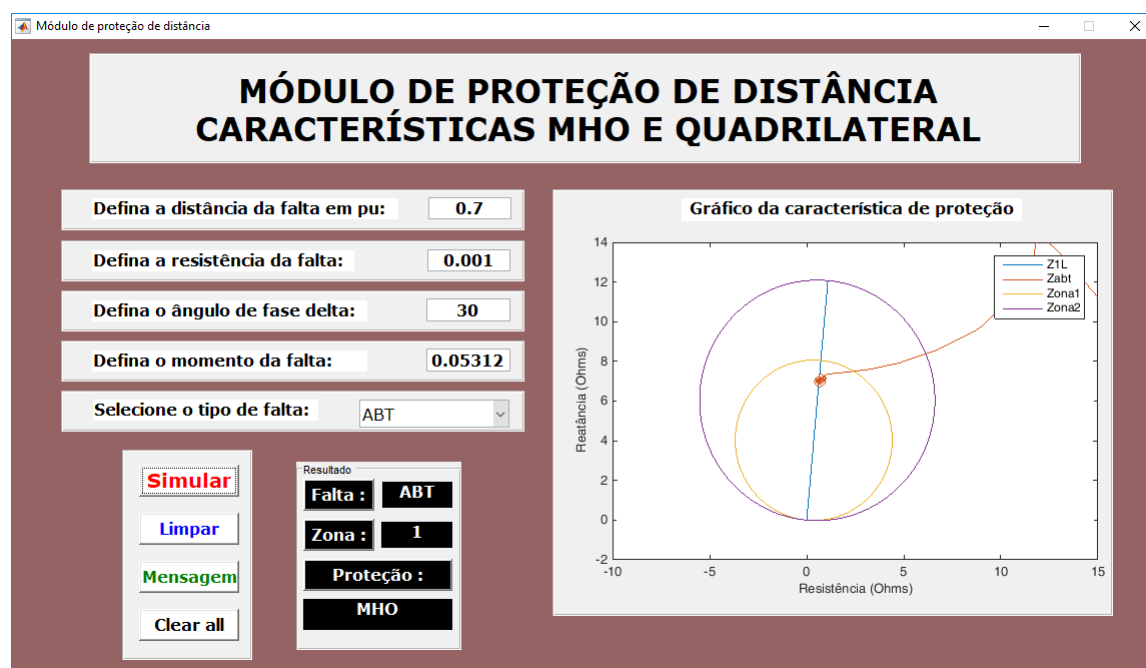
A Figura 38 mostra o instante em que a curva da malha de impedância AB assume valores inferiores ao estabelecido para o limite da zona 2, e o sinal de *trip* sendo gerado 0,5 segundo após identificada a falta.

4.2.4 Falta F-F-T com $RF = 0.001\Omega$ e $\Delta = 30^\circ$

4.2.4.1 Zona 1

Para uma falta fase-fase-terra, aplicou-se um curto-circuito entre as fases A, B e o terra, cujas configurações são apresentadas na Figura 40 .

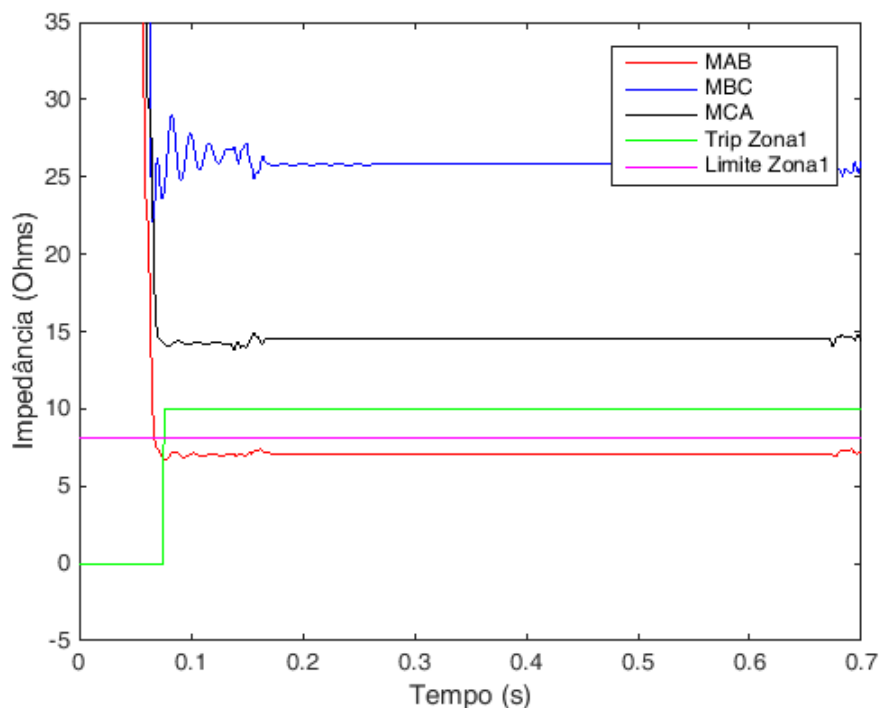
Figura 40 – Configuração da interface para falta ABT aplicada na zona 1



Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 exibe o instante em que a malha de impedância AB, utilizada na classificação da falta, ultrapassa o limite estabelecido para a zona 1, e também o sinal de *trip* sendo emitido em $t = 0,07604 s$, 1,37 *ciclo* após aplicada a falta.

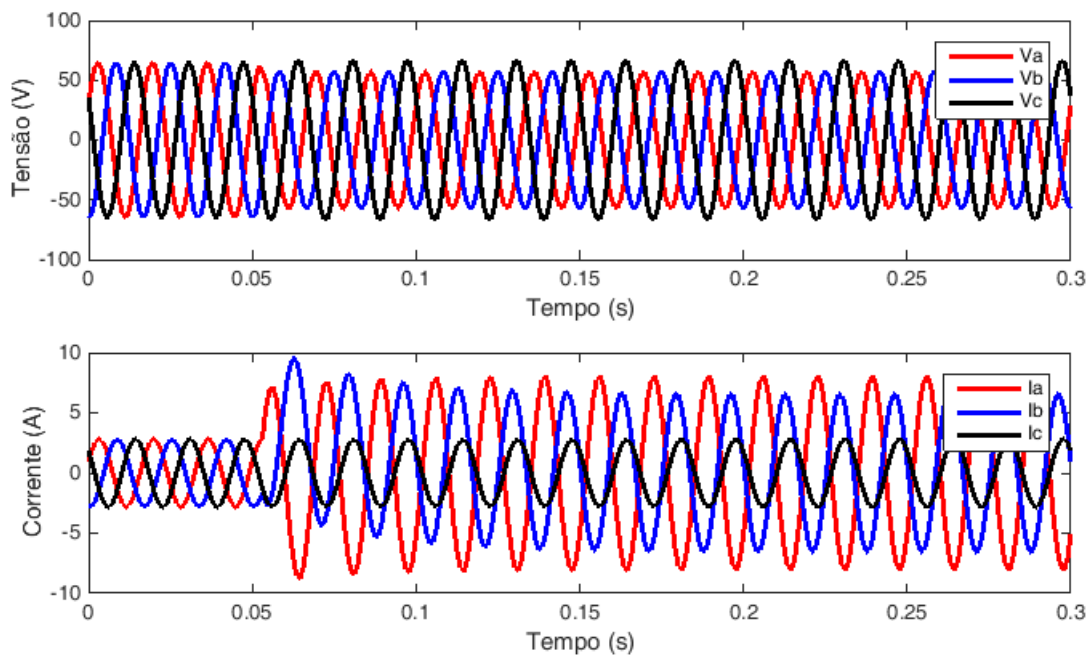
Figura 41 – Malhas de impedância bifásicas AB, BC e CA



Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 42, as curvas de tensão e corrente para a falta ABT.

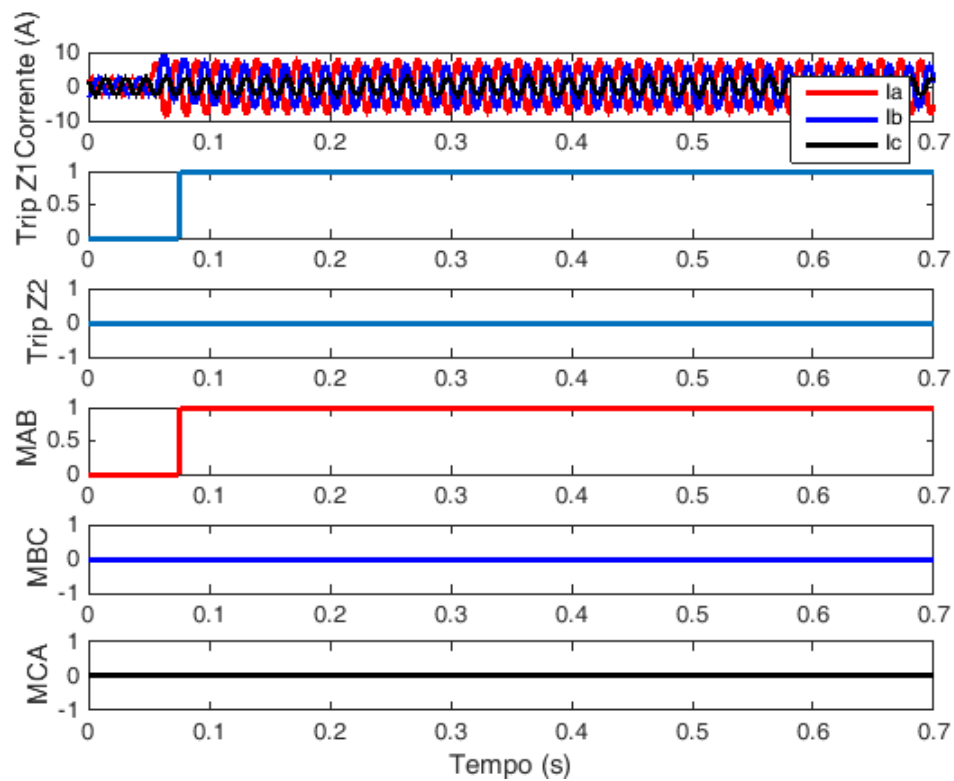
Figura 42 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta ABT na zona 1



Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 mostra as curvas de corrente e os valores digitais positivos de TripZ1 e MABT, indicando que o sinal de *trip* foi dado instantaneamente à classificação da falta.

Figura 43 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta ABT na zona 1

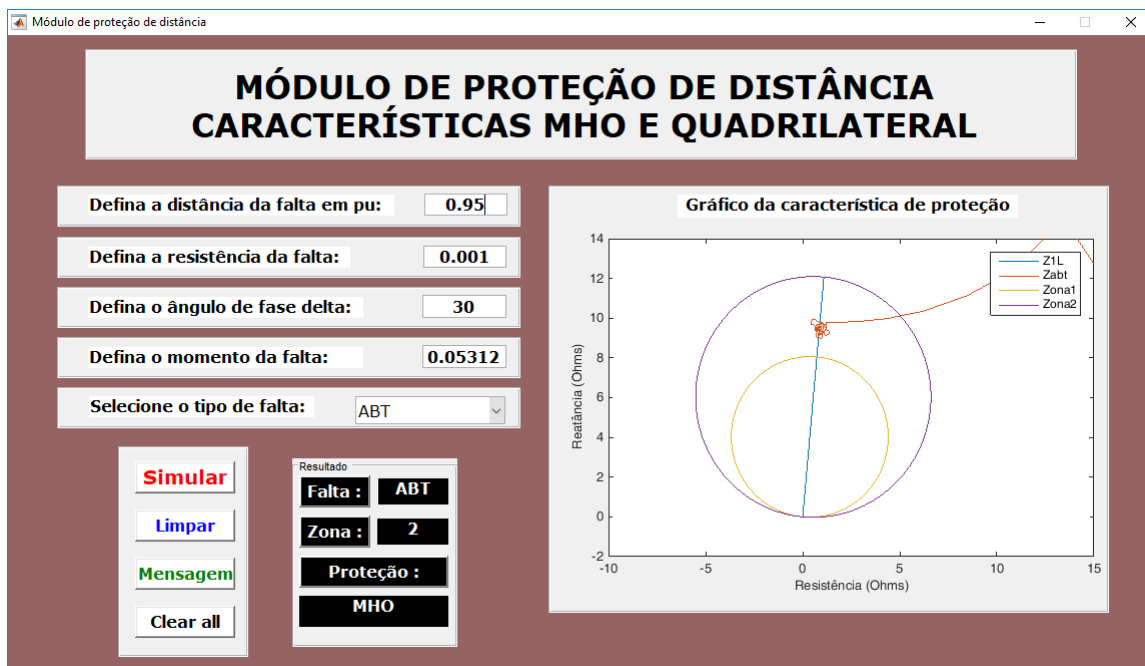


Fonte: Autoria própria.

4.2.4.2 Zona 2

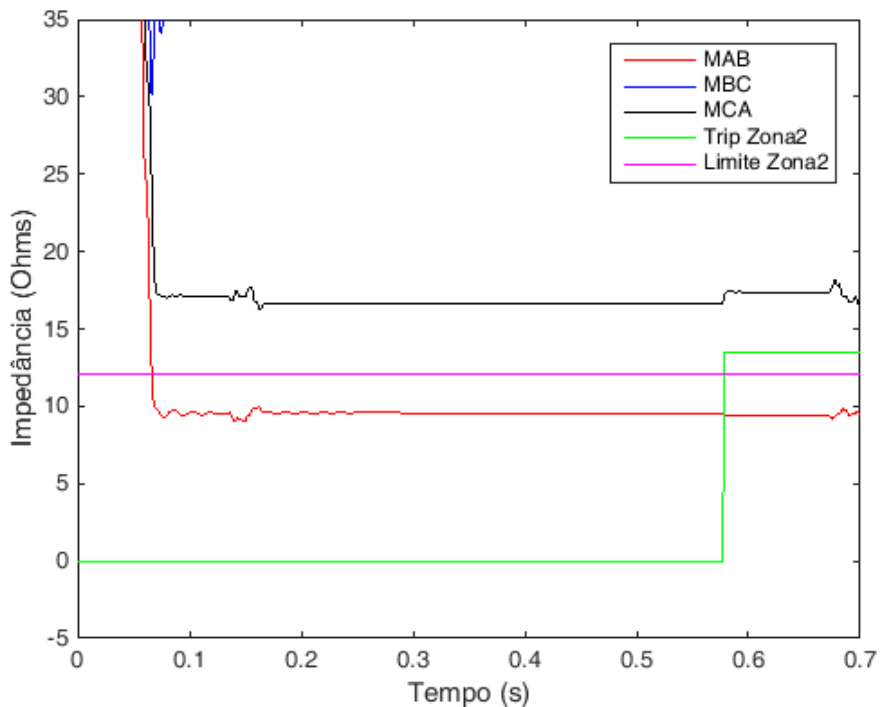
Os resultados obtidos para a zona 2 são apresentados nas figuras a seguir.

Figura 44 – Configuração da interface para falta ABT aplicada na zona 2

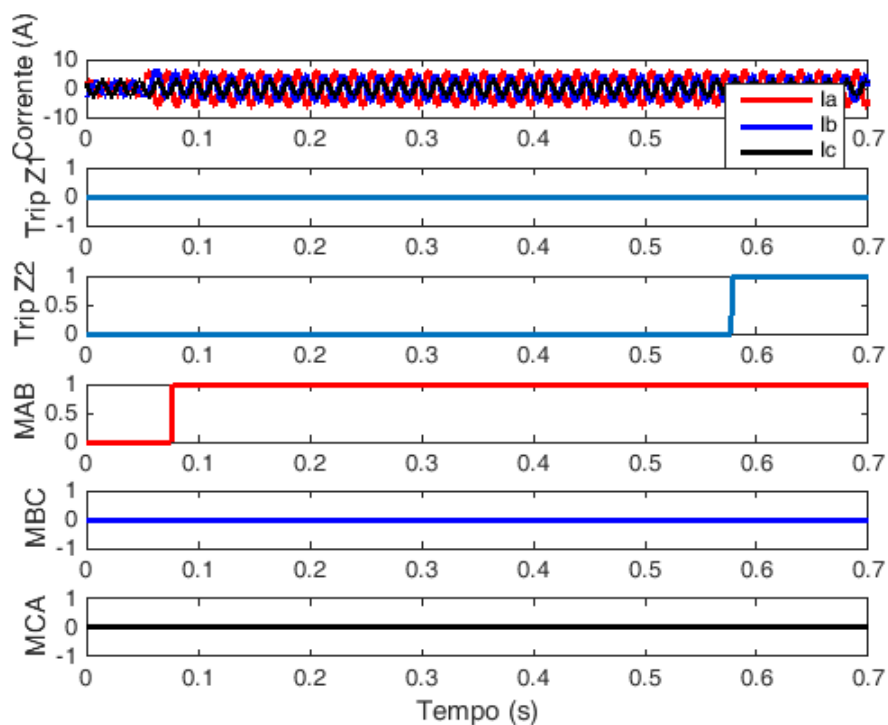


Fonte: Autoria própria.

Figura 45 – Malhas de impedância obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra



Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta ABT na zona 2

Fonte: Autoria própria.

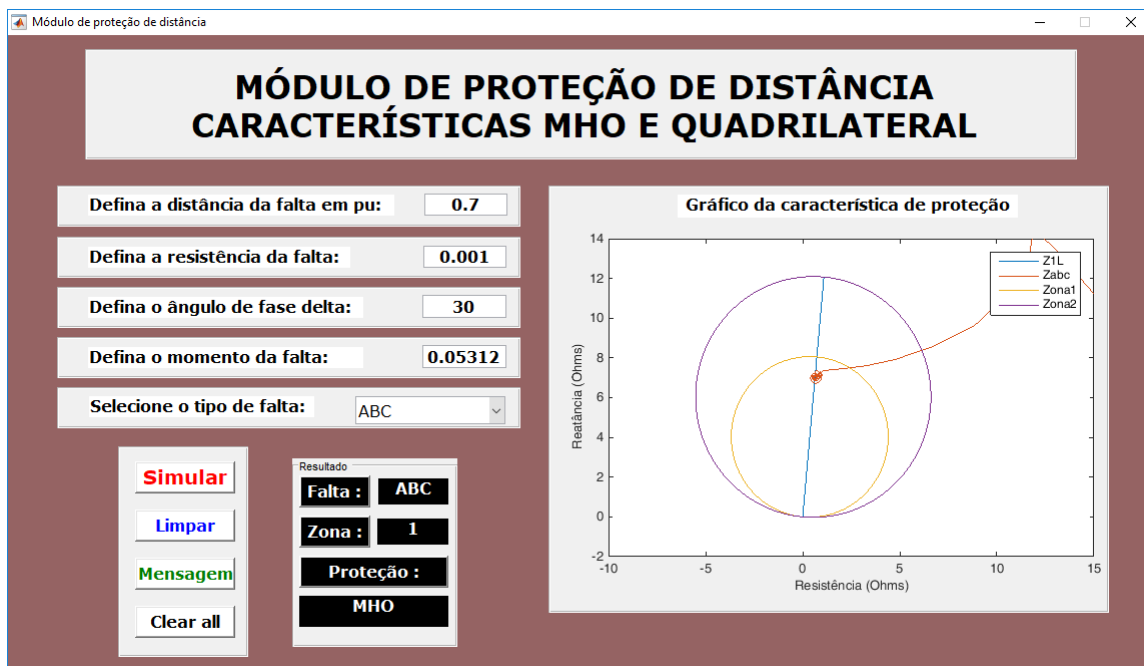
Assim como nas figuras anteriores, o sinal de *trip* foi dado 0,5 segundo após a classificação da falta.

4.2.5 Falta F-F-F com $R_F = 0.001 \Omega$ e $\Delta = 30^\circ$

4.2.5.1 Zona 1

A figura 47 apresenta as configurações referentes à falta trifásica ABC aplicada, e a impedância aparente da linha de transmissão plotada na característica MHO.

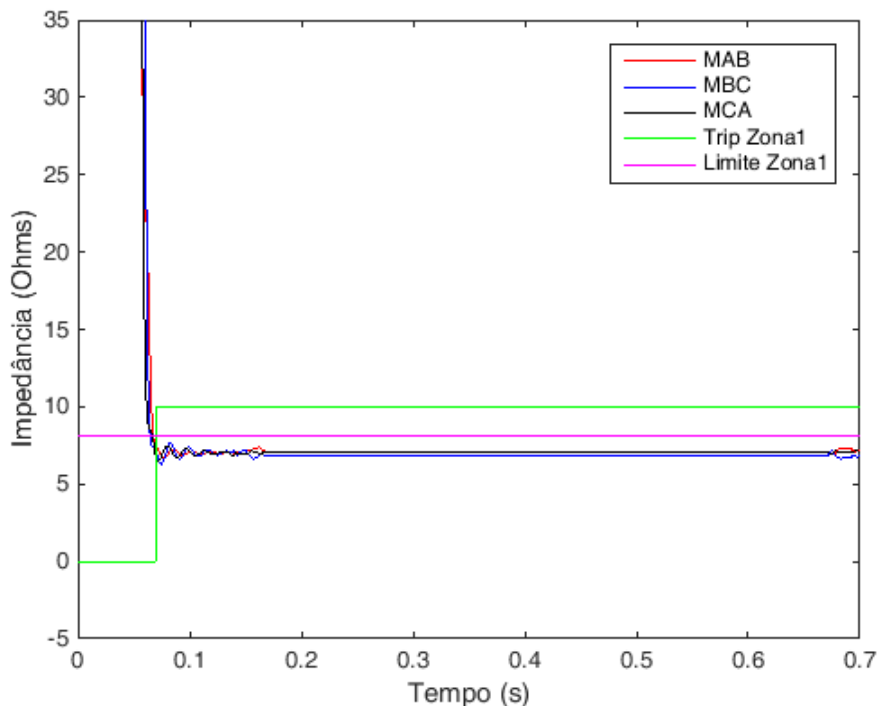
Figura 47 – Configuração da interface para falta ABC aplicada na zona 1



Fonte: Autoria própria.

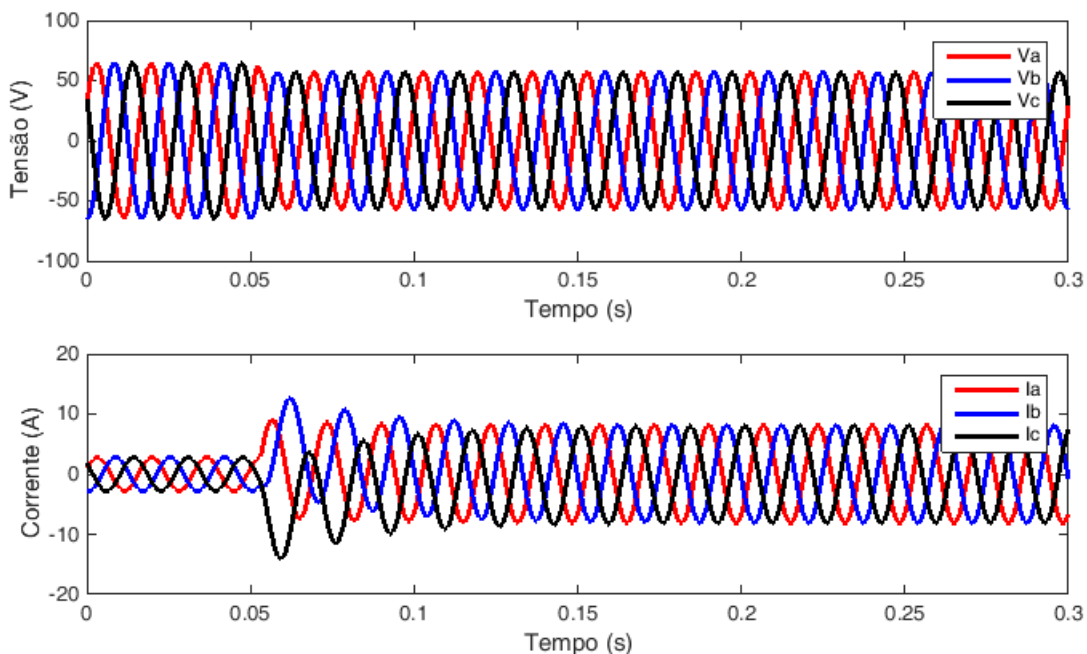
Na Figura 48 é possível notar o momento em que as curvas das três malhas de impedância bifásicas se põem abaixo do limite da zona 1, caracterizando uma falta trifásica. O sinal de *trip* é emitido instantaneamente ao momento no qual a falta foi classificada, em $t = 0.07083$ s, 1,06 *ciclo* após a aplicação do curto-circuito.

Figura 48 – Malhas de impedância bifásicas AB, BC e CA



Fonte: Autoria própria.

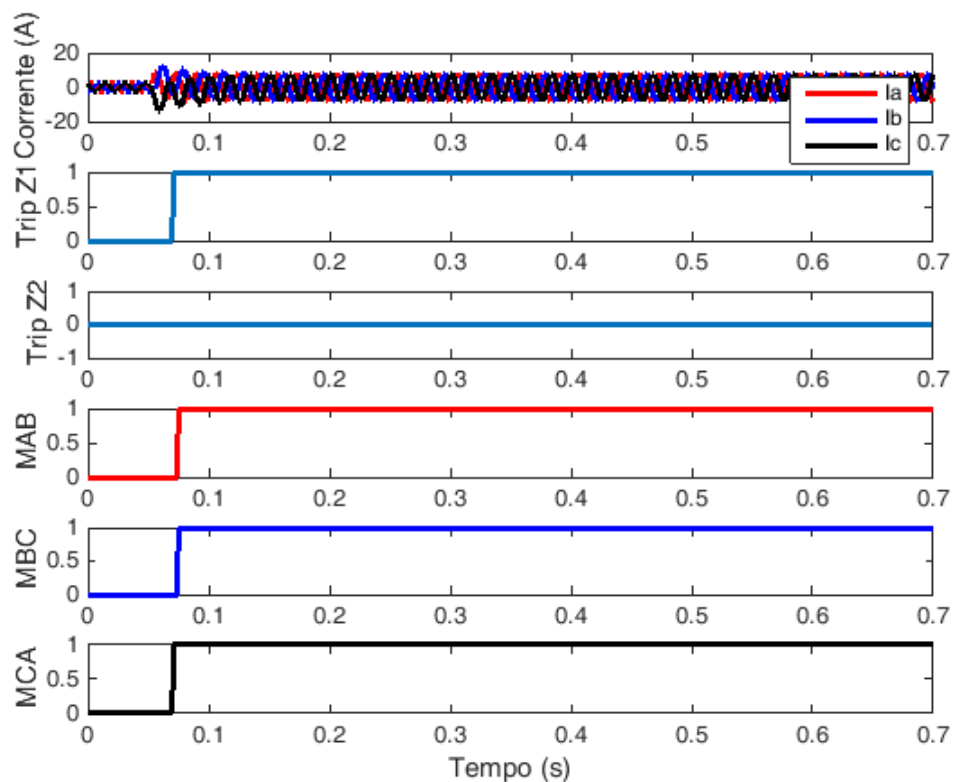
Figura 49 – Sinais de tensão e corrente obtidas da falta ABC na zona 1



Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 mostra TripZ1 adquirindo valor lógico 1 no momento em que as malhas de impedância AB, BC e CA também assumem valor 1.

Figura 50 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta ABC na zona 1

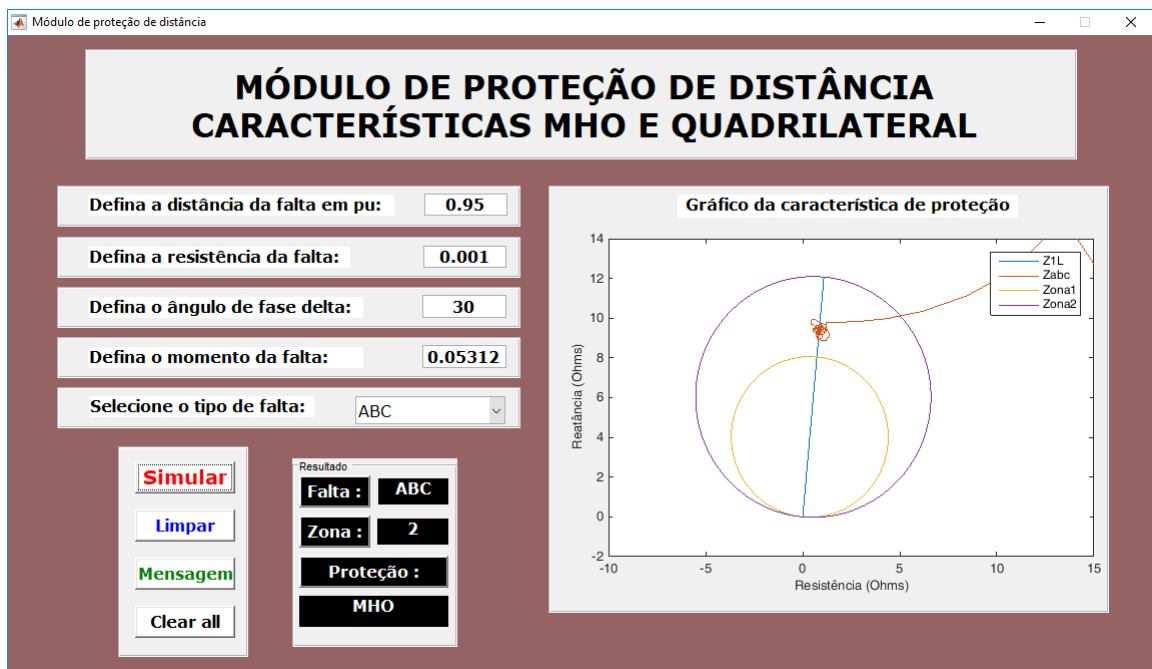


Fonte: Autoria própria.

4.2.5.2 Zona 2

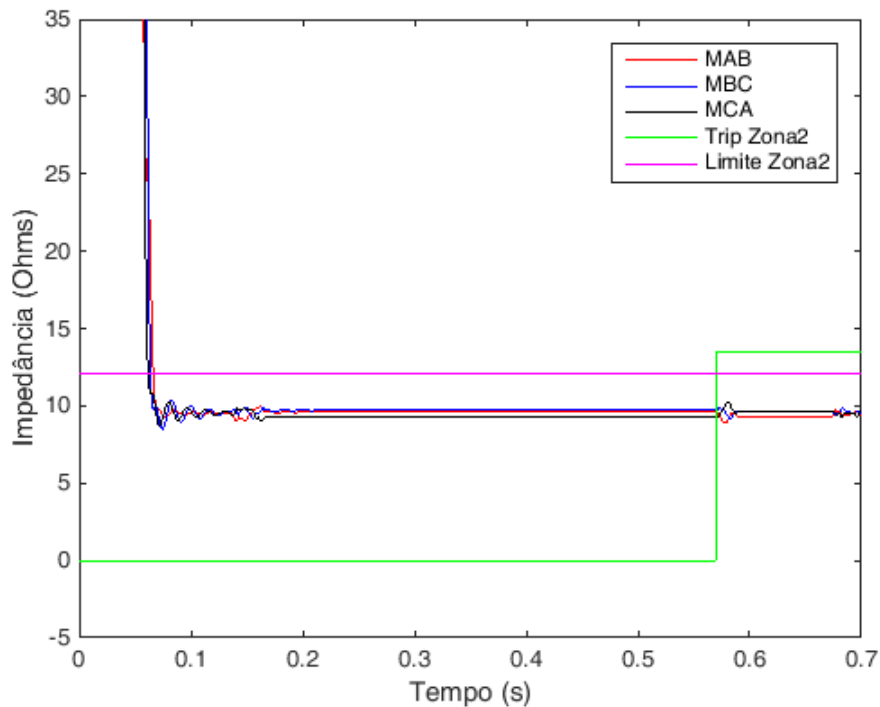
Os resultados obtidos para a zona 2 são apresentados nas figuras a seguir.

Figura 51 – Configuração da interface para falta ABC aplicada na zona 2



Fonte: Autoria própria.

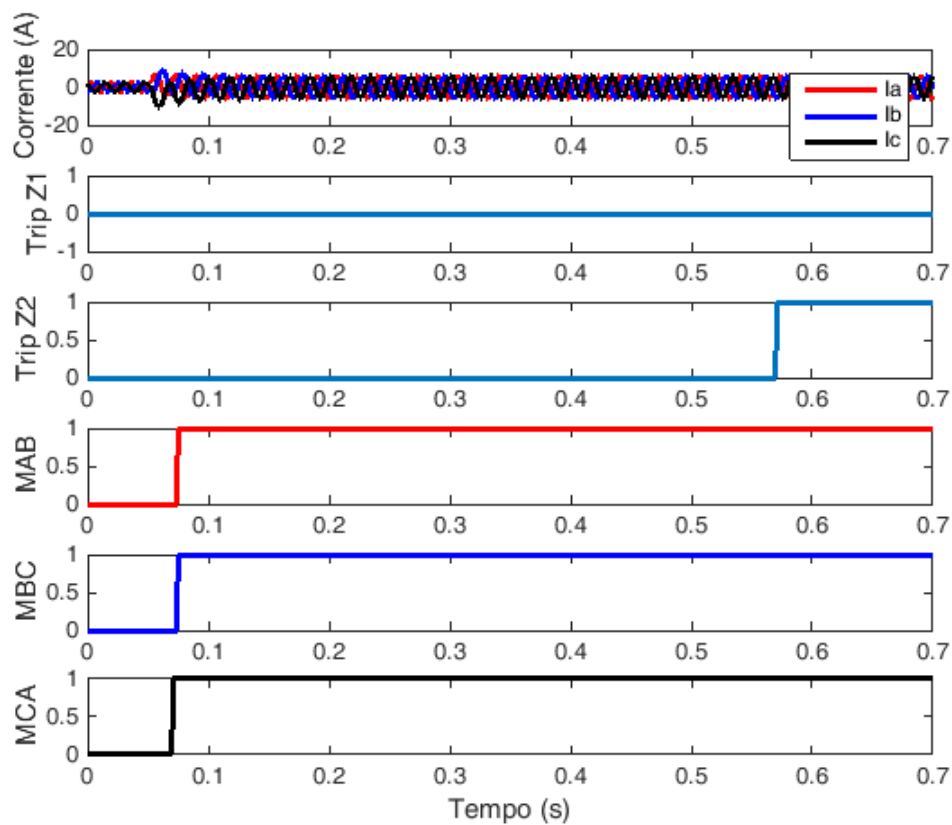
Figura 52 – Malhas de impedância obtidas para as fases A, B e C, com relação ao terra



Fonte: Autoria própria.

A Figura 53 mostra o instante que as correntes I_a , I_b e I_c aumentam suas amplitudes, e os instantes nos quais TripZ2 e as malhas AB, BC e CA adquirem valor lógico 1.

Figura 53 – Sinais de corrente e *word bits* obtidas da falta ABC na zona 2



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho abordou-se a importância do relé de distância, mais precisamente as características Quadrilateral e MHO, e a necessidade da utilização deste como ferramenta no ensino e pesquisa de sistemas de proteção, por meio de *softwares* de simulação. Durante o desenvolvimento apresentou-se conceitos, métodos e filosofias de proteção de sistemas, que resultaram em um módulo de proteção de linhas de transmissão. Para a implementação do mesmo, utilizou-se a plataforma *Matlab/Simulink*® por ser popular no meio acadêmico e por possibilitar a simulação de diversos tipos de sistemas.

O trabalho envolveu a modelagem do sistema de potência, aquisição, condicionamento de sinais, análise dos dados pelas funções de proteção MHO e Quadrilateral, e o desenvolvimento de uma interface gráfica, a qual permite a interação entre o usuário e o programa.

Realizou-se simulações para todos os tipos de falta, na presença ou não de resistência de falta, dentro e fora das zonas de proteção, afim de que fossem geradas as curvas e oscilografias necessárias para o estudo e validação do módulo de proteção implementado. Em casos de identificação e classificação das faltas dentro de alguma das zonas de proteção, o relé gera o sinal de *trip*, e em casos fora das zonas de proteção, o mesmo não é gerado. Constatou-se também que o módulo funciona perfeitamente para valores de resistência de falta até 80Ω , sendo que para valores superiores à este, faltas monofásicas aplicadas dentro das zonas de proteção, são dadas como ocorridas fora dos limites das mesmas devido ao atraso na estabilização das malhas de impedância. Portanto, é possível concluir que este modelo se mostrou simples e versátil para ser aplicado como ferramenta didática no ensino de proteção de sistemas em nível de graduação e pós-graduação, uma vez que este possibilita a demonstração de seu princípio de funcionamento e sua atuação em um sistema elétrico.

Como propostas de continuidade de pesquisas, sugere-se:

- O aperfeiçoamento do modelo para que seja possível a entrada de variáveis via interface gráfica como pick up, etc;
- Modelagem de outras filosofias de proteção de distância disponíveis no mercado.
- Modelagem de zonas de proteção para detecção de faltas na direção reversa.

6 TRABALHOS PUBLICADOS

CAMARGO, L. P.; SILVA, M. Implementação computacional de um relé de proteção de distância com característica MHO para ensino na engenharia. **XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE)**. Joinville, 2017.

CAMARGO, L. P.; SILVA, M. Modelagem de um relé de proteção de distância para aplicação acadêmica. **XXII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (SICITE)**. Londrina, 2017.

REFERÊNCIAS

- CALERO, F.; GUZMAN, A.; BENMOUYAL, G. Elementos de distância quadrilaterais de fase e terra adaptativos: Schweitzer engineering laboratories, inc.,. **SEL Journal of Reliable Power**, 2010. Citado na página 9.
- CARRAMASCHI, I. H. C. **Avaliação do desempenho de uma proteção digital de distância frente a alguns algoritmos**. Dissertação — Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Citado na página 1.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. 1. ed. São Carlos: EDUSP, 2007. Citado 6 vezes nas páginas 4, 5, 6, 12, 13 e 21.
- GONZALEZ, J. I. P. R. **Representação de relés de proteção em programas de curto-circuito**. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Citado na página 1.
- MACEDO, R. A.; COURY, D. V. Um esquema completo para proteção rápida de linhas de transmissão com o uso de equações diferenciais. **Revista Controle e Automação**, 2003. Citado na página 22.
- MAMEDE, D. R.; FILHO, J. M. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Citado na página 4.
- MASCHER, L. J. D. **Análise do desempenho de algoritmos de proteção de distância frente à faltas monofásicas: abordagem tendo em vista uma proteção adaptativa**. Dissertação — Universidade Federal De Itajubá, Itajubá, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 5, 8 e 14.
- REIS, G. R. de S. **Análise do comportamento das unidades quadrilaterais polarizadas de relé de distância frente a curtos-circuitos em linhas de transmissão**. Dissertação — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Citado na página 13.
- ROBERTS, J. B.; SCHWEITZER, E. O.; GUZMAN, A. $Z=v/i$ não faz um relé de distância. **SEL Journal of Reliable Power (Schweitzer Engineering Laboratories, Inc)**, 1993. Citado 5 vezes nas páginas 7, 8, 10, 11 e 16.
- SAENGSUWAN, T. Modelling of distance relays in emtp. **Internacional Conference on Power Systems Transients**, Budapest, 1999. Citado na página 9.
- SALLES, N. J. de. **Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos**. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 8, 9, 11, 12 e 13.
- SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. Citado na página 14.
- SCHWEITZER, E. O.; ROBERTS, J. B. Distance relay element design. **SEL Journal of Reliable Power (Schweitzer Engineering Laboratories, Inc)**, 2010. Citado na página 11.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. **SEL-421-4, -5 Relay: Protection and Automation System**. [S.l.], 2010. Citado na página 10.