

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – UTFPR
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA

FELIPE AUGUSTO DA SILVA OLIVEIRA
HIRAM LUIZ DE LIMA
LUÍS GUILHERME SANTOS

**APRIMORAMENTO DE APLICATIVO PARA AUXÍLIO À CONFIGURAÇÃO DE
RELÉS DE PROTEÇÃO: ADIÇÃO DE LINHAS PARALELAS E REATORES
*SHUNT***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2020

FELIPE AUGUSTO DA SILVA OLIVEIRA
HIRAM LUIZ DE LIMA
LUÍS GUILHERME SANTOS

**APRIMORAMENTO DE APLICATIVO PARA AUXÍLIO À CONFIGURAÇÃO DE
RELÉS DE PROTEÇÃO: ADIÇÃO DE LINHAS PARALELAS E REATORES
*SHUNT***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Gustavo Silveira Magrin

CURITIBA
2020

Felipe Augusto Da Silva Oliveira
Hiram Luiz De Lima
Luís Guilherme Santos

Aprimoramento de aplicativo para auxílio à configuração de relés de proteção: adição de linhas paralelas e reatores *shunt*

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 25 de Novembro de 2020.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Fabiano Gustavo Silveira Magrin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Fabiano Gustavo Silveira Magrin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Nastasha Salame da Silva, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ulisses Chemin Netto, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

OLIVEIRA, Felipe A. da S., LIMA, Hiram L, SANTOS, Luís G. APRIMORAMENTO DE APLICATIVO PARA AUXÍLIO À CONFIGURAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO: ADIÇÃO DE LINHAS PARALELAS E REATORES *SHUNT*. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O presente trabalho tem como objetivo adicionar recursos de simulação para o programa computacional existente de apoio à configuração da função de proteção direcional de sobrecorrente. A ferramenta desenvolvida tem como objetivo o auxílio na configuração dos relés digitais de proteção. Desenvolveram-se as novas funcionalidades utilizando a mesma teoria do programa base, com quadripolos. A ferramenta foi realizada utilizando a linguagem de programação Python, porém a estrutura do programa original foi alterada para a utilização de classes, a fim de facilitar a ampliação e desenvolvimento futuro da aplicação. Os recursos adicionados permitem que o usuário simule circuitos com linhas paralelas e sejam aplicadas faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas ao longo de uma das linhas. Foi adicionado também a possibilidade de inserir reatores *shunt* nas simulações. Além da possibilidade de realização de diversos tipos de falta, há a apresentação dos resultados conforme o tipo de falta escolhida. Para a comprovação dos resultados no programa desenvolvido, utilizou-se um programa já estabelecido no mercado e no meio acadêmico, o PS Simul. Por fim, quase todas as simulações realizadas obtiveram êxito, quando comparado ao *software* já consolidado, mostrando a eficácia dos cálculos e da solução dos circuitos por quadripolos. O único problema aparente está no ângulo da falta trifásica, caso que será estudado em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Python; Quadripolos; Linhas Paralelas; Reator *Shunt*; Curto-circuito.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Felipe A. da S., LIMA, Hiram L, SANTOS, Luís G. IMPROVEMENT OF APPLICATION TO ASSIST ON CONFIGURATION OF PROTECTIVE RELAYS: ADDING PARALLEL LINES AND *SHUNT* REACTORS. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

This project had the objective to add simulation resources to the existing computer program for configuration support of the directional overcurrent protection function. The developed tool aims to assist in the configuration of digital protection relays. The new features were developed using the same theory as the base program, with two-port networks. The appliance was created using Python programming language, but the original program structure was changed to use classes to facilitate the expansion and future development of the application. The resources allowed the user to simulate circuits with parallel lines and apply single-phase, two-phase, and three-phase faults in one of the lines. The possibility of inserting *shunt* reactors in the simulations was also added. In addition to carrying out several types of faults, there is a presentation of the results according to the short circuit type. The authors benchmark the developed application results against the PS Simul, a program already established in the electrical and academic environments. Lastly, all the simulations performed were successful compared to the *software* already consolidated, showing an efficiency of the calculations and the solution of the circuits by two-port networks. Just one problem was found, the calculated angle in cases of three-phase fault, which will be studied in future works.

Keywords: Python; Two-port networks; Parallel lines; *Shunt* Reactor; Short circuit;

LISTA DE ACRÔNIMOS

cosh	Cosseno hiperbólico
G	<i>Ground</i> - Terra
\hat{I}_R	<i>Current Receiving end</i> – Corrente no barramento receptor
\hat{I}_S	<i>Current Sending end</i> – Corrente no barramento emissor
\hat{I}_1	Corrente no equivalente 1 de Thévenin
\hat{I}_2	Corrente no equivalente 1 de Thévenin
L ₁	Linha de transmissão 1
L ₂	Linha de transmissão 2
PS Simul	<i>Power System Simulator</i>
R _d	Resistência de falta entre fases
R _f	Resistência de falta a terra
sinh	Seno hiperbólico
\hat{V}_R	<i>Voltage Receiving end</i> – Tensão no barramento receptor
\hat{V}_S	<i>Voltage Sending end</i> – Tensão no barramento emissor
\hat{V}_1	Tensão no equivalente 1 de Thévenin
\hat{V}_2	Tensão no equivalente 2 de Thévenin
\bar{Z}_1	Impedância complexa do equivalente 1 de Thévenin
\bar{Z}_2	Impedância complexa do equivalente 2 de Thévenin

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EAT	Extra Alta Tensão
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i> (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes)
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPCS	Sistemas De Proteção, Controle e Supervisão
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

kA	Kiloampere
km	Quilômetro
kV	Kilovolt
Ω	Ohm
S	Siemens
Y	Estrela
Φ	Fase

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trecho infinitesimal da linha.....	22
Figura 2: Linhas paralelas	24
Figura 3: Reator <i>shunt</i>	28
Figura 4: Representação genérica do sistema atual	29
Figura 5: Sistema completo.....	30
Figura 6: Elementos da linha 1 representados em quadripolos.....	30
Figura 7: Quadripolos equivalentes de cada linha.....	31
Figura 8: Quadripolos equivalentes do sistema.....	32
Figura 9: Falta Fase-Terra com impedância de falta.....	35
Figura 10: Falta Bifásica com impedância de falta	36
Figura 11: Falta Bifásica-Terra com impedância de falta	37
Figura 12: Falta Trifásica com impedância de falta	39
Figura 13: Linha em falta.....	40
Figura 14: Associação em cascata dos quadripolos de uma linha em falta	40
Figura 15: Fluxograma do algoritmo.....	42
Figura 16: Linha simples sem reator <i>shunt</i> - modelagem no PS Simul	53
Figura 17: Linha simples com reator <i>shunt</i> - modelagem no PS Simul	66
Figura 18: Linha paralela sem reator <i>shunt</i> - modelagem no PS Simul	69
Figura 19: Linha paralela com reator <i>shunt</i> - modelagem no PS Simul	72
Figura 20: Corrente de sequência negativa – Falta AG	77
Figura 21: Fator de restrição de sequência positiva – Falta AG.....	78
Figura 22: Fator de restrição de sequência negativa – Falta AG	79
Figura 23: Impedância de sequência negativa – Falta AG.....	80
Figura 24: Corrente de sequência zero – Falta AG	81
Figura 25: Fator de restrição de sequência positiva – Falta AG.....	82
Figura 26: Impedância de sequência zero	83
Figura 27: Ângulo entre $3V_0$ e $-3I_0$ – Falta AG	84
Figura 28: Ângulo entre $3V_2$ e $-3I_2$ – Falta AG	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de licenças do programa PS Simul	49
Tabela 2 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta AG	53
Tabela 3 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BC	55
Tabela 4 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BCG	58
Tabela 5 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta ABC.....	62
Tabela 6 - Comparativo do <i>Software</i> com o PS Simul - Falta AG	66
Tabela 7 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BC.....	67
Tabela 8 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BCG	67
Tabela 9 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta ABC.....	68
Tabela 10 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta AG.....	70
Tabela 11 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BC	70
Tabela 12 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BCG	71
Tabela 13 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta ABC.....	71
Tabela 14 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta AG.....	73
Tabela 15 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BC	73
Tabela 16 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta BCG	74
Tabela 17 - Comparativo do <i>software</i> com o PS Simul - Falta ABC.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA.....	13
1.1.1	Delimitação do tema	16
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	17
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.3.1	Objetivo geral	18
1.3.2	Objetivos específicos	18
1.4	JUSTIFICATIVA.....	19
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	21
2.1	LINHA SIMPLES.....	21
2.2	LINHAS PARALELAS	23
2.3	REATOR <i>SHUNT</i>	28
2.4	CÁLCULO DAS CORRENTES DE PRÉ-FALTA NOS EQUIVALENTES..	29
2.5	CÁLCULO DAS CORRENTES DE PRÉ-FALTA NA LINHA.....	33
2.6	FALTAS	34
2.6.1	Quadripolo de uma falta Fase A – Terra (ϕg)	34
2.6.2	Quadripolo de uma falta Bifásica ($\phi\phi$)	36
2.6.3	Quadripolo de uma falta Bifásica-Terra ($\phi\phi g$).....	37
2.6.4	Quadripolo de uma falta Trifásica (3ϕ)	38
2.7	FALTA NA LINHA DE TRANSMISSÃO	39
3	DESCRITIVO DO PROGRAMA	41
3.1	FLUXOGRAMA.....	41
3.1.1	Entrada de dados.....	43

3.1.1.1	Equivalentes S e R	43
3.1.1.2	Linhas de transmissão	44
3.1.1.3	Faltas	46
3.1.1.4	Reatores <i>Shunt</i>	46
3.1.1.5	Relés de proteção	46
3.1.2	Processamento dos dados	47
3.1.3	Resposta do programa	48
3.2	SOFTWARE DE VALIDAÇÃO	48
4	AVALIAÇÃO DO APLICATIVO DESENVOLVIDO	50
4.1	DADOS DO SISTEMA BASE	51
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE O APLICATIVO E O PS SIMUL	52
4.2.1	Linha simples, sem reator <i>shunt</i>	52
4.2.1.1	Falta monofásica (ϕg)	53
4.2.1.2	Falta bifásica ($\phi\phi$)	55
4.2.1.3	Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)	58
4.2.1.4	Falta trifásica (3ϕ)	61
4.2.2	Linha simples, com reator <i>shunt</i>	65
4.2.2.1	Falta monofásica (ϕg)	66
4.2.2.2	Falta bifásica ($\phi\phi$)	67
4.2.2.3	Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)	67
4.2.2.4	Falta trifásica (3ϕ)	68
4.2.3	Linha paralela, sem reator <i>shunt</i>	69
4.2.3.1	Falta monofásica (ϕg)	70
4.2.3.2	Falta bifásica ($\phi\phi$)	70
4.2.3.3	Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)	71
4.2.3.4	Falta trifásica (3ϕ)	71
4.2.4	Linha paralela, com reator <i>shunt</i>	72

4.2.4.1	Falta monofásica (ϕg)	73
4.2.4.2	Falta bifásica ($\phi\phi$).....	73
4.2.4.3	Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)	74
4.2.4.4	Falta trifásica (3ϕ)	75
4.3	GRÁFICOS DE SAÍDA DO APLICATIVO	75
4.3.1	Relé SEL – 311L	76
4.3.2	Relé GE D90 Plus ou Siemens 7SJ62.....	84
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
5.1	CONCLUSÃO	86
5.2	TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIA	88
	APÊNDICE A – CASO PARTICULAR DE LINHAS PARALELAS IGUAIS	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A estrutura do sistema elétrico de potência (SEP) possui uma organização vertical e horizontal. A organização vertical é dividida em cinco níveis, sendo eles (FUCHS, 1977, p.3):

- Geração ou produção;
- Rede de subtransmissão;
- Rede de transmissão;
- Linhas de interligação
- Rede de distribuição

Na organização horizontal há uma divisão em camadas – subsistemas que são eletricamente isolados entre si, interligados apenas por sistemas de níveis superiores (FUCHS, 1977, p.3).

A integração dos sistemas regionais e nacionais, pela interligação dos sistemas isolados, é de suma importância. O Sistema Interligado Nacional (SIN) permite o intercâmbio da energia produzida em todas as regiões do país e localidades isoladas vêm sendo gradativamente interligadas. Atualmente apenas 2% do mercado nacional continua isolado (ANEEL, 2019).

A integração traz grandes benefícios a estrutura como um todo, tais como:

- Possibilidade de intercâmbio de energia entre as diferentes áreas do SEP, dependendo apenas da disponibilidade e necessidade;
- Elevação da capacidade de reserva global, uma vez que um grupo pode suprir outro em casos especiais;
- Aumento na confiabilidade e, por consequência, da qualidade do abastecimento em ocasiões de emergência (FUCHS, 1977, p.5).

Essa interligação também gera novos desafios na área de proteção, uma vez que aumenta a complexidade do sistema, havendo variações na quantidade das fontes de curto-circuito, variação de carga e no sentido de circulação de corrente, tornando o processo de transporte de energia cada vez mais dinâmico.

O transporte de energia é realizado em diversos níveis de tensão e potência ativa. As linhas de transmissão operam em tensões elevadas e sua principal

característica é fazer a interligação e transporte da energia dos centros geradores até os centros consumidores. As ligações entre a linha de transmissão e a unidade geradora geralmente são feitas a partir de uma subestação elevadora, enquanto, a conexão da linha de transmissão com as unidades consumidoras, é feita por meio da subestação abaixadora (FUCHS, 1977, p.3).

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), há uma capacidade instalada de geração de 161.552 MW (2018) e a projeção para 2023 é que esse número aumente para 177.971 MW. Já em relação a extensão da rede de transmissão, em 2018 eram 141.388 km de extensão e a projeção para 2023 é que a expansão chegue em 185.484 km (ONS, 2019). Há, portanto, um constante crescimento no sistema elétrico brasileiro e, aliado a expansão, está a preocupação em torná-lo mais seguro e confiável.

Junto à expansão das linhas de transmissão, está o crescimento de tecnologias tais como (GLOVER, OBERBYE E SARMA, 2015, p. 14):

- Isolador de suspensão;
- Sistema de relés de alta velocidade, atualmente capaz de detectar curto-circuito dentro de um ciclo senoidal (16,66 ms) a uma frequência de 60 Hz, ou até mesmo em menos tempo;
- Disjuntores de alta velocidade e extra alta tensão – EAT, capazes de interromper correntes de curto-circuito trifásicas de 63 kA em dois ciclos (33,33 ms), em uma frequência de 60 Hz;
- Religadores de alta velocidade de linhas de EAT, que permite retorno automático para serviço dentro de uma fração de segundo após uma falha ter sido eliminada;
- Para-raios de EAT, que fornecem proteção contra transientes de sobretensões advindas de descargas atmosféricas e comutação da linha;
- Relés digitais capazes de realizar o controle de disjuntores, registro de dados, localização de falhas, autoverificação, análise de falhas e acesso remoto.

A inovação, portanto, é notória e é capaz de gerar uma ruptura do paradigma tecnológico do Setor Elétrico, com a inserção de novos equipamentos para medição, monitoramento, controle e proteção.

Um dos segmentos que mais vem sofrendo mudanças é o sistema de proteção que, de acordo com Hewitson, Brown e Balakrishnanm (2004, p. 2), possui três funções principais:

- Proteger todo o sistema para manter a continuidade do fornecimento de energia;
- Minimizar os danos e custos causados pelas faltas;
- Promover a integridade física dos operadores do sistema.

A proteção do SEP, que necessita de elementos de decisão sofisticados, é realizada pelos relés, os quais são dispositivos colocados estrategicamente no SEP para identificar a ocorrência de uma situação anormal à operação do sistema e realizar rotinas de comandos que buscam isolar o defeito o mais rápido possível, de modo a minimizar os danos correlatos. Portanto, quando há uma perturbação ou algum outro defeito no SEP que sensibilize o relé, como uma sobretensão ou sobrecorrente, ele atuará no circuito de comando do disjuntor, fazendo com que o defeito seja isolado, preservando o sistema como um todo (KINDERMANN, 1999, p. 1).

Existem relés de diversas tecnologias construtivas e, de acordo com KINDERMANN, (1999, p. 56), eles são divididos em relés eletromecânicos, relés eletrônicos e relés digitais.

Os relés de sobrecorrente têm como princípio básico de funcionamento atuar quando identificar uma corrente maior do que o seu ajuste. Esses relés são usados majoritariamente para proteção de sistemas elétricos radiais, contudo, podem ser aplicados como funções de retaguarda para outros princípios de atuação. Como o SIN é altamente malhado, a proteção por relés de sobrecorrente é inviável, uma vez que se torna mais difícil a realização da coordenação. Por isso, é necessário a adição do relé direcional de sobrecorrente (KINDERMANN, 1999, p. 56).

O relé direcional, por sua vez, monitora o relé de sobrecorrente, fazendo com que o sistema anel se comporte como dois sistemas radiais em sentidos opostos a partir da discriminação do sentido da corrente de defeito (KINDERMANN, 1999, p. 155).

Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento dos relés digitais, a confiabilidade e a segurança aumentaram. Esses relés são gerenciados por microprocessadores e controlados por um *software*, no qual é possível visualizar os dados de parametrização e registros de eventos (KINDERMANN, 1999, p. 87). Uma

de suas vantagens é a ausência da necessidade de variar, fisicamente, os parâmetros dos elementos do circuito, pois esses são parametrizados via *software*. O relé digital pode efetuar várias funções, tais como (KINDERMANN, 1999, p. 87):

- Proteção;
- Supervisão de rede;
- Transmissão de sinais;
- Auto supervisão;
- Religamento dos disjuntores;
- Obtenção de dados para relatórios.

Segundo Kindermann (1999, p. 88), os relés de proteção eletromecânicos e estáticos não estão sendo mais adquiridos nem no Brasil nem no mundo, sendo todas as aquisições de relés digitais.

Os relés digitais, porém, acabam sendo equipamentos complexos, com inúmeras funções e parâmetros de entrada, tornando cada vez mais necessário a especialização do operador desses equipamentos.

Deste modo, o presente trabalho propõe o aprimoramento de um algoritmo utilizando a linguagem de programação *Python*, capaz de calcular faltas em Linhas de Transmissão Paralelas, utilizando a modelagem por quadripolos. Sendo assim é possível simular o comportamento de diversas faltas ao longo de uma LT, analisar possíveis impactos nos sistemas de proteção e auxiliar o engenheiro na parametrização do relé de sobrecorrente direcional.

1.1.1 Delimitação do tema

O tema proposto para o trabalho de conclusão de curso é o aprimoramento de um aplicativo desenvolvido previamente por Mendes e Silva (2019), acrescentando novas funcionalidades e melhorando as já existentes. Portanto, serão apresentados no decorrer do trabalho, os modelos por quadripolos de componentes do sistema elétrico, que foram implementados no programa iniciado por Mendes e Silva (2019), dando continuidade ao desenvolvimento de uma ferramenta para auxílio na configuração de relés de proteção, abordando a função direcional de um relé de sobrecorrente.

No programa elaborado por Mendes e Silva (2019) somente são apresentados os resultados gráficos para faltas fase-terra (ϕg). Propõe-se que seja possível calcular outros tipos de faltas, como: fase-fase ($\phi\phi$), fase-fase-terra ($\phi\phi g$) e trifásicas (3ϕ). Além de possibilitar simulações mais variadas de curtos-circuitos ao longo da linha, os gráficos resultantes serão apresentados conforme o tipo de ocorrência da falta, uma vez que o programa atual apresentava todos os gráficos de uma única vez. Sendo assim, os gráficos a serem exibidos serão filtrados de acordo com a necessidade do usuário.

O presente trabalho propõe também a realização do cálculo das correntes pré-falta a partir dos valores de tensão dos equivalentes de Thévenin. No *software* era necessário, além dos dados de tensão e impedância, as correntes das fontes.

Um quarto aspecto do trabalho atual é a implementação do modelo de quadripolos para linhas paralelas e para reatores *shunt*.

Como será feito um aprimoramento no aplicativo desenvolvido por Mendes e Silva (2019), a linguagem de programação a ser utilizada será o *Python* versão 3.

1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

O principal desafio é a complexidade de configurar a função direcional de um relé de sobrecorrente, uma vez que cada fabricante utiliza de técnicas e métodos próprios para a detecção de falha, dessa forma, com o auxílio do *software* em desenvolvimento, tal configuração demandaria um tempo menor para ser realizada.

A partir desta necessidade, a presente proposta busca fornecer os diversos dados necessários para a configuração dos elementos de proteção, a partir da inserção prévia de informações dos parâmetros das linhas de transmissão paralelas, realizar cálculos de faltas ao longo das linhas e apresentar os resultados de modo simples e direto ao usuário final.

Como o código já é existente, a familiarização com o que foi desenvolvido é um dos desafios iniciais a ser resolvido. Outro fato é, devido aos diversos cálculos a serem realizados, aumenta-se a dificuldade na detecção de erros que possam existir no código. Por esse motivo foi alterada a estrutura do código para a utilização de classes, a fim de facilitar a expansão do aplicativo.

Além disso o programa anteriormente realizava apenas uma condição de falta, não realizando simulações suficientes, o que limita os dados gerados para o usuário. Por isso, a partir do trabalho atual é possível a aplicação de diversas faltas conforme a necessidade do usuário.

1.3 OBJETIVOS

Esse tópico apresenta os objetivos gerais e específicos sobre o tema.

1.3.1 Objetivo geral

Aprimoramento do aplicativo de auxílio à configuração dos relés de proteção pelo acréscimo de quadripolos de linhas de transmissão paralelas, quadripolos de reatores *shunt*, a adição das faltas fase-fase ($\phi\phi$), fase-fase-terra ($\phi\phi g$) e trifásicas (3ϕ) e a melhor seleção dos resultados de acordo com cada tipo de falta.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal do trabalho, os seguintes objetivos específicos são necessários.

- Estudar literatura relacionadas a proteção direcional de sobrecorrente;
- Aprender a linguagem de programação *Python*;
- Realizar o cálculo da corrente pré-falta no aplicativo atual;
- Estudar o princípio de funcionamento dos reatores *shunt* e como modelá-los por meio de quadripolos;
- Desenvolver um algoritmo capaz de calcular faltas numa linha de transmissão com linhas paralelas de quaisquer extensões;
- Estudo da função direcional para acrescentar os gráficos das faltas fase-fase ($\phi\phi$), fase-fase-terra ($\phi\phi g$) e trifásico (3ϕ) nos resultados finais, de acordo com o solicitado pelo usuário e sua implementação da forma de quadripolos.

1.4 JUSTIFICATIVA

Uma vez que há no mercado inúmeros fabricantes de relés de proteção, o que implica em diferentes maneiras de realizar o cálculo dos ajustes de proteção dos relés, este trabalho tem como foco principal dar continuidade a um programa em desenvolvimento que irá auxiliar no ajuste de um relé de sobrecorrente em sua função direcional. Essa ferramenta, portanto, visa auxiliar a configuração de relés de proteção direcional de sobrecorrente de alguns dos principais fabricantes de relés do mercado por meio de respostas gráficas.

Como o mercado propicia diversos relés para os Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão (SPCS), busca-se trazer uma ferramenta que possa auxiliar a parametrização desses relés. Atualmente o programa apresenta três modelos dos principais fabricantes de relés, são eles: SIEMENS, modelo SIPROTEC 7SJ62, SWCHEITZER, modelo SEL-311L e GE, modelo D90Plus.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente houve uma revisão bibliográfica acerca de linhas paralelas e reatores *shunt*, que são inseridos como quadripolos, e sobre o cálculo da corrente de pré-falta utilizando duas fontes equivalentes de Thévenin e uma linha de transmissão com duas linhas paralelas.

Em seguida foi estudada a linguagem de programação *Python*, para então estudar o código fonte já desenvolvido pela equipe anterior e assim continuar seu desenvolvimento acrescentando no algoritmo um quadripolo de linhas paralelas e reatores *shunt*.

Foi também realizada a simulação das faltas e analisados os gráficos gerados pelo *software*.

Por último foi realizada uma validação do *software* em desenvolvimento com um *software* de mercado.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo é apresentado o tema com sua contextualização e delimitação. Também faz parte desse capítulo os problemas e premissas que deram

origem ao presente trabalho, as dificuldades e os objetivos gerais e específicos que serão alcançados. Além disso, o capítulo traz a estrutura do trabalho, com suas respectivas divisões e procedimentos que orientarão o desenvolvimento do projeto.

O segundo capítulo é composto pelo desenvolvimento teórico, no qual são expostos os fundamentos físicos e matemáticos necessários para a construção do algoritmo a ser acrescentado no aplicativo.

O terceiro capítulo é integrado pela descrição do programa com a apresentação do fluxograma e sua estrutura.

A quarta parte é destinada para a discussão dos resultados e uma avaliação do programa como um todo, com as mudanças que foram propostas para esse trabalho e sua capacidade de alcançar os objetivos desejados.

Por fim, na última seção, é apresentada a conclusão do trabalho, com os comentários convenientes do tema, além de propor possíveis melhorias para o programa e sugestões para trabalhos futuros.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A representação da linha de transmissão trifásica é dada por dois terminais, um terminal no qual a energia elétrica é injetada na linha, no qual foi nomeado como emissor, e um terminal pelo qual a energia elétrica deixa a linha, nomeado como receptor. Dadas às características próprias da linha, a representação, por meio de circuitos, pode ser classificada como quadripolos. Nessa representação o circuito pode ser representado por seis equações lineares que são inter-relacionadas entre si (FUCHS, 1977, p. 125).

Com o objetivo de inserir novos elementos na composição da linha de transmissão do programa desenvolvido no trabalho de Mendes e Silva (2019), algumas construções matemáticas serão necessárias. Todo o funcionamento do programa base é estruturado na modelagem de cada elemento e/ou evento presente no sistema por meio de quadripolos e algumas de suas propriedades, como associações de quadripolos em cascata e em paralelo, que são apresentados neste capítulo, permitindo resumir todos os elementos da linha em um único quadripolo de transmissão.

O programa possuía, anteriormente, o modelo da linha simples, com sua respectiva resistência, indutância e capacitância, assim como, a falta monofásica, representada pela sua matriz. Ao final deste capítulo serão modelados cinco novos elementos: linha paralela, banco de reatores *shunt*, falta bifásica, falta bifásica-terra e falta trifásicas.

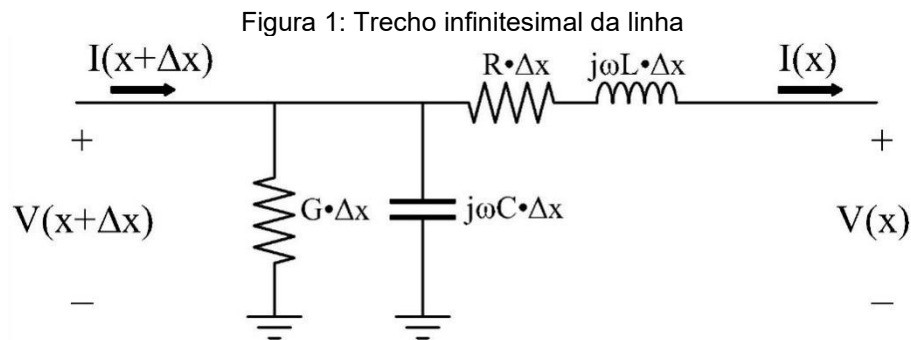
No processo para obtenção do modelo matemático no formato de quadripolo para uma linha paralela, considera-se como base o modelo para uma única fase em uma linha simples. Já que o modelo de uma linha paralela é uma associação de linhas simples (KERSTING, 2017).

2.1 LINHA SIMPLES

A linha de transmissão pode ser classificada, no que tange a sua extensão, em linha curta, a qual possui um limite de 80 km de extensão; em linha média, que possui entre 80 km a 240 km de extensão e; linha longa, a partir de 240 km de extensão. Estes valores não são fixos e variam de acordo com a literatura, mas auxiliam na escolha do modelo matemático a ser utilizado. O modelo matemático

que será apresentado no item a seguir é bastante flexível, podendo facilmente abranger todos os tipos de linha citados anteriormente (FUCHS, 1977).

Ao fazer a análise de linhas de transmissão de grandes extensões, as aproximações feitas nos modelos π (PI) ou T, que são os mais comuns, acabam por divergir significativamente nos resultados obtidos, pois, estes modelos utilizam os parâmetros da linha concentrados. Para contornar tal problema há uma modelagem mais completa que faz uso dos parâmetros distribuídos ao longo da linha de forma homogênea. Cabe ressaltar que este é um modelo calculado apenas para uma frequência. Uma representação de um trecho infinitesimal desta linha é apresentada na Figura 1.



Fonte: Adaptação de Glover, Overbye e Sarma (2015)

A qual da origem as equações diferenciais descritas abaixo:

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = \bar{z} \cdot I(x) \quad \rightarrow \quad \frac{dV(x)}{dx} = \bar{z} \cdot I(x) \quad (2.1.1)$$

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = \bar{y} \cdot V(x) \quad \rightarrow \quad \frac{dI(x)}{dx} = \bar{y} \cdot V(x) \quad (2.1.2)$$

Em que:

$$\bar{z} = R + j\omega L \quad [\Omega/m]$$

$$\bar{y} = G + j\omega C \quad [S/m]$$

Cuja solução é dada, conforme Glover, Overbye e Sarma, (2015, p. 265).

$$V(x) = \cosh(\bar{y}x) V_R + \bar{Z}_C \sinh(\bar{y}x) I_R \quad (2.1.3)$$

$$I(x) = \frac{1}{\bar{Z}_C} \sinh(\bar{\gamma}x) V_R + \cosh(\bar{\gamma}x) I_R \quad (2.1.4)$$

Sendo:

$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{z} \cdot \bar{y}}$ → Constante de propagação da linha

$\bar{Z}_C = \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}}$ → Impedância característica da linha [Ω]

$I(x)$ → Corrente no na posição x [A]

$V(x)$ → Corrente no na posição x [V]

Ou no formato de quadripolos:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & \bar{Z}_C \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{\bar{Z}_C} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.1.5)$$

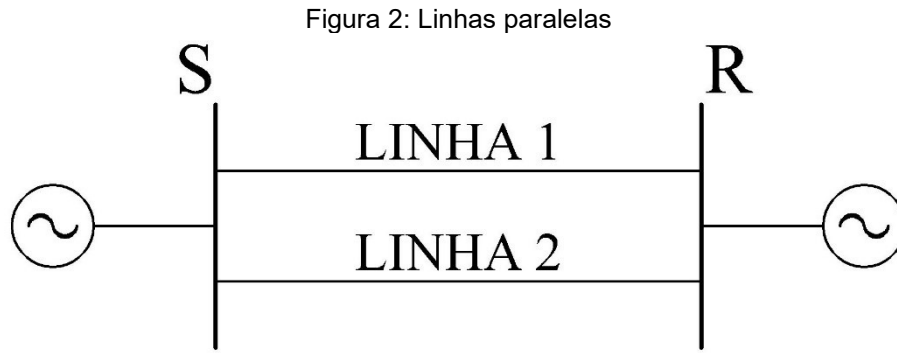
A esta matriz que relaciona tensão e corrente de entrada com a tensão e corrente de saída representaremos como sendo a matriz [T].

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

2.2 LINHAS PARALELAS

Neste subitem será apresentada a modelagem matemática para o caso linhas de transmissão paralelas, desconsiderando a indutância mútua das linhas.

Na Figura 2 é representada esse arranjo, no qual há, entre os barramentos S (*sending end* – emissor) e R (*receiving end* – receptor) duas linhas de transmissão, que podem possuir características elétricas similares ou distintas.



Fonte: Autoria própria – 2019

A seguir são apresentadas as matrizes de quadripolos para uma fase de cada linha. Analogamente ao caso de uma linha simples, conforme a equação (2.1.5), a modelagem para estas linhas segue o mesmo princípio e, para simplificar os termos, usaremos as letras A, B, C, e D, sendo a equação (2.2.1) relacionada à linha 1 e a equação (2.2.2) relacionada à linha 2, apresentadas na Figura 2.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S^{L1} \\ \hat{I}_S^{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R^{L1} \\ \hat{I}_R^{L1} \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S^{L2} \\ \hat{I}_S^{L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R^{L2} \\ \hat{I}_R^{L2} \end{bmatrix} \quad (2.2.2)$$

Segundo Glover, Overbye e Sarma (2015, p. 259) os parâmetros A, B, C e D dependem da resistência (R), indutância (L), capacitância (C) e condutância (G) da linha de transmissão. Sendo os parâmetros A e D adimensionais, B em ohms (Ω) e C em siemens (S). Cada matriz ABCD corresponde a uma matriz [T] de cada linha.

Em ordem para obter uma matriz de coeficientes ABCD equivalentes ao paralelo das duas linhas, devemos primeiro transformar as matrizes [T] de cada linha em matrizes de admitância, as quais relacionam correntes com tensões e serão representadas pela letra Y.

Para tal faz-se necessário isolar as correntes em função das tensões na equação (2.2.1), como segue:

$$\hat{V}_S^{L1} = A_1 \hat{V}_R^{L1} + B_1 \hat{I}_R^{L1} \quad \rightarrow \quad \hat{I}_R^{L1} = B_1^{-1} \hat{V}_S^{L1} - B_1^{-1} A_1 \hat{V}_R^{L1} \quad (2.2.3)$$

$$\hat{I}_S^{L1} = C_1 \hat{V}_R^{L1} + D_1 \hat{I}_R^{L1} \quad (2.2.4)$$

Substituindo (2.2.3) em (2.2.4):

$$\hat{I}_S^{L1} = D_1 B_1^{-1} \hat{V}_S^{L1} + (C_1 - D_1 B_1^{-1} A_1) \hat{V}_R^{L1} \quad (2.2.5)$$

A partir das equações (2.2.3) e (2.2.5) obtemos a equação (2.2.6), que relaciona as correntes com as tensões do sistema para a Linha 1:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S^{L1} \\ \hat{I}_R^{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 B_1^{-1} & C_1 - D_1 B_1^{-1} A_1 \\ B_1^{-1} & -B_1^{-1} A_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S^{L1} \\ \hat{V}_R^{L1} \end{bmatrix} \quad (2.2.6)$$

Sendo esta matriz que relaciona as correntes com as tensões representada pela matriz [Y].

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S^{L1} \\ \hat{I}_R^{L1} \end{bmatrix} = [Y^{L1}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S^{L1} \\ \hat{V}_R^{L1} \end{bmatrix} \quad (2.2.7)$$

Repetindo o procedimento anterior para (2.2.2), teremos em (2.2.8) a equação matricial para a Linha 2:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S^{L2} \\ \hat{I}_R^{L2} \end{bmatrix} = [Y^{L2}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S^{L2} \\ \hat{V}_R^{L2} \end{bmatrix} \quad (2.2.8)$$

Como \hat{V}_S^{L1} e \hat{V}_S^{L2} representam a tensão no mesmo barramento S, da mesma forma que \hat{V}_R^{L1} e \hat{V}_R^{L2} no barramento R, tem-se que:

$$\hat{V}_S = \hat{V}_S^{L1} = \hat{V}_S^{L2} \quad (2.2.9)$$

$$\hat{V}_R = \hat{V}_R^{L1} = \hat{V}_R^{L2} \quad (2.2.10)$$

Assim, substituindo as equações (2.2.9) e (2.2.10) em (2.2.7) e (2.2.8) somam-se as correntes que entram no barramento S e as que saem no barramento R, conforme (2.2.11):

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S^T \\ \hat{I}_R^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{I}_S^{L1} \\ \hat{I}_R^{L1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{I}_S^{L2} \\ \hat{I}_R^{L2} \end{bmatrix} = ([Y^{L1}] + [Y^{L2}]) \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{V}_R \end{bmatrix} \quad (2.2.11)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S^T \\ \hat{I}_R^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 B_1^{-1} + D_2 B_2^{-1} & C_1 - D_1 B_1^{-1} A_1 + C_2 - D_2 B_2^{-1} A_2 \\ B_1^{-1} + B_2^{-1} & -B_1^{-1} A_1 - B_2^{-1} A_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{V}_R \end{bmatrix} \quad (2.2.12)$$

Dessa forma, definindo que:

$$A^Y = D_1 B_1^{-1} + D_2 B_2^{-1} \quad (2.2.13)$$

$$B^Y = C_1 - D_1 B_1^{-1} A_1 + C_2 - D_2 B_2^{-1} A_2 \quad (2.2.14)$$

$$C^Y = B_1^{-1} + B_2^{-1} \quad (2.2.15)$$

$$D^Y = -B_1^{-1} A_1 - B_2^{-1} A_2 \quad (2.2.16)$$

Os elementos A^Y , B^Y , C^Y e D^Y , são a representação da matriz de transferência vista na equação (2.1.5), porém transformados para a forma de admitância.

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S^T \\ \hat{I}_R^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^Y & B^Y \\ C^Y & D^Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{V}_R \end{bmatrix} \quad (2.2.17)$$

Por fim, após obter a matriz $[Y]$ equivalente das linhas em (2.2.17), é necessário voltar a matriz $[T]$ para então chegar aos novos elementos ABCD equivalente.

Isolando a tensão e corrente no barramento S em função da tensão e corrente no barramento R na equação (2.2.17):

$$\hat{I}_R^T = C^Y \hat{V}_S + D^Y \hat{V}_R \quad \rightarrow \quad V_S = -C^{Y^{-1}} D^Y \hat{V}_R + C^{Y^{-1}} \hat{I}_R^T \quad (2.2.18)$$

$$\hat{I}_S^T = A^Y \hat{V}_S + B^Y \hat{V}_R \quad (2.2.19)$$

Substituindo a (2.2.18) em (2.2.19) obtêm-se:

$$\hat{I}_S^T = (B^Y - A^Y C^{Y-1} D) \hat{V}_R + A^Y C^{Y-1} \hat{I}_R^T \quad (2.2.20)$$

Reescrevendo (2.2.18) e (2.2.20) na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C^{Y-1} D^Y & C^{Y-1} \\ B^Y - A^Y C^{Y-1} D^Y & A^Y C^{Y-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R^T \end{bmatrix} \quad (2.2.21)$$

Chega-se assim ao quadripolo equivalente para um trecho de linhas paralelas, conforme (2.2.21), o qual relaciona a tensão e corrente total que entra no barramento S com a tensão e corrente total que sai no barramento R.

Ao substituir os valores das variáveis auxiliares (2.2.13), (2.2.14), (2.2.15) e (2.2.16) em (2.2.21) e realizando as possíveis simplificações obtemos:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & B^P \\ C^P & D^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R^T \end{bmatrix} \quad (2.2.22)$$

Sendo seus elementos:

$$A^P = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2} \quad (2.2.23)$$

$$B^P = \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} \quad (2.2.24)$$

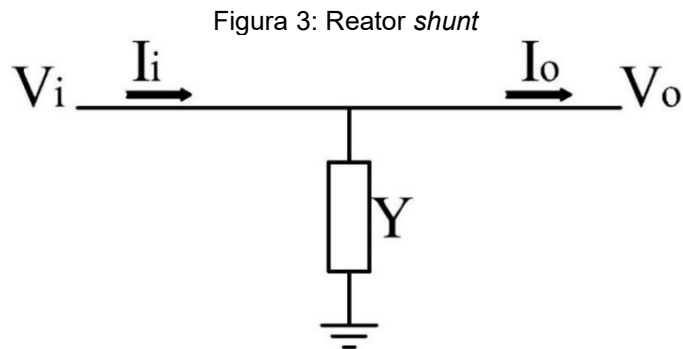
$$C^P = C_1 + C_2 + \frac{(A_1 - A_2)(D_2 - D_1)}{B_1 + B_2} \quad (2.2.25)$$

$$D^P = \frac{B_2 D_1 + B_1 D_2}{B_1 + B_2} \quad (2.2.26)$$

Para o caso especial em que as linhas paralelas são iguais a equação (2.2.22) pode ser simplificada conforme apresentado no Apêndice A.

2.3 REATOR SHUNT

A fim de incrementar o aplicativo, é apresentado neste subitem o modelamento do reator *shunt* que, conectado a uma linha de forma pontual, a resistência, indutância e capacitância do trecho pode ser desprezada, portanto, o circuito equivalente é apresentado na Figura 3.



Fonte: Autoria própria – 2019

Onde:

$Y \rightarrow$ Admitância do banco de reatores, em [S].

A partir do circuito da Figura 3 têm-se:

$$\hat{V}_i = \hat{V}_o \quad (2.3.1)$$

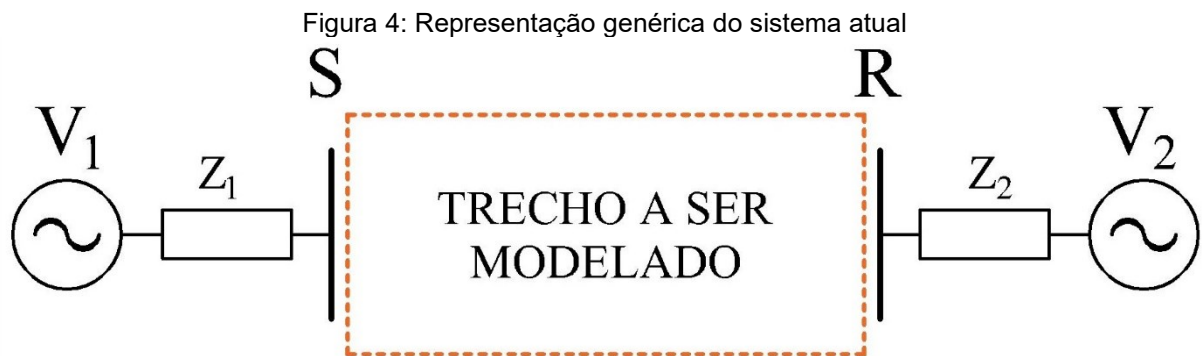
$$\hat{I}_i = \hat{I}_o + \hat{V}_o \bar{Y} \quad (2.3.2)$$

Assim, ao escrever as equações de forma matricial têm-se a equação (2.3.3) descrita a seguir.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_i \\ \hat{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{Y} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_o \\ \hat{I}_o \end{bmatrix} \quad (2.3.3)$$

2.4 CÁLCULO DAS CORRENTES DE PRÉ-FALTA NOS EQUIVALENTES

No estado atual, o programa exige como entrada do usuário, além dos parâmetros elétricos do trecho da linha de interesse a ser modelada, também os equivalentes de Thévenin das redes conectadas a ela, representadas por uma fonte de tensão V em série com uma impedância Z , conforme a Figura 4. Além disso, como dado de entrada, é solicitado a corrente fornecida por estas fontes. Como parte do aprimoramento da ferramenta, este item se destina a descrever o cálculo da corrente de pré-falta.



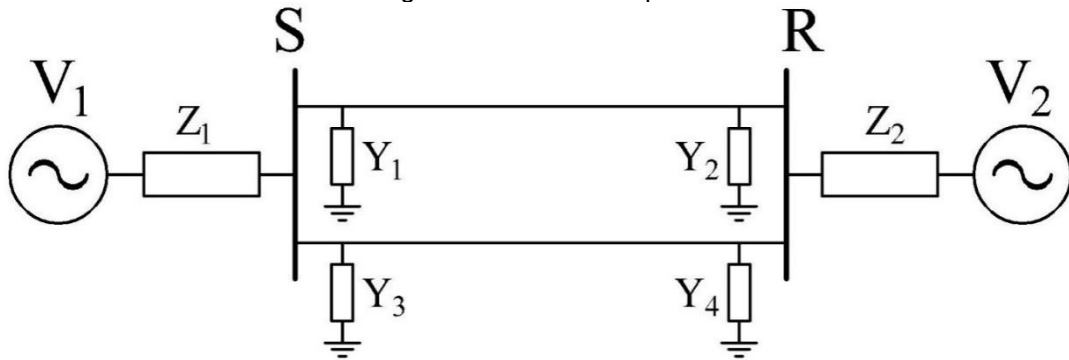
Fonte: Autoria própria – 2019

O método para calcular as correntes nas fontes se resume em obter um único quadripolo que relacione as correntes nas fontes com suas tensões, conforme a equação (2.4.1).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.4.1)$$

Para tanto, primeiro se deve modelar cada elemento pertencente ao trecho em destaque na Figura 4, o qual pode conter reatores *shunt* dispostos em uma linha simples ou em linhas paralelas. O caso mais completo é representado pela Figura 5, no qual possui linhas paralelas e quatro bancos de reatores nas extremidades das linhas. Quanto ao posicionamento dos reatores ao longo da linha, é permitido a sua colocação próximo aos barramentos S ou R , os quais representam subestações, ou nas linhas de transmissão.

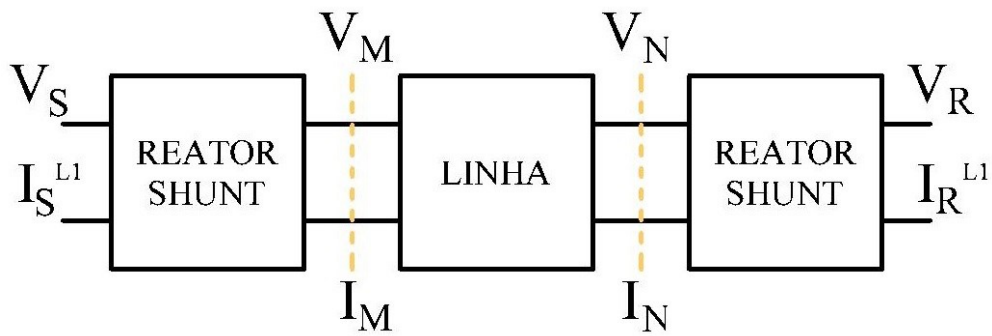
Figura 5: Sistema completo



Fonte: Autoria própria – 2019

A Figura 6 representa a disposição dos elementos da linha 1 da Figura 5 em formato de quadripolos.

Figura 6: Elementos da linha 1 representados em quadripolos



Fonte: Autoria própria – 2019

Conforme apresentado anteriormente na modelagem dos elementos, a linha de transmissão simples apresentada nas equações (2.1.5) e em (2.2.1) e para reatores *shunt* na equação (2.3.3), obtêm-se as seguintes matrizes:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S^{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{Y}_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_M \\ \hat{I}_M \end{bmatrix} \quad (2.4.2)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_M \\ \hat{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_N \\ \hat{I}_N \end{bmatrix} \quad (2.4.3)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_N \\ \hat{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{Y}_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R^{L1} \end{bmatrix} \quad (2.4.4)$$

Substituindo a equação matricial (2.4.4) em (2.4.3) e seu resultado em (2.4.2) obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S^{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{Y}_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{Y}_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R^{L1} \end{bmatrix} \quad (2.4.5)$$

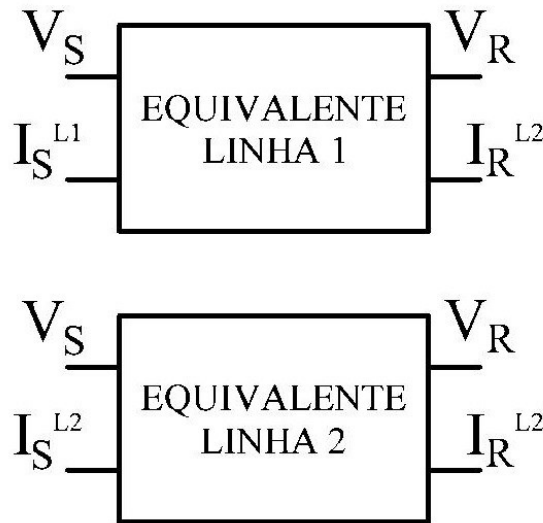
A equação (2.4.5) é a representação matricial da associação em cascata dos quadripolos dos reatores *shunt* e da linha 1.

De maneira análoga a associação em cascata dos elementos da linha 1 em (2.4.5), o mesmo aplica-se para a linha 2.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S^{L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{Y}_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{Y}_4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R^{L2} \end{bmatrix} \quad (2.4.6)$$

Depois de calculado o quadripolo equivalente em cada trecho de ambas as linhas, tem-se dois quadripolos equivalentes como mostra a Figura 7.

Figura 7: Quadripolos equivalentes de cada linha

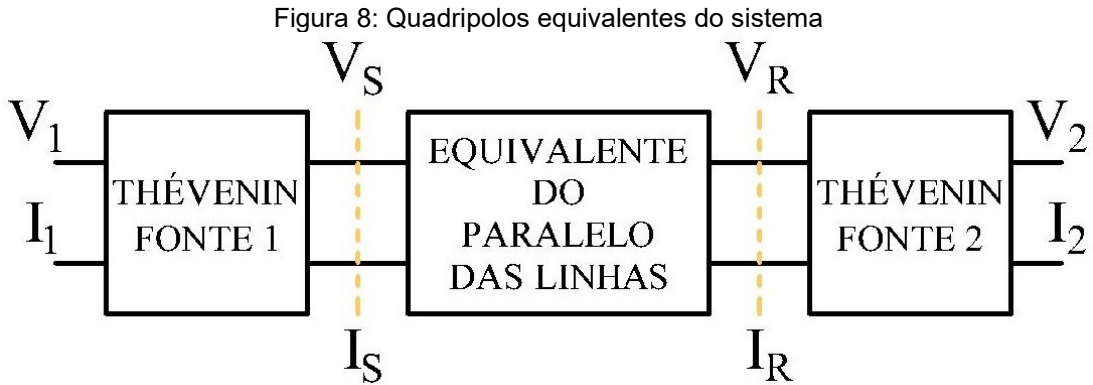


Fonte: Autoria própria – 2019

Como ambos os quadripolos se encontram conectados em paralelo, pode-se utilizar a equação (2.2.22) demonstrada para a associação de duas linhas em paralelo, resultando em um único quadripolo, em que \hat{I}_S é a soma das correntes que passam pela linha 1 e 2, assim como \hat{I}_R é a soma das correntes que saem destas linhas.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & B^P \\ C^P & D^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.4.7)$$

Por fim, resta realizar a associação entre os quadripolos dos equivalentes Thévenin das fontes em série com o quadripolo equivalente das linhas paralelas como mostra a Figura 8.



Fonte: Autoria própria – 2019

Como se encontram conectados em série é possível associá-los em cascata:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A^P & B^P \\ C^P & D^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z}_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_2 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.4.8)$$

Realizado a multiplicação, temos um único quadripolo equivalente do sistema completo.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{EQ} & B_{EQ} \\ C_{EQ} & D_{EQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_2 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.4.9)$$

Resta assim, isolar as correntes como já feito anteriormente em (2.2.6), resultando em:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{EQ} B_{EQ}^{-1} & C_{EQ} - D_{EQ} B_{EQ}^{-1} A_{EQ} \\ B_{EQ}^{-1} & -B_{EQ}^{-1} A_{EQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.4.10)$$

Da qual é possível calcular as correntes nas fontes.

$$\hat{I}_1 = (D_{EQ} B_{EQ}^{-1}) \hat{V}_1 + (C_{EQ} - D_{EQ} B_{EQ}^{-1} A_{EQ}) \hat{V}_2 \quad (2.4.11)$$

$$\hat{I}_2 = (B_{EQ}^{-1}) \hat{V}_1 + (-B_{EQ}^{-1} A_{EQ}) \hat{V}_2 \quad (2.4.12)$$

2.5 CÁLCULO DAS CORRENTES DE PRÉ-FALTA NA LINHA

O objetivo do programa é calcular os parâmetros de tensão e corrente no local em que o relé de proteção obtém suas medições, para faltas simuladas ao longo de toda a linha sob sua proteção. Para obter estes parâmetros é necessário realizar a análise do sistema em duas situações distintas: a primeira durante o regime de operação normal da linha, ou seja, o instante antes de ocorrer a falta e; a segunda no momento de sua ocorrência, sendo os valores de interesse uma sobreposição dos obtidos nestas duas condições. Portanto, nesta seção será exposta a análise do sistema para a primeira situação, a condição pré-falta.

Na execução do aplicativo, será exigido que o usuário indique qual linha deve ser analisada e, baseado nessa escolha, durante o cálculo do pré-falta será determinada as correntes na primeira ou na segunda linha. As tensões nos barramentos S e R, independente da escolha, são determinadas uma única vez, já que são iguais para ambas as linhas.

O cálculo da condição pré-falta começa com a determinação das tensões nos barramentos S e R, como as tensões nas fontes são entradas do programa e suas respectivas correntes já foram calculadas no subitem 2.4, o cálculo da tensão V_S e V_R é realizado conforme apresentado abaixo.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S \end{bmatrix} \quad (2.5.1)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{I}_1 \end{bmatrix} \quad (2.5.2)$$

Portanto, a tensão na barra S é calculada pela equação (2.5.3).

$$\hat{V}_S = \hat{V}_1 - \bar{Z}_1 \hat{I}_1 \quad (2.5.3)$$

O desenvolvimento do cálculo para a tensão na barra R é similar ao da tensão na barra S, logo a equação (2.5.4) exibe a tensão na barra R.

$$\hat{V}_R = \hat{V}_2 + \bar{Z}_2 \hat{I}_2 \quad (2.5.4)$$

Após o cálculo das tensões, são calculadas as correntes na linha selecionada pelo usuário por meio da equação (2.4.5). Dessa maneira, isolando os valores de corrente obtêm-se as relações das correntes em função das tensões, conforme a equação (2.5.5)

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S^{L1} \\ \hat{I}_R^{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{L1} B_{L1}^{-1} & C_{L1} - D_{L1} B_{L1}^{-1} A_{L1} \\ B_{L1}^{-1} & -B_{L1}^{-1} A_{L1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{V}_R \end{bmatrix} \quad (2.5.5)$$

Na qual:

$$\begin{aligned} A_{L1} &= A_1 + B_1 \bar{Y}_2 \\ B_{L1} &= B_1 \\ C_{L1} &= C_1 + A_1 \bar{Y}_1 + (D_1 + B_1 \bar{Y}_1) \bar{Y}_2 \\ D_{L1} &= D_1 + B_1 \bar{Y}_1 \end{aligned}$$

2.6 FALTAS

O programa já realiza faltas monofásicas, serão acrescentadas faltas fase-fase, fase-fase-terra e trifásicas.

A seguir são apresentados todos os cálculos de curto-circuito que serão implementados no programa.

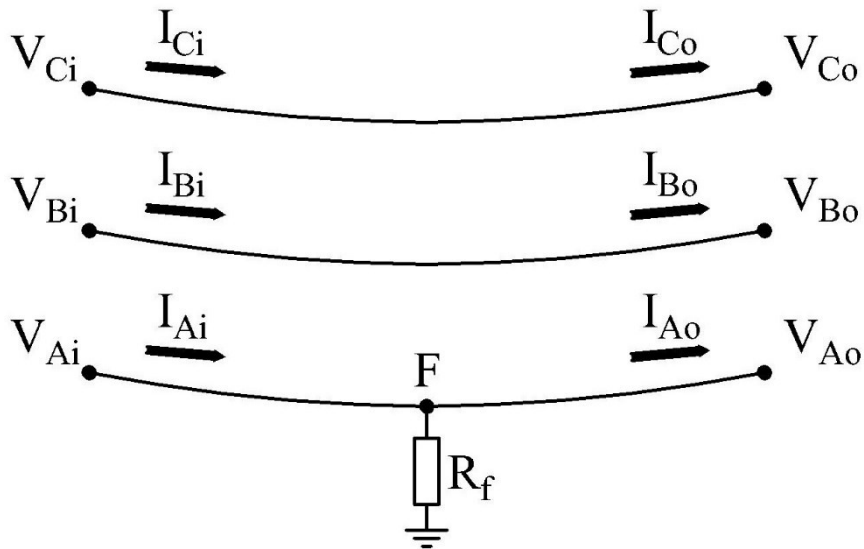
Os curtos-circuitos foram considerados não sólidos, ou seja, com uma impedância no local do defeito que será um dado de entrada do usuário. Caso o usuário opte por um curto-circuito sólido, é preciso apenas zerar as impedâncias.

A seguir será feita uma análise no ponto de falta para cada tipo de curto-circuito e construída sua matriz de falta equivalente.

2.6.1 Quadripolo de uma falta Fase A – Terra (ϕg)

O diagrama representado na Figura 9 a seguir ilustra uma falta do tipo AG com uma impedância entre o condutor e a terra (KINDERMANN G., 2010).

Figura 9: Falta Fase-Terra com impedância de falta



Fonte: Autoria própria – 2019

Considerando o trecho apresentado como sendo uma seção infinitesimal de uma linha de transmissão e o ponto F como sendo o local da falta, pode-se afirmar que, para cada fase, as tensões em todos os pontos do trecho da linha serão iguais, por fase. Considerando o sentido das correntes de acordo com a Figura 9, tem-se as seguintes equações:

$$\hat{I}_{Ai} = \hat{I}_{Ao} + \frac{\hat{V}_{Ao}}{R_f} \quad (2.6.1)$$

$$\hat{I}_{Bi} = \hat{I}_{Bo} \quad (2.6.2)$$

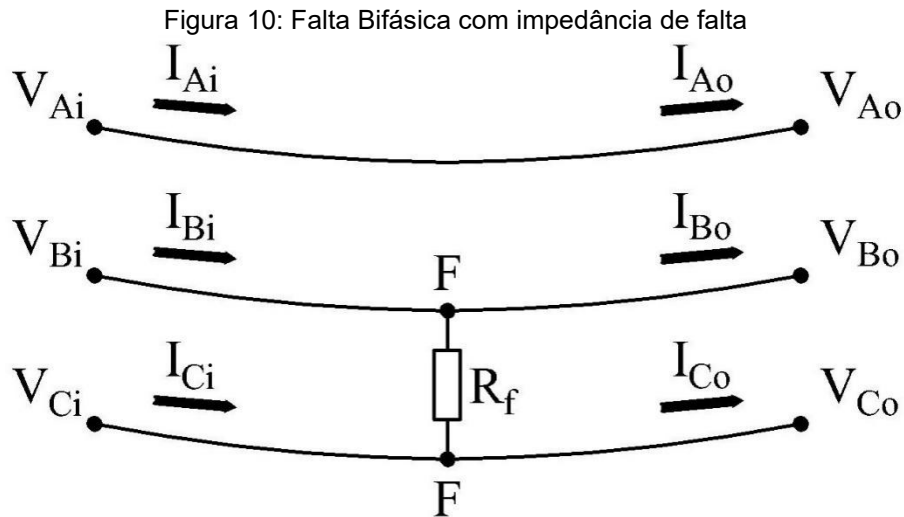
$$\hat{I}_{Ci} = \hat{I}_{Co} \quad (2.6.3)$$

Dessa forma, a matriz que representa o quadripolo do local de uma falta monofásica AG em uma linha de transmissão trifásica é representada pela Equação (2.6.4):

$$\begin{bmatrix} V_{Ai} \\ V_{Bi} \\ V_{Ci} \\ I_{Ai} \\ I_{Bi} \\ I_{Ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_f} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \\ I_{Ao} \\ I_{Bo} \\ I_{Co} \end{bmatrix} \quad (2.6.4)$$

2.6.2 Quadripolo de uma falta Bifásica ($\phi\phi$)

A seguir, é apresentado, na Figura 10, o diagrama de uma falta bifásica com impedância de falta conectada entre as duas fases (BC) em curto-circuito.



Fonte: Autoria própria – 2019

Como a seção é infinitesimal, pode-se afirmar que para cada fase, as tensões em todos os pontos do trecho da linha serão iguais. Considerando o sentido das correntes de acordo com a Figura 10, tem-se as seguintes equações:

$$\hat{I}_{Ai} = \hat{I}_{Ao} \quad (2.6.5)$$

$$\hat{I}_{Bi} = \hat{I}_{Bo} + \frac{\hat{V}_{Bo} - \hat{V}_{Co}}{R_f} \quad (2.6.6)$$

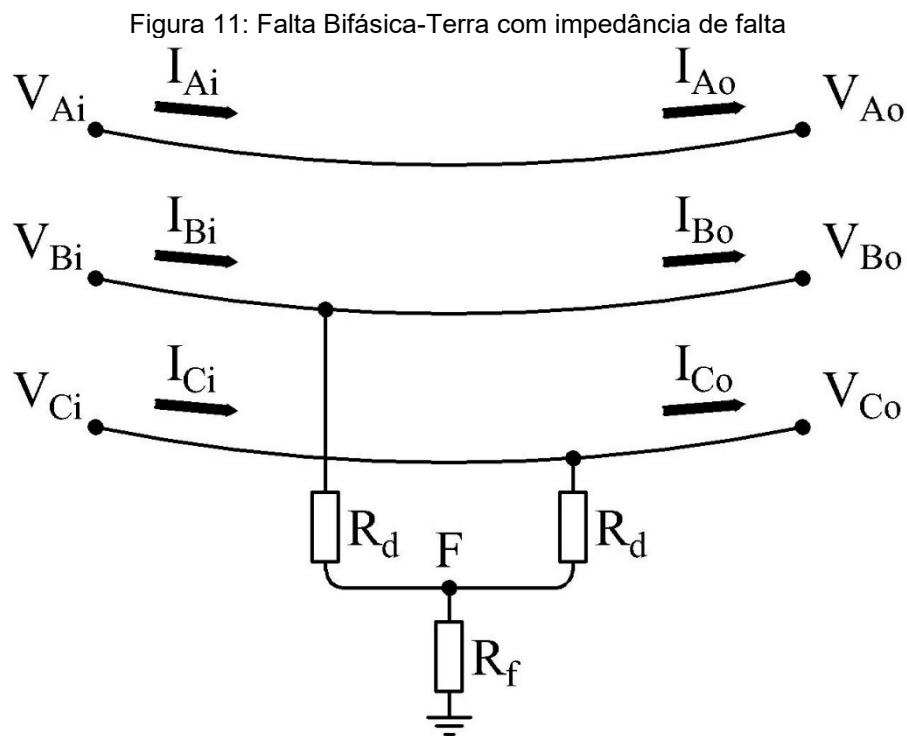
$$\hat{I}_{Ci} = \hat{I}_{Co} + \frac{\hat{V}_{Co} - \hat{V}_{Bo}}{R_f} \quad (2.6.7)$$

Dessa forma, a matriz quadrada de ordem 6, representada na Equação (2.6.8), é o quadripolo de uma falta bifásica, envolvendo as fases B e C, em uma linha de transmissão trifásica.

$$\begin{bmatrix} V_{Ai} \\ V_{Bi} \\ V_{Ci} \\ I_{Ai} \\ I_{Bi} \\ I_{Ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_f} & -\frac{1}{R_f} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_f} & \frac{1}{R_f} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \\ I_{Ao} \\ I_{Bo} \\ I_{Co} \end{bmatrix} \quad (2.6.8)$$

2.6.3 Quadripolo de uma falta Bifásica-Terra ($\phi\phi g$)

O diagrama representado na Figura 11 abaixo apresenta uma falta do tipo Bifásica-Terra, que considera uma impedância R_d entre as fases e o ponto F, e também a impedância R_f entre o ponto F e a terra.



Fonte: Autoria própria – 2019

Como a seção é infinitesimal, pode-se afirmar que para cada fase, as tensões ao longo da linha terão o mesmo valor. Considerando o sentido das correntes apresentado acima, tem-se as seguintes equações:

$$\hat{I}_{Ai} = \hat{I}_{Ao} \quad (2.6.9)$$

$$\hat{I}_{Bi} = \hat{I}_{Bo} + \hat{V}_{Bo} \times \left[\frac{(R_f + R_d)}{R_d(2R_f + R_d)} \right] + \hat{V}_{Co} \times \left[-\frac{R_f}{R_d(2R_f + R_d)} \right] \quad (2.6.10)$$

$$\hat{I}_{Ci} = \hat{I}_{Co} + \hat{V}_{Bo} \times \left[-\frac{R_f}{R_d(2R_f + R_d)} \right] + \hat{V}_{Co} \times \left[\frac{(R_f + R_d)}{R_d(2R_f + R_d)} \right] \quad (2.6.11)$$

Dessa forma, a matriz quadrada de ordem 6, presente na Equação (2.6.12), é a representação do quadripolo de uma falta Bifásica-Terra, envolvendo as fases B e C e a terra, em uma linha de transmissão trifásica. O usuário poderá fornecer os valores de R_f e R_d .

$$\begin{bmatrix} V_{Ai} \\ V_{Bi} \\ V_{Ci} \\ I_{Ai} \\ I_{Bi} \\ I_{Ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(R_f + R_d)}{R_d(2R_f + R_d)} & -\frac{R_f}{R_d(2R_f + R_d)} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{R_f}{R_d(2R_f + R_d)} & \frac{(R_f + R_d)}{R_d(2R_f + R_d)} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \\ I_{Ao} \\ I_{Bo} \\ I_{Co} \end{bmatrix} \quad (2.6.12)$$

2.6.4 Quadripolo de uma falta Trifásica (3 ϕ)

A seguir é apresentado, na Figura 12, o diagrama de uma falta trifásica, com impedância de falta conectada entre os três condutores, formando uma conexão em **Y** (estrela).

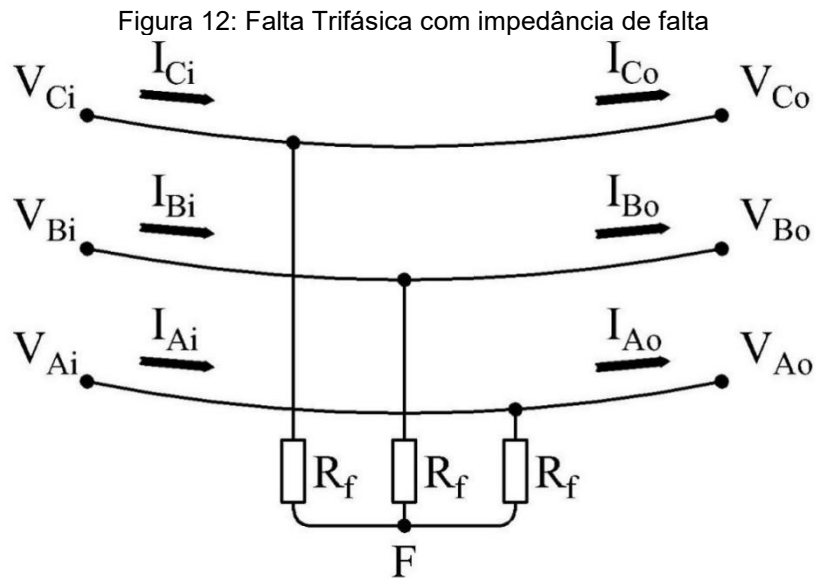
De acordo com Kindermann (2010, p.162) no curto-circuito trifásico (3 ϕ) todas as correntes são equilibradas, portanto, não há diferença entre ele e o curto trifásico-terra (3 ϕ g).

Considerando as mesmas premissas anteriores, tem-se as seguintes equações:

$$\hat{I}_{Ai} = \hat{I}_{Ao} + \frac{\hat{V}_{Ao}}{R_f} \quad (2.6.13)$$

$$\hat{I}_{Bi} = \hat{I}_{Bo} + \frac{\hat{V}_{Bo}}{R_f} \quad (2.6.14)$$

$$\hat{I}_{Ci} = \hat{I}_{Co} + \frac{\hat{V}_{Co}}{R_f} \quad (2.6.15)$$



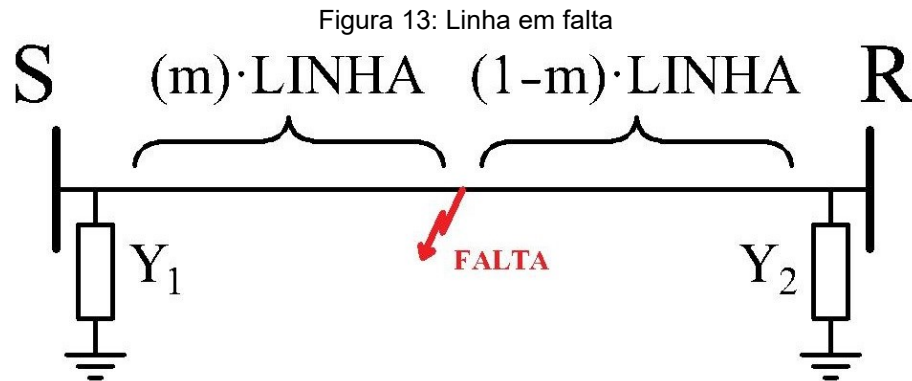
Dessa forma, a matriz que representa o quadripolo do local de uma falta trifásica em uma linha de transmissão trifásica é representada pela Equação (2.6.16).

$$\begin{bmatrix} V_{Ai} \\ V_{Bi} \\ V_{Ci} \\ I_{Ai} \\ I_{Bi} \\ I_{Ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_f} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_f} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_f} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \\ I_{Ao} \\ I_{Bo} \\ I_{Co} \end{bmatrix} \quad (2.6.16)$$

2.7 FALTA NA LINHA DE TRANSMISSÃO

Com os quadripolos para faltas já evidenciados no subitem anterior, pode-se partir para o cálculo da situação do sistema em falta.

Para a realização das faltas, a linha é dividida em duas partes, sendo que o ponto de ocorrência da falta se localiza entre essa divisão, conforme evidenciado na Figura 13.



Fonte: Autoria própria – 2019

Sendo m uma variável auxiliar para o posicionamento da falta, de modo que o programa realize 101 faltas ao longo da linha, portanto m pode ser definido como:

$$m = n \cdot 0,01 \mid n \in \mathbb{N} \text{ e } 0 \leq n \leq 100$$

O processo para calcular as tensões e correntes nos extremos da linha onde estão localizados os relés de proteção é o mesmo realizado para o cálculo das correntes apresentados no item 2.4 e no item 2.5. Entretanto, haverá a divisão do quadripolo das linhas em duas partes proporcionais a localização da falta e entre elas será adicionado o quadripolo de falta, conforme evidenciado na Figura 14.



Fonte: Autoria própria – 2019

A corrente lida pelo relé de proteção será o resultado da sobreposição da corrente no pré-falta com a corrente pura de falta. Portanto, as saídas do programa serão os gráficos da corrente lida pelo relé, relevantes de acordo com o tipo de falta.

3 DESCRITIVO DO PROGRAMA

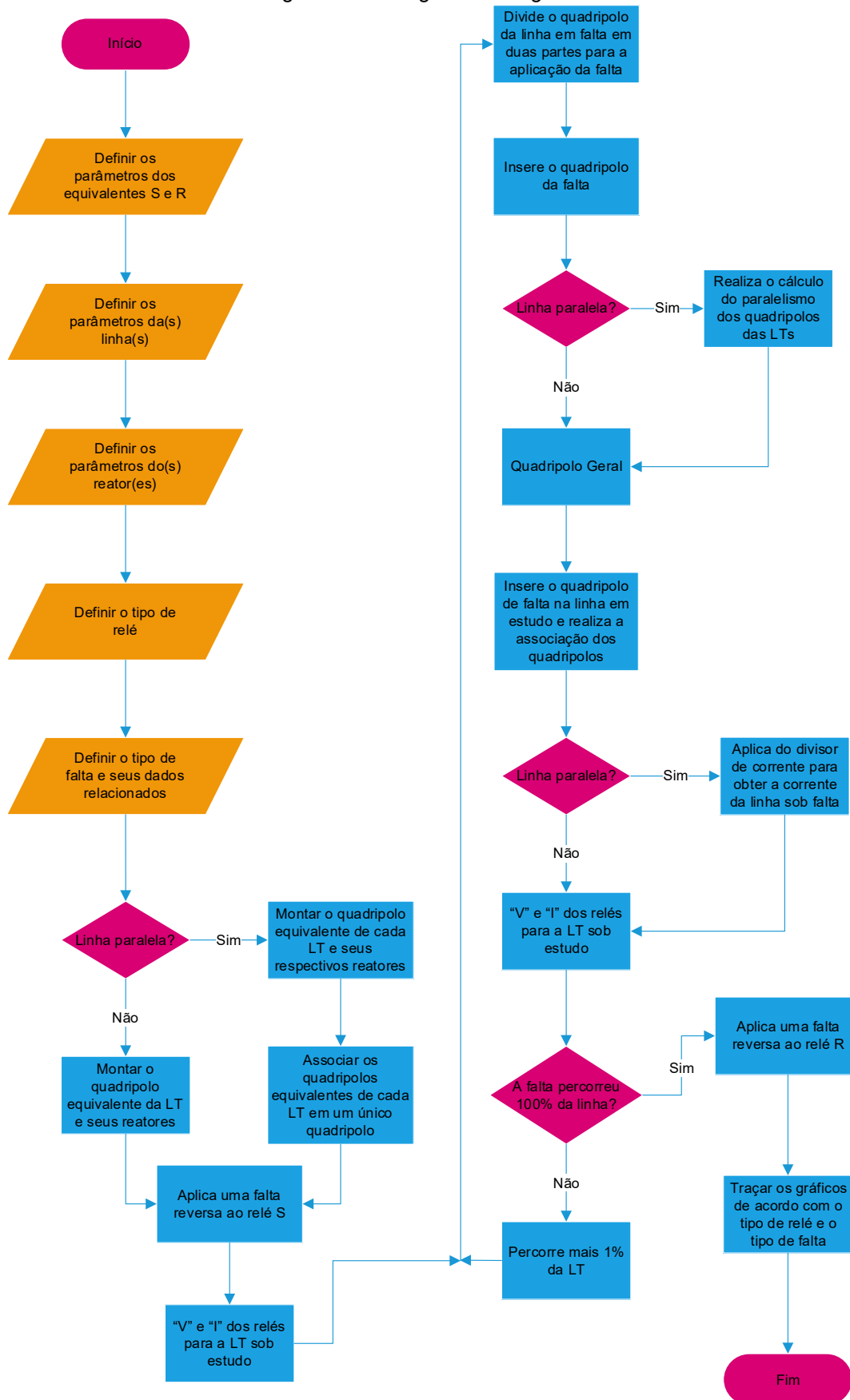
Ao longo deste capítulo será apresentada a documentação do aplicativo desenvolvido, onde será exposto o passo a passo da rotina executada, a aplicação das equações apresentadas no capítulo 2 e a apresentação do *software*, já consolidado no mercado, que irá validar os resultados da aplicação.

3.1 FLUXOGRAMA

O algoritmo pode ser dividido em três blocos principais: entrada de dados, processos de cálculo e resposta do programa.

A representação esquemática do algoritmo é apresentada no fluxograma da Figura 15 no qual estão presentes todas as etapas do programa, desde a entrada de dados até a resposta final.

Figura 15: Fluxograma do algoritmo



Fonte: Autoria própria – 2020

3.1.1 Entrada de dados

Nessa etapa o usuário fornecerá com os dados do sistema, tais como os parâmetros dos equivalentes, as impedâncias das linhas, dos reatores *shunt*, a seleção do relé e o tipo da falta que será aplicada no sistema. Todas essas informações são inseridas no arquivo *main.py*.

Antes da entrada dos dados o usuário escolhe se haverá linhas paralelas, reator *shunt* e, caso haja o reator, se ele estará na barra ou na linha. Tais escolhas são da seguinte maneira:

- *Parallel*: Caso o sistema do usuário possua uma linha paralela, ele deverá marcar essa opção como '*sim*', caso contrário marque a opção como '*não*';
- *Shunt*: Caso o sistema do usuário possua reatores *shunt*, ele deverá marcar essa opção como '*sim*'.
- *local*: Local escolhido pelo usuário para conexão do reator *shunt*, podendo ser na barra ou na linha. Caso o usuário deseje o reator na barra deve colocar '*barra*', caso deseje na linha deve colocar '*linha*' e caso não tenha reator no sistema não é necessário inserir nenhuma informação.

3.1.1.1 Equivalentes S e R

O usuário deve definir os parâmetros dos equivalentes S e R da seguinte maneira:

- *Ve1*: Tensão do equivalente no lado S da linha, valor dado em *Volts* [V] ou [pu];
- *Ange1*: Ângulo da tensão do equivalente do lado S, valor dado em graus [°];
- *Confe1*: Configuração do equivalente, podem ser em estrela (Y) ou delta (D). O usuário apenas informa se é Y ou D;
- *Z0e1*: Impedância de sequência zero do equivalente, dado em *Ohms* [Ω] ou [pu] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$);

- *Z1e1*: Impedância de sequência positiva do equivalente, dado em *Ohms* [Ω] ou [pu] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$).

Para o equivalente de Thévenin no lado R do sistema, devem ser definidos os seguintes valores:

- *Ve2*: Tensão do equivalente no lado R da linha, valor dado em *Volts* [V] ou [pu];
- *Ange2*: Ângulo da tensão do equivalente do lado R, valor dado em graus [$^\circ$];
- *Confe2*: Configuração do equivalente, podem ser em estrela (Y) ou delta (D). O usuário apenas informa se é Y ou D;
- *Z0e2*: Impedância de sequência zero do equivalente, dado em *Ohms* [Ω] ou [pu] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$);
- *Z1e2*: Impedância de sequência positiva do equivalente, dado em *Ohms* [Ω] ou [pu] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$).

3.1.1.2 Linhas de transmissão

O usuário deverá definir os seguintes parâmetros para as linhas de transmissão:

- *Comprimento1*: Comprimento da linha de transmissão, dado em quilômetros [km];
- *Z01*: Impedância complexa de sequência zero da linha 1 de transmissão, valor em *Ohms* por quilômetro [Ω/km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$);
- *Z11*: Impedância complexa de sequência positiva da linha 1 de transmissão, valor em *Ohms* por quilômetro [Ω/km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$);
- *Y01*: Admitância complexa de sequência zero da linha 1 de transmissão, valor em *siemens* por quilômetro [S/km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$). Este

item não é obrigatório, caso a linha não possua admitância esse valor será zero;

- *Y11*: Admitância complexa de sequência positiva da linha 1 de transmissão, valor em *siemens* por quilômetro [S/km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$). Este item não é obrigatório, caso a linha não possua admitância esse valor será zero;

Caso o sistema possua linhas paralelas, o usuário deverá definir os seguintes valores para a linha 2:

- *Comprimento2*: Comprimento da linha de transmissão, dado em quilômetros [km];
- *Z02*: Impedância complexa de sequência zero da linha 2 de transmissão, valor em *Ohms* por quilômetro [Ω /km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$);
- *Z12*: Impedância complexa de sequência positiva da linha 2 de transmissão, valor em *Ohms* por quilômetro [Ω /km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$);
- *Y02*: Admitância complexa de sequência zero da linha 2 de transmissão, valor em *siemens* por quilômetro [S/km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$). Este item não é obrigatório, caso a linha não possua admitância esse valor será zero;
- *Y12*: Admitância complexa de sequência positiva da linha 2 de transmissão, valor em *siemens* por quilômetro [S/km] ou [pu/km] composto por uma parte real e uma parcela imaginária ($Re + j \cdot Im$). Este item não é obrigatório, caso a linha não possua admitância esse valor será zero.

3.1.1.3 Faltas

Para a aplicação das faltas o usuário deve definir: qual tipo de falta, os dados de resistência de falta a terra “ R_f ” e a resistência de falta entre fases, quando houver. Sua entrada deve ser $Fault(Fault, R_f, R_d)$, nos quais:

- *Fault*: Tipo de falta que se deseja aplicar no sistema. Sua seleção é realizada por números inteiros, podendo ser:
 - 1: Falta monofásica (ϕg);
 - 2: Falta bifásica ($\phi\phi$);
 - 3: Falta bifásica-terra ($\phi\phi g$);
 - 4: Falta trifásica (3ϕ).
- *R_f*: Resistência de falta a terra, dada em *Ohms* [Ω] ou [pu]. Não é um item obrigatório;
- *R_d*: Resistência de falta entre fases, dada em *Ohms* [Ω] ou [pu]. Não é um item obrigatório.

3.1.1.4 Reatores *Shunt*

Caso o sistema possua reatores *shunt*, devem-se definir os seguintes parâmetros:

- *Ad1*: Admitância do reator *shunt* na linha 1, dado em *siemens* [S] ou [pu];
- *Ad2*: Admitância do reator *shunt* na linha 2, dado em *siemens* [S] ou [pu], este dado não é obrigatório.

3.1.1.5 Relés de proteção

Para definir o tipo de relé, o usuário deve entrar com *IED* onde:

- *IED*: É o relé de proteção. Atualmente a escolha é realizada por um número inteiro, no qual cada número representa um relé de proteção, sendo ele:
 - 1: *Relé SEL – 311L*;
 - 2: *Relé GE D90 Plus*;
 - 3: *Relé SIEMENS 7SJ62*.

3.1.2 Processamento dos dados

Uma vez definidos todos os parâmetros do sistema em estudo, é iniciado o processo de cálculo. Primeiramente, é identificado se há a presença de linhas paralelas, caso exista, o programa irá montar o quadripolo individual de cada LT de acordo com a equação (2.1.5), para então associar esse quadripolo em cascata aos reatores, conforme a equação (2.4.5). Após o quadripolo total de cada linha tiver sido montado, é realizada a associação em paralelo de acordo com a equação (2.4.7). Caso o sistema possua apenas linha simples, realiza-se a associação em cascata da linha com os reatores, conforme a equação (2.4.5) para obter-se um quadripolo equivalente.

Uma vez calculado o quadripolo equivalente da(s) linha(s), aplica-se uma falta na barra S, ou seja, reversa ao relé da barra S. Realizado esta etapa, são calculadas as tensões e correntes dos relés.

Após isso, divide-se o quadripolo da linha para a inserção do quadripolo da falta, conforme a Figura 14.

Caso a linha seja paralela, realiza-se a cascata dos quadripolos (*shunt*, falta e trecho da linha) e depois a associação em paralelo. Caso seja uma linha simples a associação em cascata já é o quadripolo final. Dessa maneira calcula-se a corrente total do circuito e a tensão nas barras.

Após o cálculo da tensão na barra, se a linha for paralela, calcula-se a corrente que circula pela linha em falta por meio de um divisor de corrente, caso contrário a corrente total é a corrente que circula pela linha em falta. O processo de aplicação da falta é repetido até que seja excursionado 100% da linha, sendo acrescido a cada iteração em 1% do comprimento total.

A última falta que será aplicada será na barra R, esta por sua vez reversa ao relé da barra R.

Os dados de corrente e tensão nos pontos de falta não são calculados, apenas as correntes e tensões lidas pelos relés de proteção da extremidade da linha.

3.1.3 Resposta do programa

Por fim, uma vez que todas as faltas foram aplicadas, todos os valores de corrente e tensão em cada ponto da falta ficam armazenados em um vetor. A partir do tipo da falta e do relé selecionado na primeira etapa, entrada de dados, serão exibidos os gráficos pertinentes ao *IED* selecionado inicialmente, assim facilitando a análise e a compreensão da resposta do sistema.

3.2 SOFTWARE DE VALIDAÇÃO

A fim de validar os resultados do aplicativo desenvolvido, foi selecionado o *software* PS Simul da empresa CONPROVE Engenharia para tal função. Existem outros aplicativos computacionais (como o ANAFAS, por exemplo) que poderiam ser utilizados, mas a escolha pelo PS Simul se deve pela disponibilidade da licença do aplicativo, o qual possui uma versão gratuita e também uma versão institucional, além de uma interface gráfica que facilita a visualização do sistema.

Conforme informações da CONPROVE, (2020), o programa PS Simul, começou a ser desenvolvido em 2009, tendo sua primeira versão lançada para o público em 2014.

O PS Simul utiliza o método trapezoidal para a resolução das equações diferenciais. Entretanto, conforme verificação realizada pela CONPROVE, este método apresenta oscilações nas suas respostas quando ocorre iteração de dispositivos chaveados com elementos capacitivos e indutivos. Uma maneira para contornar tal problema seria a inserção de resistências parasitas pelo usuário, de modo que fossem compensadas as oscilações no sistema.

A solução desenvolvida e aplicada pela CONPROVE com o PS Simul é a utilização do método de Euler frente a estes elementos chaveados por um curto intervalo de tempo, contornado os problemas na oscilação numérica da resposta.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as licenças do *software* utilizado para validar o aplicativo desenvolvido nesse trabalho.

Tabela 1 – Tipos de licenças do programa PS Simul

(continua)

DESCRIÇÃO	TIPOS DE LICENÇAS				
	<i>FREE</i>	EDUCACIONAL	INSTITUCIONAL	<i>FULL</i>	<i>FULL + MALHA FECHADA</i>
Páginas <i>Draft</i>	1	2	6	ILIMITADO	ILIMITADO
Páginas <i>RunTime</i>	1	2	6	ILIMITADO	ILIMITADO
Projetos abertos simultaneamente	2	5	15	20	20
Bibliotecas abertas simultaneamente	1	2	3	5	5
Blocos no <i>Draft</i>	30	180	1200	ILIMITADO	ILIMITADO
Blocos no <i>RunTime</i>	30	180	1200	ILIMITADO	ILIMITADO
Simulações	10	50	500	20000	20000
Nós de Controle	50	300	1000	ILIMITADO	ILIMITADO
Nós de Potência	15	75	450	ILIMITADO	ILIMITADO
Testes em malha fechada	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM

Fonte: CONPROVE

Segundo a empresa desenvolvedora do PS Simul (CONPROVE, 2020), o *Power System Simulator* (PS Simul) é um programa voltado para simulações de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistemas de controle. No entanto, são apresentados no capítulo 4, apenas os resultados em regime permanente para a correta comparação com o aplicativo desenvolvido nesse trabalho.

4 AVALIAÇÃO DO APLICATIVO DESENVOLVIDO

O presente capítulo tem como objetivo avaliar o aplicativo desenvolvido evidenciando seus resultados e comparando com o *software* já consolidado no mercado, o PS Simul.

Para a validação da aplicação, foram realizadas diversas simulações de falta em diferentes configurações do sistema. Para cada simulação são comparadas as magnitudes e ângulos das correntes de curto-circuito do aplicativo com a resposta do mesmo sistema no PS Simul.

As configurações dos sistemas foram as seguintes:

- Linha simples sem reator *shunt*;
- Linha paralela sem reator *shunt*;
- Linha simples com reator *shunt*;
- Linha paralela com reator *shunt*.

4.1 DADOS DO SISTEMA BASE

A seguir são apresentados os parâmetros do equivalente S de Thévenin do sistema modelado no PS Simul e no *software* desenvolvido:

- V_{e1} : 230 [kV];
- Ange1 : 0° ;
- Confe1 : Y;
- Z_{1e1} : $(0,00282 + 106,3115j)$ [Ω];
- Z_{0e1} : $(0,00282 + 106,3115j)$ [Ω].

O equivalente R de Thévenin do sistema modelado no PS Simul possui os mesmos parâmetros do equivalente S, portanto:

- V_{e2} : 230 [kV];
- Ange2 : 0° ;
- Confe2 : Y;
- Z_{1e2} : $(0,00282 + 106,3115j)$ [Ω];
- Z_{0e2} : $(0,00282 + 106,3115j)$ [Ω].

Os equivalentes se mantiveram os mesmos em todas as simulações. Abaixo são evidenciados os dados da linha 1 de transmissão:

- Comprimento1 : 50 km para a linha curta e 200 km para a linha com reator *shunt*;
- Z_{11} : $(97,6 + 520,2j)$ [$m\Omega/\text{km}$];
- Z_{01} : $(0,794 + 1,63614j)$ [Ω/km];
- Y_{11} : 3,178 [$\mu\text{S}/\text{km}$];
- Y_{01} : 2,1752 [$\mu\text{S}/\text{km}$].

Os dados da linha 2 são os mesmos da linha 1, dessa forma:

- Comprimento2 : 50 km para a linha curta e 200 km para a linha com reator *shunt*;
- Z_{12} : $(97,6m + 0,5202j)$ [Ω/km];
- Z_{02} : $(0,794 + 1,63614j)$ [Ω/km];
- Y_{12} : 3,178 [$\mu\text{S}/\text{km}$];

- $Y02: 2,1752 [\mu\text{S}/\text{km}]$.

A admitância do reator *shunt* foi considerada a seguinte:

- $Ad1: (1,8997 - 378,93j) [\mu\text{S}]$.

A resistência de falta Rf foi considerada, em todos os casos, igual a $1 \text{ m}\Omega$.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE O APLICATIVO E O PS SIMUL

Para a comparação dos resultados, foram considerados diversos cenários e configurações do sistema. Nas tabelas comparativas que serão exploradas no decorrer do capítulo, as tensões V_S e as correntes I_S correspondem as medições do relé da barra S, enquanto que as tensões V_R e as correntes I_R equivalem relé da barra R. As linhas de transmissão foram supostas como totalmente transposta.

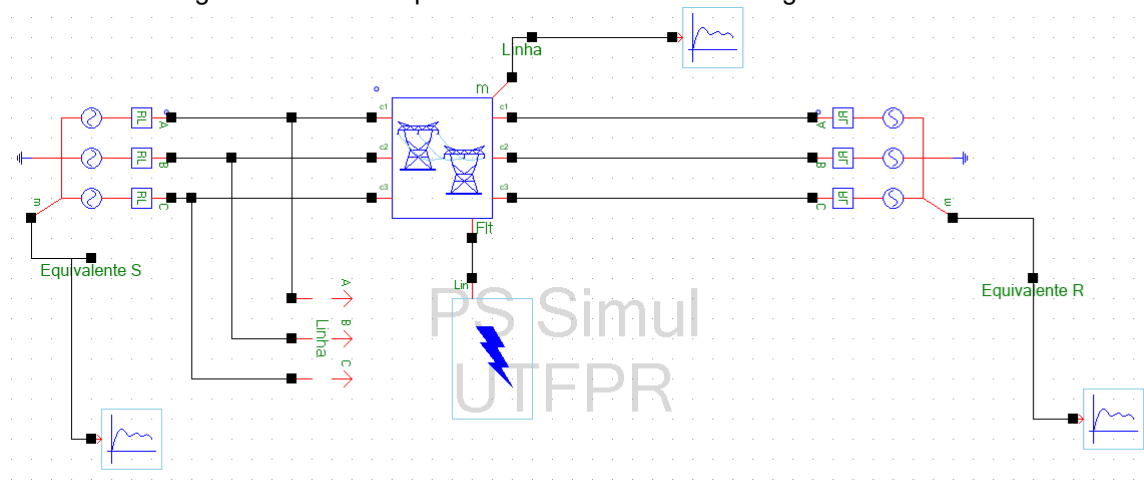
Na simulação dos sistemas no PS Psimul, foi considerado um tempo total de 300 ms, sendo que os valores utilizados como comparativo foram retirados no intervalo de 150 ms até 170 ms (condição de regime permanente da falta). O passo de integração utilizado foi de $50 \mu\text{s}$ e os curtos-circuitos foram considerados como permanente.

4.2.1 Linha simples, sem reator *shunt*

O cenário linha simples, sem reator *shunt*, foi o cenário principal de testes, no qual foi considerado uma linha curta de 50 km e foram realizadas as seguintes faltas: Falta monofásica (ϕg), falta bifásica ($\phi\phi$), falta bifásica-terra ($\phi\phi g$), falta trifásica (3ϕ).

Além disso, todos os curtos-circuitos foram excursionados de 10% até 90% da linha e a cada 10% foram registrados os valores de tensão e correntes das fases em falta.

A Figura 16 a seguir retrata a modelagem da linha simples sem reator *shunt* no *software* PS Simul.

Figura 16: Linha simples sem reator *shunt* - modelagem no PS Simul

Fonte: Autoria própria – 2020

4.2.1.1 Falta monofásica (ϕg)

Abaixo é apresentada a tabela comparativa do curto-circuito monofásico do tipo Fase A - Terra (AG), na qual são evidenciados os resultados das magnitudes e ângulos das tensões e correntes da fase sob defeito. O erro do módulo da tensão e corrente é dado em porcentagem, enquanto o erro dos ângulos é dado em graus.

Tabela 2 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta AG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
10%	V_{SA}	5,926	-19,867	5,896	-20,819	0,50	0,952
	V_{RA}	38,049	-11,442	37,267	-13,348	2,06	1,906
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I_{SA}	1196,985	-88,228	1197,392	-89,055	0,03	0,828
	I_{RA}	902,772	-83,819	911,599	-84,905	0,98	1,087
20%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V_{SA}	11,291	-18,534	11,234	-19,705	0,50	1,171
	V_{RA}	35,276	-12,170	34,500	-14,180	2,20	2,010
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I_{SA}	1149,409	-87,177	1150,136	-88,223	0,06	1,047
	I_{RA}	929,152	-83,934	937,817	-85,136	0,93	1,202

(continua)

Tabela 2 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta AG

		(continuação)					
Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
30%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	16,617	-16,709	16,078	-18,668	3,24	1,959
	V _{RA}	32,266	-12,956	31,465	-15,020	2,48	2,064
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1101,173	-86,295	1106,852	-87,492	0,52	1,197
	I _{RA}	957,502	-84,153	966,260	-85,446	0,91	1,292
40%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	21,121	-15,635	20,480	-17,692	3,04	2,057
	V _{RA}	28,901	-13,761	28,137	-15,878	2,64	2,118
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1060,297	-85,569	1067,147	-86,854	0,65	1,285
	I _{RA}	988,779	-84,515	997,135	-85,834	0,85	1,319
50%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	25,206	-14,676	24,487	-16,766	2,85	2,090
	V _{RA}	25,206	-14,676	24,487	-16,766	2,85	2,090
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1022,936	-84,972	1030,675	-86,302	0,76	1,331
	I _{RA}	1022,936	-84,972	1030,675	-86,302	0,76	1,331
60%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	28,901	-13,761	28,137	-15,878	2,64	2,118
	V _{RA}	21,121	-15,635	20,480	-17,692	3,04	2,057
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	988,779	-84,515	997,135	-85,834	0,85	1,319
	I _{RA}	1060,297	-85,569	1067,147	-86,854	0,65	1,285
70%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	32,266	-12,956	31,465	-15,020	2,48	2,064
	V _{RA}	16,617	-16,709	16,078	-18,668	3,24	1,959
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	957,502	-84,153	966,260	-85,446	0,91	1,292
	I _{RA}	1101,173	-86,295	1106,852	-87,492	0,52	1,197

Tabela 2 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta AG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
80%	V _{SA}	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
		35,276	-12,170	34,500	-14,180	2,20	2,010
	V _{RA}	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
		11,291	-18,534	11,234	-19,705	0,50	1,171
	I _{SA}	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
		929,152	-83,934	937,817	-85,136	0,93	1,202
I _{RA}	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
	1149,409	-87,177	1150,136	-88,223	0,06	1,047	
90%	V _{SA}	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
		38,049	-11,442	37,267	-13,348	2,06	1,906
	V _{RA}	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
		5,926	-19,867	5,896	-20,819	0,50	0,952
	I _{SA}	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
		902,772	-83,819	911,599	-84,905	0,98	1,087
I _{RA}	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
	1196,985	-88,228	1197,392	-89,055	0,03	0,828	

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 2 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram inferiores a 5%, ao passo que os erros de ângulo não superaram 3°. Este resultado é considerado satisfatório.

4.2.1.2 Falta bifásica ($\phi\phi$)

A seguir são evidenciados os resultados e as comparações do curto-circuito bifásico do tipo Fase B – Fase C (BC), apresentando os resultados das magnitudes e ângulos das tensões e correntes das fases em curto.

Tabela 3 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
10%	V _{SB}	67,504	-177,425	66,933	-178,127	0,85	0,702
	V _{SC}	66,530	177,877	65,972	177,125	0,84	0,752
	V _{RB}	73,227	-161,989	72,498	-163,744	1,00	1,755
	V _{RC}	67,144	163,091	66,717	161,277	0,64	1,814

Tabela 3 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BC

		(continuação)						
Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros		
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
10%		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
	I _{SB}	1055,869	-179,208	1061,159	-179,745	0,50	0,537	
	I _{SC}	1055,818	0,214	1050,610	0,262	0,49	0,048	
	I _{RB}	884,618	-176,369	891,344	-178,062	0,76	1,694	
20%	I _{RC}	884,859	2,942	880,805	1,967	0,46	0,976	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
	V _{SB}	68,120	-175,025	67,525	-175,913	0,87	0,888	
	V _{SC}	66,232	175,803	65,701	174,818	0,80	0,985	
	V _{RB}	72,467	-163,499	71,744	-165,181	1,00	1,681	
	V _{RC}	66,777	164,675	66,349	162,934	0,64	1,740	
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
	I _{SB}	1031,249	-178,744	1036,505	-179,500	0,51	0,756	
	I _{SC}	1031,149	0,664	1025,957	0,510	0,50	0,155	
	I _{RB}	902,976	-176,635	909,549	-178,244	0,73	1,609	
	I _{RC}	903,191	2,690	899,008	1,782	0,46	0,907	
	30%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
V _{SB}		68,795	-172,735	68,161	-173,835	0,92	1,099	
V _{SC}		66,061	173,732	65,561	172,602	0,76	1,130	
V _{RB}		71,709	-165,110	70,995	-166,706	1,00	1,596	
V _{RC}		66,471	166,333	66,036	164,681	0,65	1,652	
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
I _{SB}		1007,130	-178,322	1012,959	-179,268	0,58	0,946	
I _{SC}		1006,984	1,072	1002,412	0,745	0,45	0,327	
I _{RB}		922,090	-176,920	928,513	-178,433	0,70	1,513	
I _{RC}		922,277	2,419	917,970	1,591	0,47	0,828	
40%			Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
		V _{SB}	69,501	-170,628	68,834	-171,883	0,96	1,255
	V _{SC}	66,011	171,773	65,540	170,479	0,71	1,294	
	V _{RB}	70,946	-166,832	70,258	-168,327	0,97	1,494	
	V _{RC}	66,245	168,067	65,790	166,519	0,69	1,548	
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
	I _{SB}	984,467	-177,920	990,443	-179,046	0,61	1,126	
	I _{SC}	984,277	1,461	979,897	0,970	0,45	0,491	
	I _{RB}	942,009	-177,240	948,281	-178,629	0,67	1,389	
	I _{RC}	942,167	2,113	937,738	1,392	0,47	0,721	

Tabela 3 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BC

(continuação)

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	70,217	-168,666	69,534	-170,049	0,97	1,384
	V _{SC}	66,079	169,882	65,618	168,451	0,70	1,431
	V _{RB}	70,217	-168,666	69,534	-170,049	0,97	1,384
	V _{RC}	66,079	169,882	65,618	168,451	0,70	1,431
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	962,781	-177,563	968,903	-178,834	0,64	1,272
	I _{SC}	962,549	1,804	958,358	1,184	0,44	0,620
	I _{RB}	962,781	-177,563	968,906	-178,834	0,64	1,271
	I _{RC}	962,903	1,804	958,362	1,185	0,47	0,619
60%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	70,946	-166,832	70,254	-168,326	0,98	1,493
	V _{SC}	66,245	168,067	65,787	166,519	0,69	1,548
	V _{RB}	69,501	-170,628	68,831	-171,882	0,96	1,254
	V _{RC}	66,011	171,773	65,536	170,479	0,72	1,294
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	942,009	-177,240	948,284	-178,628	0,67	1,388
	I _{SC}	941,743	2,113	937,740	1,393	0,43	0,720
	I _{RB}	984,467	-177,920	990,443	-179,047	0,61	1,127
	I _{RC}	984,537	1,461	979,898	0,969	0,47	0,492
70%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	71,709	-165,110	70,995	-166,706	1,00	1,596
	V _{SC}	66,471	166,333	66,036	164,680	0,65	1,653
	V _{RB}	68,795	-172,735	68,161	-173,835	0,92	1,100
	V _{RC}	66,061	173,732	65,561	172,602	0,76	1,130
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	922,090	-176,920	928,509	-178,433	0,70	1,513
	I _{SC}	921,787	2,419	917,967	1,591	0,41	0,828
	I _{RB}	1007,130	-178,322	1012,953	-179,269	0,58	0,947
	I _{RC}	1007,128	1,072	1002,406	0,744	0,47	0,328
80%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	72,467	-163,499	71,741	-165,180	1,00	1,681
	V _{SC}	66,777	164,675	66,346	162,933	0,64	1,741
	V _{RB}	68,120	-175,025	67,522	-175,913	0,88	0,888
	V _{RC}	66,232	175,803	65,697	174,818	0,81	0,985

Tabela 3 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BC

		(conclusão)					
Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
80%		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	902,976	-176,635	909,548	-178,244	0,73	1,608
	I _{SC}	902,640	2,690	899,007	1,783	0,40	0,907
	I _{RB}	1031,249	-178,744	1036,500	-179,502	0,51	0,757
90%	I _{RC}	1031,229	0,664	1025,953	0,509	0,51	0,156
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	73,227	-161,989	72,498	-163,744	1,00	1,755
	V _{SC}	67,144	163,091	66,718	161,277	0,63	1,814
	V _{RB}	67,504	-177,425	66,933	-178,127	0,85	0,702
	V _{RC}	66,530	177,877	65,973	177,125	0,84	0,752
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	884,618	-176,369	891,344	-178,062	0,76	1,694
	I _{SC}	884,252	2,942	880,804	1,967	0,39	0,976
	I _{RB}	1055,869	-179,208	1061,157	-179,745	0,50	0,537
I _{RC}	1055,849	0,214	1050,609	0,263	0,50	0,048	

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 3 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram inferiores a 1%, ao passo que os erros de ângulo não superaram 2°. Os resultados para este tipo de falta também são satisfatórios.

4.2.1.3 Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)

A seguir são expostos os resultados e comparações das magnitudes e ângulos das tensões e corrente do curto-circuito bifásico do tipo Fase B – Fase C – Terra (BCG), para as fases em curto.

Tabela 4 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BCG

		(continua)					
Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
10%	V _{SB}	4,470	-164,358	4,464	-165,929	0,13	1,570
	V _{SC}	5,543	128,919	5,522	126,965	0,37	1,954
	V _{RB}	31,473	-148,474	30,589	-151,335	2,81	2,861
	V _{RC}	34,333	131,249	33,884	127,070	1,31	4,179

Tabela 4 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BCG

		(continuação)					
Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
10%		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1220,925	153,032	1220,237	151,418	0,06	1,614
	I _{SC}	1197,965	31,387	1197,529	29,700	0,04	1,687
	I _{RB}	1013,082	161,481	1014,408	158,484	0,13	2,997
20%	I _{RC}	971,569	30,080	933,590	27,593	3,91	2,487
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	8,637	-161,505	8,586	-163,540	0,58	2,035
	V _{SC}	10,467	129,704	10,438	127,206	0,28	2,497
	V _{RB}	28,849	-149,802	28,008	-152,760	2,92	2,958
	V _{RC}	31,806	131,422	31,384	127,190	1,33	4,232
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1193,798	154,745	1191,824	152,677	0,17	2,068
	I _{SC}	1151,236	31,628	1151,733	29,389	0,04	2,239
	I _{RB}	1036,484	160,983	1037,365	157,900	0,09	3,082
	I _{RC}	993,769	30,479	956,901	27,789	3,71	2,691
	30%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)
V _{SB}		12,921	-159,149	12,406	-161,374	3,98	2,225
V _{SC}		15,165	131,319	14,842	127,344	2,13	3,975
V _{RB}		26,095	-151,358	25,274	-154,261	3,15	2,903
V _{RC}		29,090	131,606	28,655	127,292	1,50	4,314
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
I _{SB}		1164,395	156,333	1164,057	153,801	0,03	2,532
I _{SC}		1107,089	31,536	1110,751	29,081	0,33	2,455
I _{RB}		1060,626	160,350	1061,064	157,248	0,04	3,102
I _{RC}		1018,058	30,875	982,310	28,006	3,51	2,869
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
V _{SB}		16,592	-156,869	15,958	-159,389	3,82	2,520
V _{SC}	19,172	131,576	18,810	127,406	1,89	4,170	
V _{RB}	23,139	-153,011	22,368	-155,854	3,33	2,843	
V _{RC}	26,098	131,728	25,672	127,369	1,63	4,359	
40%		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1137,340	157,598	1137,058	154,807	0,02	2,791
	I _{SC}	1069,235	31,476	1073,852	28,784	0,43	2,691
	I _{RB}	1085,476	159,562	1085,560	156,520	0,01	3,042
I _{RC}	1045,214	31,115	1010,057	28,244	3,36	2,871	

Tabela 4 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BCG

(continuação)

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	19,983	-154,862	19,270	-157,557	3,57	2,695
	V _{SC}	22,809	131,696	22,404	127,410	1,77	4,286
	V _{RB}	19,983	-154,862	19,270	-157,557	3,57	2,695
	V _{RC}	22,809	131,696	22,404	127,410	1,77	4,286
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1111,096	158,667	1110,887	155,709	0,02	2,958
	I _{SC}	1035,072	31,327	1040,445	28,505	0,52	2,823
	I _{RB}	1111,096	158,667	1110,887	155,709	0,02	2,958
	I _{RC}	1074,391	31,327	1040,445	28,505	3,16	2,823
60%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	23,139	-153,011	22,368	-155,854	3,33	2,843
	V _{SC}	26,098	131,728	25,672	127,369	1,63	4,359
	V _{RB}	16,592	-156,869	15,958	-159,389	3,82	2,520
	V _{RC}	19,172	131,576	18,810	127,406	1,89	4,170
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1085,476	159,562	1085,560	156,520	0,01	3,042
	I _{SC}	1004,365	31,115	1010,057	28,244	0,57	2,871
	I _{RB}	1137,340	157,598	1137,058	154,807	0,02	2,791
	I _{RC}	1105,864	31,476	1073,852	28,784	2,89	2,691
70%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	26,095	-151,358	25,274	-154,261	3,15	2,903
	V _{SC}	29,090	131,606	28,655	127,292	1,50	4,314
	V _{RB}	12,921	-159,149	12,406	-161,374	3,98	2,225
	V _{RC}	15,165	131,319	14,842	127,344	2,13	3,975
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1060,626	160,350	1061,064	157,248	0,04	3,102
	I _{SC}	976,503	30,875	982,310	28,006	0,59	2,869
	I _{RB}	1164,395	156,333	1164,057	153,801	0,03	2,532
	I _{RC}	1139,624	31,536	1110,751	29,081	2,53	2,455
80%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	28,849	-149,802	28,008	-152,760	2,92	2,958
	V _{SC}	31,806	131,422	31,384	127,190	1,33	4,232
	V _{RB}	8,637	-161,505	8,586	-163,540	0,58	2,035
	V _{RC}	10,467	129,704	10,438	127,206	0,28	2,497

Tabela 4 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BCG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		(conclusão) Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
80%		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1036,484	160,983	1037,365	157,900	0,09	3,082
	I _{SC}	952,741	30,479	956,901	27,789	0,44	2,691
	I _{RB}	1193,798	154,745	1191,824	152,677	0,17	2,068
90%	I _{RC}	1177,381	31,628	1151,733	29,389	2,18	2,239
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SB}	31,473	-148,474	30,589	-151,335	2,81	2,861
	V _{SC}	34,333	131,249	33,884	127,070	1,31	4,179
	V _{RB}	4,470	-164,358	4,464	-165,929	0,13	1,570
	V _{RC}	5,543	128,919	5,522	126,965	0,37	1,954
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1013,082	161,481	1014,408	158,484	0,13	2,997
	I _{SC}	932,035	30,080	933,590	27,593	0,17	2,487
	I _{RB}	1220,925	153,032	1220,237	151,418	0,06	1,614
I _{RC}	1213,944	31,387	1197,529	29,700	1,35	1,687	

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 4 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram inferiores a 4%, ao passo que os erros de ângulo não superaram 5°. Apesar do aumento do erro em comparação ao bifásico, eles estão dentro da margem de aceitação.

4.2.1.4 Falta trifásica (3 ϕ)

Abaixo é apresentada a tabela comparativa do curto-circuito trifásico (ABC), na qual são evidenciados os resultados das magnitudes e ângulos das tensões e correntes da fase sob defeito. O erro do módulo da tensão e corrente é dado em porcentagem, enquanto o erro dos ângulos é dado em graus.

Tabela 5 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta ABC

		(continua)					
Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
10%	V _{SA}	3,225	-0,002	3,227	-10,407	0,05	10,405
	V _{SB}	3,231	-120,001	3,227	-130,407	0,13	10,406
	V _{SC}	3,234	120,005	3,227	109,593	0,21	10,412
	V _{RA}	24,552	-0,020	24,364	-8,743	0,76	8,722
	V _{RB}	24,551	-120,005	24,364	-128,743	0,76	8,737
	V _{RC}	24,553	120,025	24,364	111,257	0,77	8,768
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1219,242	-79,330	1219,228	-89,741	0,00	10,410
	I _{SB}	1219,205	160,672	1219,228	150,259	0,00	10,412
	I _{SC}	1219,205	40,675	1219,228	30,259	0,00	10,416
	I _{RA}	1023,287	-79,316	1023,150	-88,047	0,01	8,732
	I _{RB}	1022,264	160,517	1023,150	151,953	0,09	8,565
	I _{RC}	1028,220	40,650	1023,150	31,953	0,49	8,698
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
V _{SA}	6,300	-0,025	6,303	-10,145	0,05	10,120	
V _{SB}	6,320	-120,004	6,303	-130,145	0,28	10,141	
V _{SC}	6,295	120,021	6,303	109,855	0,12	10,166	
V _{RA}	22,273	-0,007	22,103	-8,913	0,76	8,906	
V _{RB}	22,264	-120,000	22,103	-128,913	0,72	8,913	
V _{RC}	22,270	120,007	22,103	111,087	0,75	8,920	
20%		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1190,961	-79,361	1190,757	-89,496	0,02	10,135
	I _{SB}	1190,836	160,637	1190,757	150,504	0,01	10,133
	I _{SC}	1190,837	40,679	1190,757	30,504	0,01	10,175
	I _{RA}	1044,274	-79,310	1044,171	-88,231	0,01	8,920
	I _{RB}	1043,364	160,556	1044,171	151,769	0,08	8,787
	I _{RC}	1049,221	40,650	1044,171	31,769	0,48	8,881
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	9,307	-0,002	9,238	-9,909	0,74	9,907
	V _{SB}	9,306	-119,998	9,238	-129,909	0,73	9,911
	V _{SC}	9,306	120,002	9,238	110,091	0,74	9,911
	V _{RA}	19,897	-0,006	19,746	-9,092	0,76	9,086
	V _{RB}	19,891	-120,000	19,746	-129,092	0,73	9,093
	V _{RC}	19,895	120,006	19,746	110,908	0,75	9,098
30%							

Tabela 5 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta ABC

Distância da falta	Sinal	(continuação)					
		PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
30%		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1163,318	-79,407	1163,568	-89,262	0,02	9,855
	I _{SB}	1163,076	160,561	1163,568	150,738	0,04	9,823
	I _{SC}	1163,081	40,584	1163,568	30,738	0,04	9,846
	I _{RA}	1066,117	-79,312	1066,067	-88,421	0,00	9,109
	I _{RB}	1065,330	160,576	1066,067	151,579	0,07	8,997
	I _{RC}	1071,021	40,655	1066,067	31,579	0,46	9,076
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	12,134	-0,003	12,042	-9,688	0,76	9,685
	V _{SB}	12,132	-119,998	12,042	-129,688	0,75	9,689
	V _{SC}	12,133	120,003	12,042	110,312	0,76	9,691
	40%	V _{RA}	17,418	-0,006	17,289	-9,280	0,74
V _{RB}		17,413	-119,998	17,289	-129,280	0,71	9,283
V _{RC}		17,416	120,006	17,289	110,720	0,73	9,287
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
I _{SA}		1137,393	-79,321	1137,577	-89,038	0,02	9,718
I _{SB}		1137,015	160,629	1137,577	150,962	0,05	9,667
I _{SC}		1137,032	40,665	1137,577	30,962	0,05	9,704
I _{RA}		1088,876	-79,367	1088,893	-88,618	0,00	9,251
I _{RB}		1088,220	160,541	1088,893	151,382	0,06	9,159
I _{RC}		1093,656	40,607	1088,893	31,382	0,44	9,225
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
V _{SA}		14,835	-0,004	14,723	-9,479	0,75	9,474
V _{SB}	14,831	-119,999	14,723	-129,479	0,73	9,480	
V _{SC}	14,833	120,004	14,723	110,521	0,75	9,483	
50%	V _{RA}	14,835	-0,004	14,723	-9,479	0,75	9,474
	V _{RB}	14,831	-119,999	14,723	-129,479	0,73	9,480
	V _{RC}	14,833	120,004	14,723	110,521	0,75	9,483
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1112,607	-79,333	1112,708	-88,824	0,01	9,491
	I _{SB}	1112,088	160,596	1112,708	151,176	0,06	9,420
	I _{SC}	1112,119	40,647	1112,708	31,176	0,05	9,471
	I _{RA}	1112,607	-79,333	1112,708	-88,824	0,01	9,491
	I _{RB}	1112,088	160,596	1112,708	151,176	0,06	9,420
	I _{RC}	1117,156	40,647	1112,708	31,176	0,40	9,471

Tabela 5 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta ABC

		(continuação)					
Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
60%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	17,418	-0,006	17,289	-9,280	0,74	9,274
	V _{SB}	17,413	-119,998	17,289	-129,280	0,71	9,283
	V _{SC}	17,416	120,006	17,289	110,720	0,73	9,287
	V _{RA}	12,134	-0,003	12,042	-9,688	0,76	9,685
	V _{RB}	12,132	-119,998	12,042	-129,688	0,75	9,689
	V _{RC}	12,133	120,003	12,042	110,312	0,76	9,691
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1088,876	-79,367	1088,893	-88,618	0,00	9,251
	I _{SB}	1088,220	160,541	1088,893	151,382	0,06	9,159
	I _{SC}	1088,262	40,607	1088,893	31,382	0,06	9,225
	I _{RA}	1137,393	-79,321	1137,577	-89,038	0,02	9,718
	I _{RB}	1137,015	160,629	1137,577	150,962	0,05	9,667
	I _{RC}	1141,588	40,665	1137,577	30,962	0,35	9,704
70%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	19,897	-0,006	19,746	-9,092	0,76	9,086
	V _{SB}	19,891	-120,000	19,746	-129,092	0,73	9,093
	V _{SC}	19,895	120,006	19,746	110,908	0,75	9,098
	V _{RA}	9,307	-0,002	9,238	-9,909	0,74	9,907
	V _{RB}	9,306	-119,998	9,238	-129,909	0,73	9,911
	V _{RC}	9,306	120,002	9,238	110,091	0,74	9,911
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1066,117	-79,312	1066,067	-88,421	0,00	9,109
	I _{SB}	1065,330	160,576	1066,067	151,579	0,07	8,997
	I _{SC}	1065,384	40,655	1066,067	31,579	0,06	9,076
	I _{RA}	1163,318	-79,407	1163,568	-89,262	0,02	9,855
	I _{RB}	1163,076	160,561	1163,568	150,738	0,04	9,823
	I _{RC}	1166,988	40,584	1163,568	30,738	0,29	9,846
80%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	V _{SA}	22,273	-0,007	22,103	-8,913	0,76	8,906
	V _{SB}	22,264	-120,000	22,103	-128,913	0,72	8,913
	V _{SC}	22,270	120,007	22,103	111,087	0,75	8,920
	V _{RA}	6,300	-0,025	6,303	-10,145	0,05	10,120
	V _{RB}	6,320	-120,004	6,303	-130,145	0,28	10,141
	V _{RC}	6,295	120,021	6,303	109,855	0,12	10,166

Tabela 5 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta ABC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros		
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
80%	I _{SA}	1044,274	-79,310	1044,171	-88,231	0,01	8,920	
	I _{SB}	1043,364	160,556	1044,171	151,769	0,08	8,787	
	I _{SC}	1043,430	40,650	1044,171	31,769	0,07	8,881	
	I _{RA}	1190,961	-79,361	1190,757	-89,496	0,02	10,135	
	I _{RB}	1190,836	160,637	1190,757	150,504	0,01	10,133	
	I _{RC}	1193,803	40,679	1190,757	30,504	0,26	10,175	
90%		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
	V _{SA}	24,552	-0,020	24,364	-8,743	0,76	8,722	
	V _{SB}	24,551	-120,005	24,364	-128,743	0,76	8,737	
	V _{SC}	24,553	120,025	24,364	111,257	0,77	8,768	
	V _{RA}	3,225	-0,002	3,227	-10,407	0,05	10,405	
	V _{RB}	3,231	-120,001	3,227	-130,407	0,13	10,406	
	V _{RC}	3,234	120,005	3,227	109,593	0,21	10,412	
			Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1023,287	-79,316	1023,150	-88,047	0,01	8,732	
	I _{SB}	1022,264	160,517	1023,150	151,953	0,09	8,565	
	I _{SC}	1022,342	40,650	1023,150	31,953	0,08	8,698	
	I _{RA}	1219,242	-79,330	1219,228	-89,741	0,00	10,410	
I _{RB}	1219,205	160,672	1219,228	150,259	0,00	10,412		
I _{RC}	1220,902	40,675	1219,228	30,259	0,14	10,416		

Fonte: Autoria própria – 2020

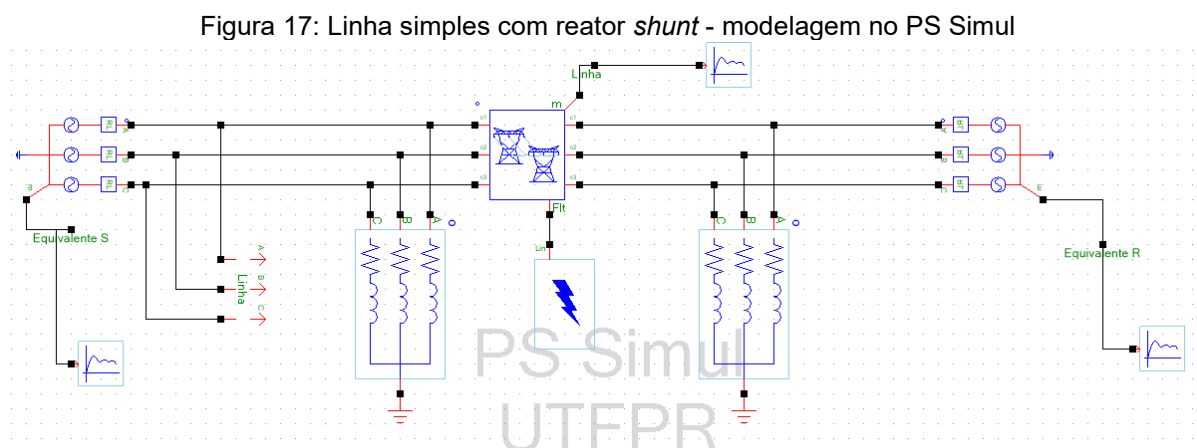
A partir da Tabela 5 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram inferiores a 1%, porém os erros de ângulo ficam em torno de 10°. Este resultado não era esperado já que nos outros tipos de falta os erros eram menores e será preciso uma avaliação minuciosa do motivo deste aumento já que está falta envolve apenas a sequência positiva. Esta análise será feita em trabalhos futuros.

4.2.2 Linha simples, com reator *shunt*

Uma vez que no cenário anterior foram calculadas todas as faltas em pontos diferentes, para este cenário será apresentado apenas o caso de uma falta em 50% da linha. Para a linha de transmissão foi considerado um comprimento de 200 km

com os reatores *shunt* na barra e foram realizados todos os curtos possíveis no programa.

A Figura 17 a seguir retrata a modelagem da linha simples com reator *shunt* no software PS Simul.



Fonte: Autoria própria – 2020

4.2.2.1 Falta monofásica (ϕg)

Abaixo é apresentada a tabela comparativa do curto-circuito monofásico, na qual são evidenciados os resultados das magnitudes e ângulos das tensões e correntes da fase sob defeito.

Tabela 6 - Comparativo do Software com o PS Simul - Falta AG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		Software desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V_{SA}	64,404	-8,175	62,287	-11,316	3,29	3,141
	V_{RA}	64,404	-8,175	62,287	-11,316	3,29	3,141
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I_{SA}	660,780	-78,697	662,271	-79,605	0,23	0,908
	I_{RA}	660,780	-78,697	662,271	-79,605	0,23	0,908

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 6 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram inferiores a 4%, ao passo que os erros de ângulo não superaram 4°. Apesar do aumento do tamanho da linha e do uso dos reatores, os resultados para este tipo de falta também foram satisfatórios.

4.2.2.2 Falta bifásica ($\phi\phi$)Tabela 7 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V _{SB}	80,130	-150,007	79,478	-153,698	0,81	3,691
	V _{SC}	72,135	150,007	73,623	146,339	2,06	3,668
	V _{RB}	80,130	-150,007	79,478	-153,698	0,81	3,691
	V _{RC}	72,135	150,007	73,623	146,339	2,06	3,668
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	726,039	-175,067	746,024	-176,704	2,75	1,637
	I _{SC}	726,205	5,552	704,230	3,656	3,03	1,896
	I _{RB}	726,039	-175,067	746,024	-176,704	2,75	1,637
	I _{RC}	726,882	5,552	704,230	3,656	3,12	1,896

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 7 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram inferiores a 4%, ao passo que os erros de ângulo não superaram 4°. Comparando os erros com o exposto no item 4.2.1.2 que se refere ao mesmo tipo de falta, porém em uma linha curta de 50 km, os erros são maiores, porém aceitáveis. Em comparação com o item anterior, os erros foram os mesmos, mostrando uma consistência nos cálculos.

4.2.2.3 Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)Tabela 8 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BCG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V _{SB}	53,373	-140,376	51,299	-143,851	3,89	3,475
	V _{SC}	55,766	130,820	55,030	125,441	1,32	5,378
	V _{RB}	53,373	-140,376	51,299	-143,851	3,89	3,475
	V _{RC}	55,766	130,820	55,030	125,441	1,32	5,378
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	821,551	167,580	815,568	164,407	0,73	3,174
	I _{SC}	731,721	28,458	714,856	25,897	2,30	2,561
	I _{RB}	821,551	167,580	815,568	164,407	0,73	3,174
	I _{RC}	770,759	28,458	714,856	25,897	7,25	2,561

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 8 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e foram inferiores a 4%, entretanto o erro para a corrente I_{RC} é de pouco mais de 7%, sendo necessário verificações futuras para a natureza deste erro. Ao passo que os erros de ângulo foram próximos a 5° nas tensões da fase C. Os resultados para este tipo de falta também são satisfatórios

4.2.2.4 Falta trifásica (3ϕ)

Tabela 9 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta ABC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros		
		Módulo RMS (kV)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo RMS (kV)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (%)	Ângulo ($^\circ$)	
50%	V_{SA}	44,130	-0,076	43,702	-7,220	0,97	7,143	
	V_{SB}	44,103	-119,974	43,702	-127,220	0,91	7,246	
	V_{SC}	44,174	120,092	43,702	112,780	1,07	7,312	
	V_{RA}	44,130	-0,076	43,702	-7,220	0,97	7,143	
	V_{RB}	44,103	-119,974	43,702	-127,220	0,91	7,246	
	V_{RC}	44,174	120,092	43,702	112,780	1,07	7,312	
			Módulo RMS (A)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo RMS (A)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (%)	Ângulo ($^\circ$)
	I_{SA}	841,857	-79,360	826,559	-86,276	1,82	6,916	
	I_{SB}	840,185	160,273	826,559	153,724	1,62	6,550	
	I_{SC}	839,104	40,597	826,559	33,724	1,50	6,873	
	I_{RA}	841,857	-79,360	826,559	-86,276	1,82	6,916	
	I_{RB}	840,185	160,273	826,559	153,724	1,62	6,550	
I_{RC}	844,449	40,597	826,559	33,724	2,12	6,873		

Fonte: Autoria própria – 2020

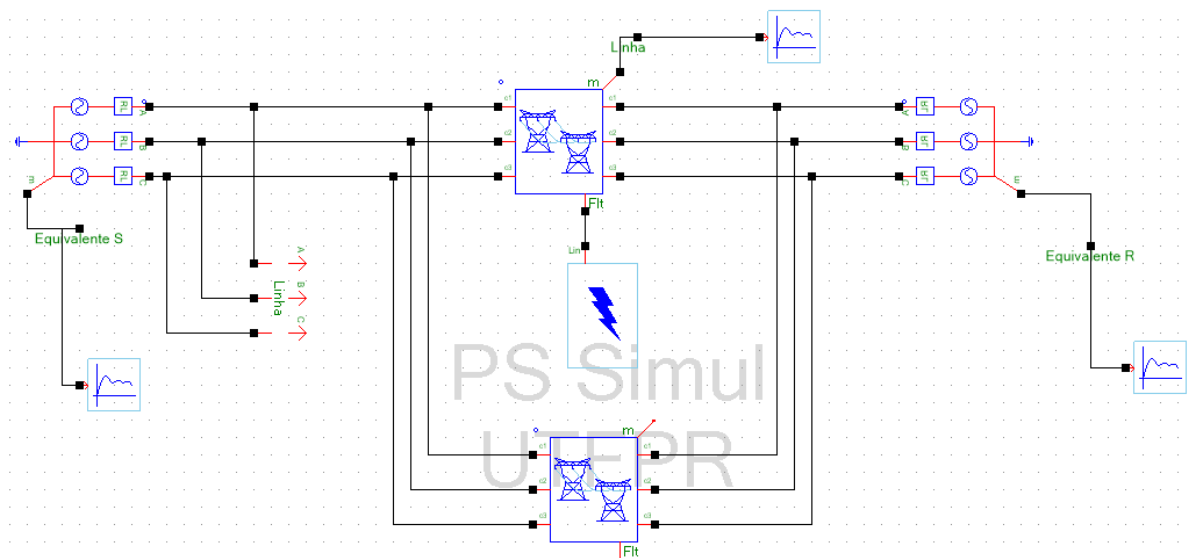
A partir da Tabela 9 verifica-se que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram próximos a 2%, todavia os erros angulares foram próximos a 7° . Tal fato é equivalente ao apresentado no item 4.2.1.4 e a análise será realizada em trabalhos futuros.

4.2.3 Linha paralela, sem reator *shunt*

Para a linha paralela, será apresentado apenas uma falta trifásica em 50% da linha. As linhas consideradas possuem o mesmo comprimento de 50 km e foram aplicados todos os tipos de falta presentes no programa apenas na linha 1, uma vez que não é possível escolher a linha em falta.

A Figura 18 a seguir retrata a modelagem da linha paralela sem reator *shunt* no *software* PS Simul.

Figura 18: Linha paralela sem reator *shunt* - modelagem no PS Simul



Fonte: Autoria própria – 2020

Abaixo são apresentadas as tabelas comparativas dos curtos-circuitos simulados, na qual estão presentes os resultados das magnitudes e ângulos das tensões e correntes.

4.2.3.1 Falta monofásica (ϕg)Tabela 10 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta AG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V _{SA}	25,261	-14,702	24,476	-16,893	3,11	2,191
	V _{RA}	25,261	-14,702	24,476	-16,893	3,11	2,191
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1025,267	-84,967	1030,249	-86,430	0,49	1,463
	I _{RA}	1025,267	-84,967	1030,249	-86,430	0,49	1,463

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 10 observa-se resultados satisfatórios, nos quais o erro do módulo foi inferior a 4% enquanto que o erro angular inferior a 3°. Comparando esses resultados com o mesmo tipo de falta na linha simples sem reator, pode-se concluir que houve um pequeno aumento no erro ao adicionar linhas paralelas.

4.2.3.2 Falta bifásica ($\phi\phi$)Tabela 11 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V _{SB}	70,789	-168,747	69,437	-170,508	1,91	1,761
	V _{SC}	66,642	169,961	65,708	167,972	1,40	1,990
	V _{RB}	70,789	-168,747	69,437	-170,508	1,91	1,761
	V _{RC}	66,642	169,961	65,708	167,972	1,40	1,990
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	963,678	-177,244	968,755	-178,889	0,53	1,645
	I _{SC}	963,445	1,479	958,214	1,134	0,54	0,345
	I _{RB}	963,678	-177,244	968,755	-178,889	0,53	1,645
	I _{RC}	963,802	1,479	958,214	1,134	0,58	0,345

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 11 verifica-se erros dos módulos de tensão e corrente inferiores a 2% enquanto que os erros dos ângulos não ultrapassam 2°. Este resultado é considerado satisfatório.

4.2.3.3 Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)Tabela 12 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BCG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros		
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
50%	V _{SB}	20,039	-154,971	19,235	-157,687	4,01	2,716	
	V _{SC}	22,870	131,736	22,418	127,262	1,98	4,474	
	V _{RB}	20,039	-154,971	19,235	-157,687	4,01	2,716	
	V _{RC}	22,870	131,736	22,418	127,262	1,98	4,474	
			Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	1112,613	158,690	1109,612	155,635	0,27	3,055	
	I _{SC}	1036,640	31,307	1041,286	28,417	0,45	2,890	
	I _{RB}	1112,613	158,690	1109,612	155,635	0,27	3,055	
	I _{RC}	1076,063	31,307	1041,286	28,417	3,23	2,890	

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 12 verifica-se os erros dos módulos de tensão são superiores aos de corrente, porém ambos são considerados satisfatórios. Em comparação ao curto bifásico apresentado anteriormente, houve um acréscimo nos erros, mas ainda assim, satisfatório.

4.2.3.4 Falta trifásica (3ϕ)Tabela 13 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta ABC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros		
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
50%	V _{SA}	14,848	-0,004	14,720	-9,532	0,86	9,527	
	V _{SB}	14,845	-119,998	14,720	-129,532	0,84	9,533	
	V _{SC}	14,847	120,004	14,720	110,468	0,85	9,536	
	V _{RA}	14,848	-0,004	14,720	-9,532	0,86	9,527	
	V _{RB}	14,845	-119,998	14,720	-129,532	0,84	9,533	
	V _{RC}	14,847	120,004	14,720	110,468	0,85	9,536	
			Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	1113,651	-79,333	1112,536	-88,877	0,10	9,544	
	I _{SB}	1113,128	160,596	1112,536	151,123	0,05	9,473	
	I _{SC}	1113,159	40,647	1112,536	31,123	0,06	9,524	
	I _{RA}	1113,651	-79,321	1112,536	-88,877	0,10	9,556	
	I _{RB}	1113,128	160,607	1112,536	151,123	0,05	9,484	
	I _{RC}	1118,240	40,658	1112,536	31,123	0,51	9,535	

Fonte: Autoria própria – 2020

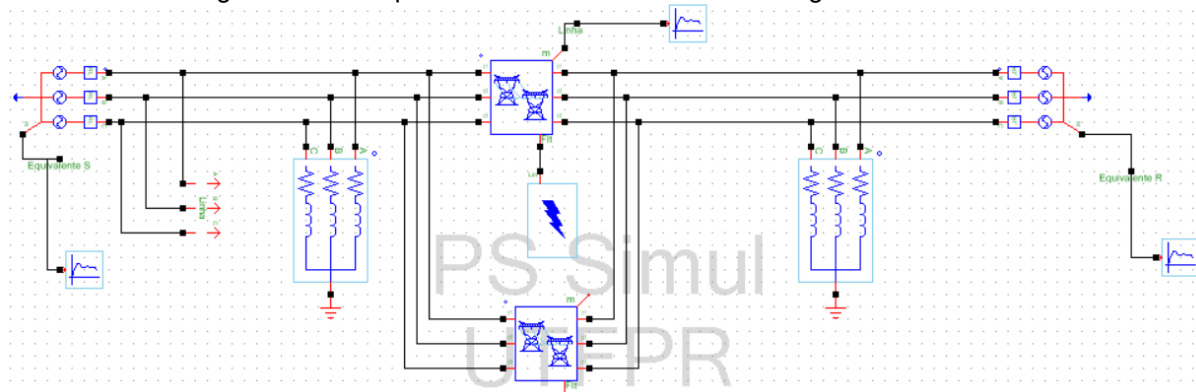
A partir da Tabela 13 é possível verificar que os erros dos módulos da tensão e da corrente foram inferiores a 1%, porém os erros de ângulo ficam em torno de 10°. Ao se comparar com os resultados do curto trifásico apresentado no item 4.2.1.4, observam-se que não houve diferenças significativas entre os erros da linha curta e da linha paralela.

4.2.4 Linha paralela, com reator *shunt*

Esse é o sistema mais completo desenvolvido nesse trabalho, no qual engloba, além dos reatores *shunt*, as linhas paralelas. A seguir serão apresentados os resultados comparativos dos curtos circuitos simulados em 50% da linha. Para esse sistema foi considerado uma linha paralela com 200 km e o reator *shunt* foi inserido nas barras S e R do sistema.

A Figura 19 a seguir retrata a modelagem da linha paralela com reator *shunt* de barra no *software* PS Simul.

Figura 19: Linha paralela com reator *shunt* - modelagem no PS Simul



Fonte: Autoria própria – 2020

4.2.4.1 Falta monofásica (ϕg)Tabela 14 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta AG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V _{SA}	65,611	-8,277	62,086	-12,303	5,37	4,026
	V _{RA}	65,611	-8,277	62,086	-12,303	5,37	4,026
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}	649,428	-78,225	660,240	-80,594	1,66	2,370
	I _{RA}	649,428	-78,225	660,239	-80,594	1,66	2,370

Fonte: Autoria própria – 2020

Observa-se, na Tabela 14, que os erros dos módulos das tensões foram inferiores a 6% enquanto que os erros angulares foram próximos de 4°. Pode-se concluir que os resultados foram, mais uma vez, satisfatórios para esse caso.

4.2.4.2 Falta bifásica ($\phi\phi$)Tabela 15 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V _{SB}	82,399	-150,571	76,340	-154,136	7,35	3,564
	V _{SC}	74,198	150,635	71,660	144,544	3,42	6,091
	V _{RB}	82,399	-150,571	76,340	-154,136	7,35	3,564
	V _{RC}	74,198	150,635	71,660	144,544	3,42	6,091
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	721,574	-173,259	734,797	-177,102	1,83	3,843
	I _{SC}	718,816	3,929	694,686	3,300	3,36	0,629
	I _{RB}	721,574	-173,259	734,797	-177,102	1,83	3,843
	I _{RC}	720,665	3,929	694,686	3,300	3,60	0,629

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 15 é possível verificar um aumento no módulo dos erros das tensões da fase B, porém os demais erros ficaram abaixo de 4%. Este resultado não era esperado, uma vez que em outros tipos de faltas e em outros sistemas os erros eram menores. A análise mais aprofundada dos algoritmos implementados no aplicativo e com a utilização de outros *softwares* comparativos será feita em trabalhos futuros, já que os erros parecem possuir um padrão e possuem valores

maiores nas tensões da fase B, de ambos os relés, e na corrente da fase C, do relé R.

4.2.4.3 Falta bifásica - terra ($\phi\phi g$)

Tabela 16 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta BCG

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros	
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
50%	V _{SB}	54,083	-140,727	50,880	-144,712	5,92	3,985
	V _{SC}	56,826	131,015	55,157	124,459	2,94	6,556
	V _{RB}	54,083	-140,727	50,880	-144,712	5,92	3,985
	V _{RC}	56,826	131,015	55,157	124,459	2,94	6,556
		Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SB}	816,462	168,302	811,580	163,705	0,60	4,597
	I _{SC}	719,794	28,157	716,511	25,182	0,46	2,975
	I _{RB}	816,462	168,302	811,580	163,705	0,60	4,597
	I _{RC}	761,867	28,157	716,511	25,182	5,95	2,975

Fonte: Autoria própria – 2020

Observa-se na Tabela 16 que os erros dos módulos da tensão e corrente foram inferiores a 6%. Ao comparar esses resultados com os da falta bifásica apresentada anteriormente, verifica-se uma diminuição no módulo dos erros. Esses resultados são considerados satisfatórios.

4.2.4.4 Falta trifásica (3 ϕ)

Tabela 17 - Comparativo do *software* com o PS Simul - Falta ABC

Distância da falta	Sinal	PS Simul		<i>Software</i> desenvolvido		Erros		
		Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo RMS (kV)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)	
50%	V _{SA}	44,630	-0,066	43,636	-7,850	2,23	7,784	
	V _{SB}	44,624	-120,018	43,636	-127,850	2,21	7,832	
	V _{SC}	44,629	120,081	43,636	112,150	2,23	7,930	
	V _{RA}	44,630	-0,066	43,636	-7,850	2,23	7,784	
	V _{RB}	44,624	-120,018	43,636	-127,850	2,21	7,832	
	V _{RC}	44,629	120,081	43,636	112,150	2,23	7,930	
			Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo RMS (A)	Ângulo (°)	Módulo (%)	Ângulo (°)
	I _{SA}		834,997	-79,203	825,307	-86,906	1,16	7,703
	I _{SB}		833,311	160,463	825,307	153,094	0,96	7,369
	I _{SC}		832,008	40,814	825,307	33,094	0,81	7,720
	I _{RA}		834,997	-79,203	825,307	-86,906	1,16	7,703
	I _{RB}		833,311	160,463	825,307	153,094	0,96	7,369
	I _{RC}		837,826	40,814	825,307	33,094	1,49	7,720

Fonte: Autoria própria – 2020

A partir da Tabela 17 verifica-se que os erros dos módulos das tensões e correntes foram inferiores a 3%, porém os erros dos ângulos ficam em torno de 8°. A partir dos resultados apresentados no trabalho, é possível observar que na falta trifásica, há um erro angular superior aos outros tipos de falta. Foram realizadas diversas verificações, porém será necessária uma avaliação minuciosa do motivo deste aumento e a comparação com outros programas já consolidados no mercado.

4.3 GRÁFICOS DE SAÍDA DO APLICATIVO

A seguir serão apresentados os gráficos de saída do aplicativo desenvolvido. Para cada IED selecionado pelo usuário, conforme discutido anteriormente, os gráficos apresentados representam os principais parâmetros para a configuração desse IED, além disso, os parâmetros são apresentados de acordo com o tipo de falta, para facilitar a utilização do aplicativo para o usuário, exibindo apenas as informações relevantes para sua aplicação.

O sistema utilizado será uma linha paralela de 200 km com reator *shunt* na barra e aplicação de uma falta monofásica, já que está apresentada todas as componentes de sequência (positiva, negativa e zero).

Nos itens a seguir serão discutidos os gráficos gerados pelo aplicativo, de acordo com o tipo de relé e o tipo de falta, que no caso é uma falta monofásica.

4.3.1 Relé SEL – 311L

Para o tipo de falta proposto, serão apresentados uma série de 7 gráficos orientados ao ajuste da função direcional. Uma vez que o relé SEL-311L permite a polarização do elemento direcional tanto por sequência negativa quanto por sequência zero. Pode-se dividir estes gráficos em dois grupos, sendo os 4 primeiros relacionados a parametrização quando polarizado por sequência negativa e os 3 seguintes quando polarizado por sequência zero. No caso da primeira polarização o aplicativo gera 4 gráficos e no caso da segunda polarização, os 7 gráficos são necessários.

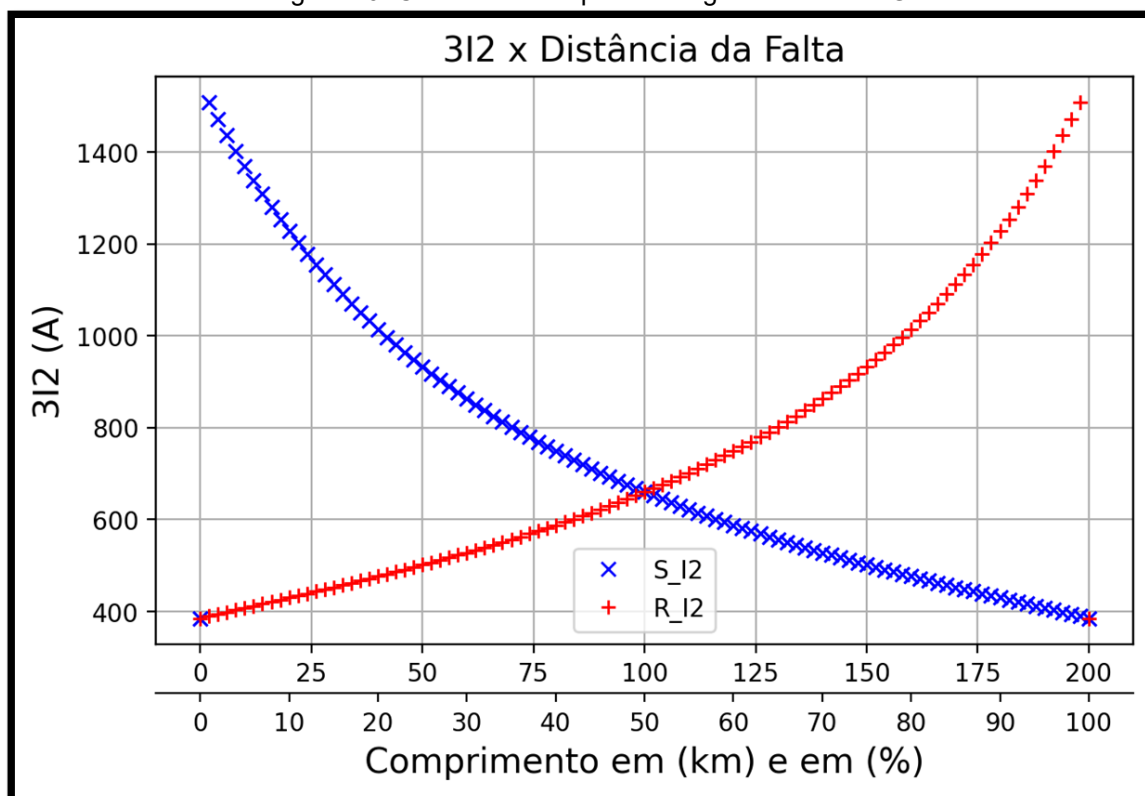
O SEL-311L possui 6 ajustes para o elemento direcional de sequência negativa, dos quais serão possíveis se obter uma base para seus ajustes a partir dos gráficos apresentados pelo programa. São eles:

- *50QFP: Menor valor de 3I2 para determinação de falta a frente.*
- *50QRP: Menor valor de 3I2 para determinação de falta atrás.*
- *a2: Fator de restrição da determinação de direção em função da razão $|I2| / |I1|$.*
- *k2: Fator de restrição da determinação de direção em função da razão $|I2| / |I0|$.*
- *Z2F: Limiar para determinação de uma falta a frente.*
- *Z2R: Limiar para determinação de uma falta atrás.*

A Figura 20 apresenta a magnitude da corrente de sequência negativa à medida que a falta monofásica é excursionada ao longo da linha. A partir desta imagem é possível extrair uma base para os dois primeiros ajustes (50QFP e 50QRP) de forma a garantir que a menor corrente de sequência negativa ajustada seja capaz de liberar a determinação da direção de faltas ao longo de toda a

extensão da linha ao mesmo tempo que não seja tão sensível em condições de baixa componente de sequência negativa, na qual a determinação da direção se torna menos confiável.

Figura 20: Corrente de sequência negativa – Falta AG

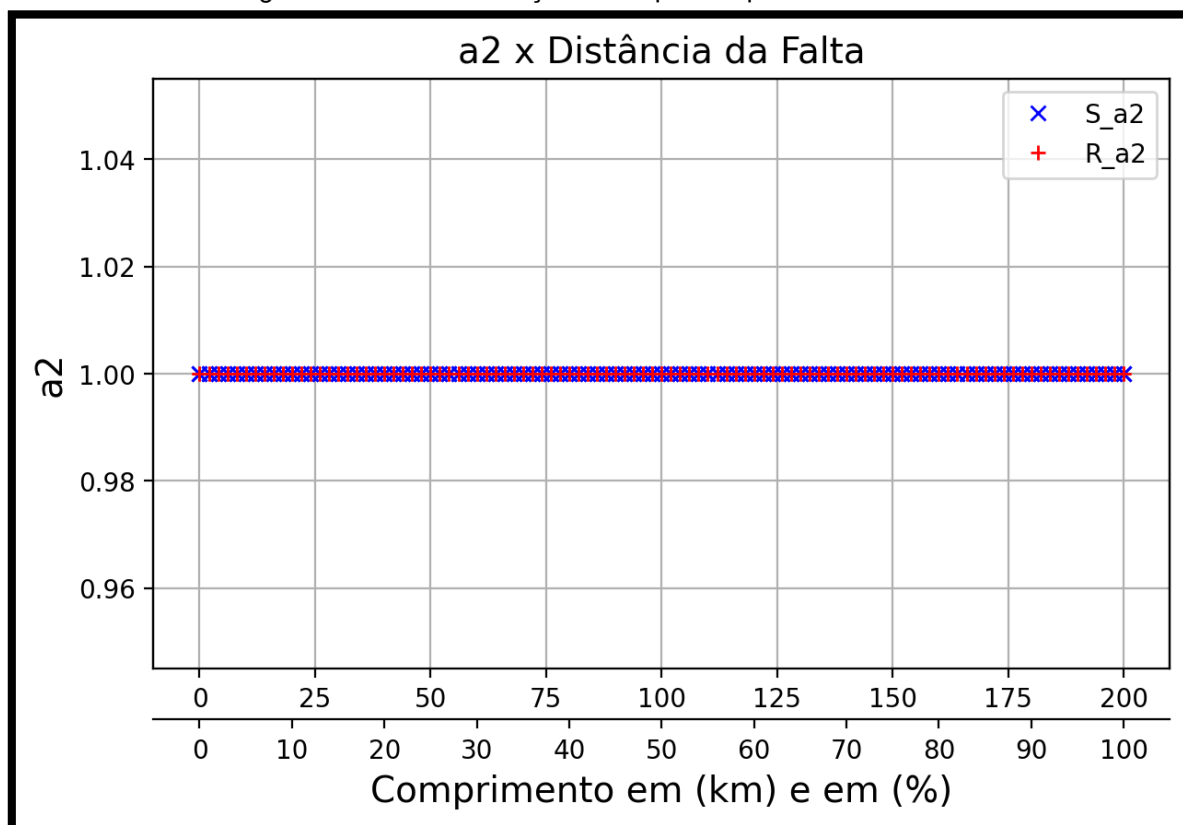


Fonte: Autoria própria – 2020

A Figura 21 traz o comportamento da razão entre a corrente de sequência negativa pela positiva.

A apresentação dos valores dos gráficos de saída referentes a tensão e corrente são de acordo com o tipo de entrada do usuário, valores primários, secundários e pu.

Figura 21: Fator de restrição de sequência positiva – Falta AG

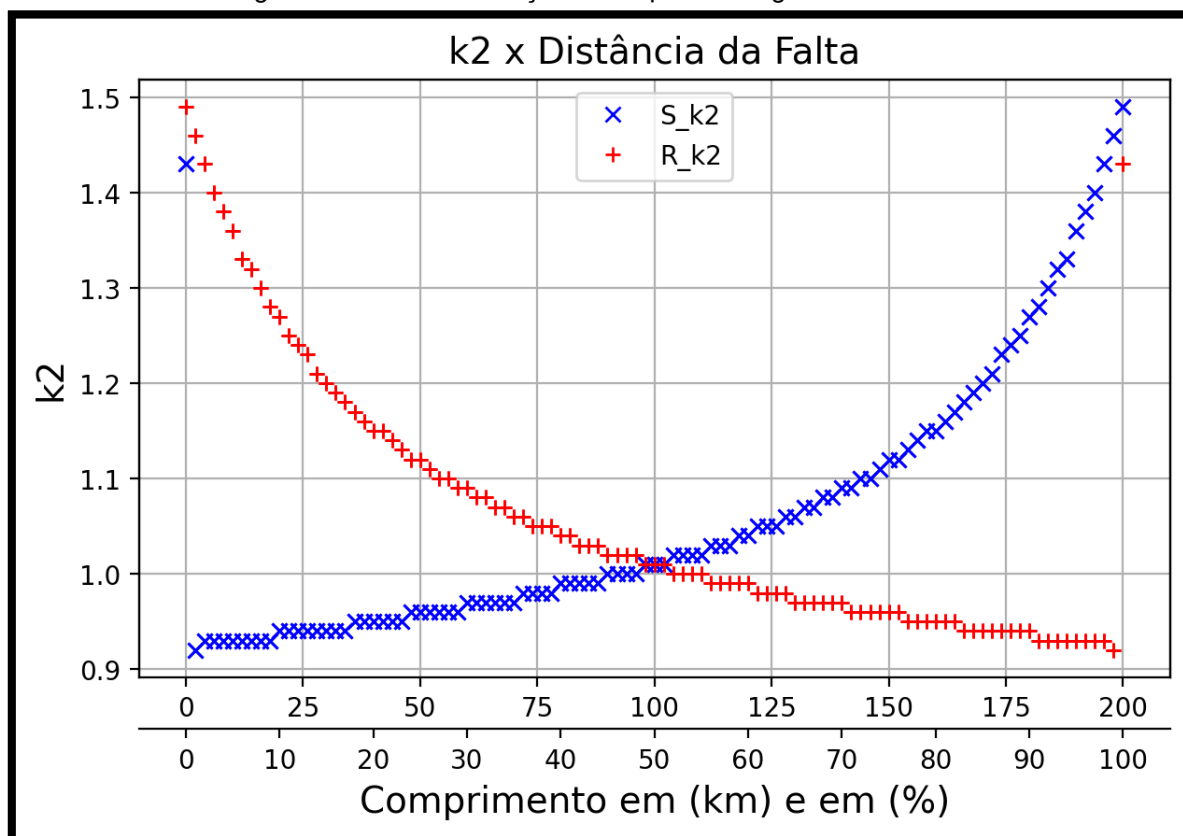


Fonte: Autoria própria – 2020

O SEL-311L possui um ajuste de segurança que restringe a operação de elementos polarizados por sequência negativa caso a razão $|I_2| / |I_1|$ seja menor que o parâmetro a_2 definido pelo usuário.

Na Figura 22 tem-se a razão entre a corrente de sequência negativa e a corrente de sequência zero para faltas ao longo da linha.

Figura 22: Fator de restrição de sequência negativa – Falta AG

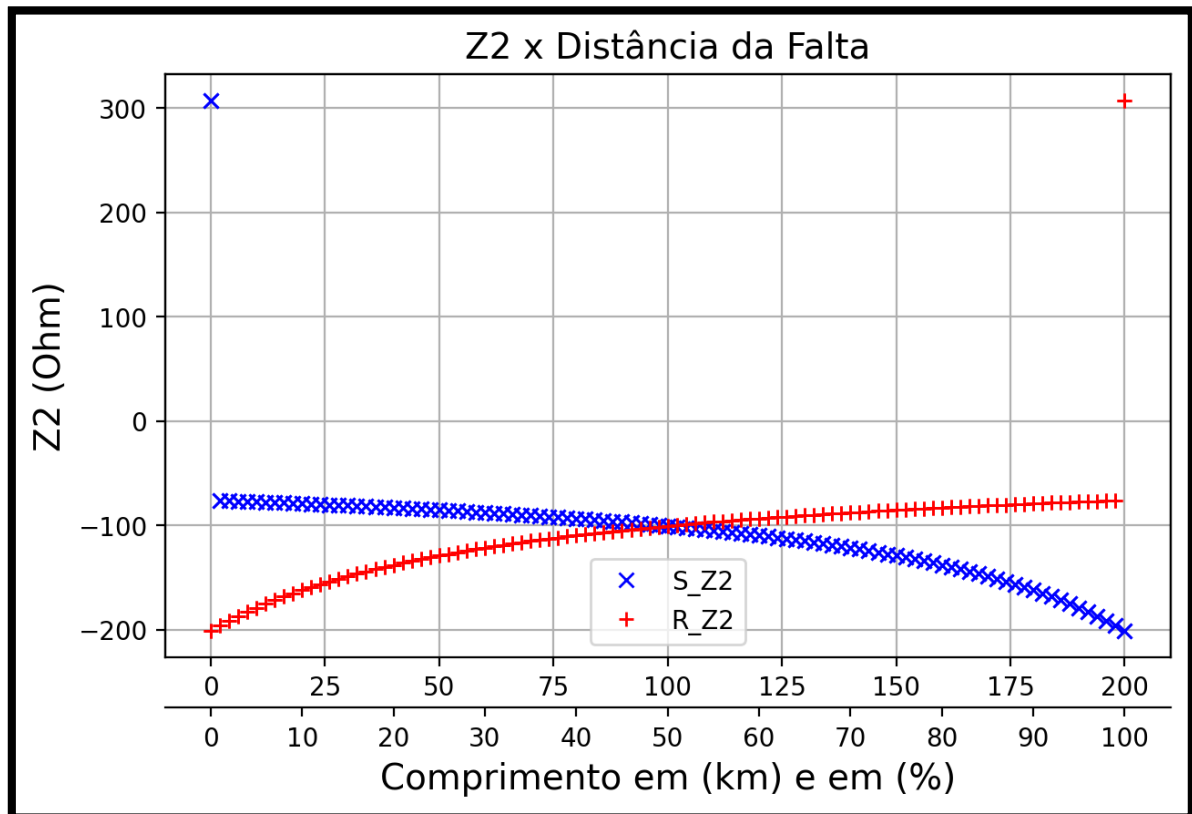


Fonte: Autoria própria – 2020

De modo semelhante ao parâmetro a_2 que restringe a operação caso a razão da corrente de sequência negativa pela corrente de sequência positiva seja menor que o ajuste a_2 , o parâmetro k_2 restringe a operação caso a razão $|I_2| / |I_0|$ seja menor do que o ajuste k_2 selecionado.

Na Figura 23 é apresentado a impedância de sequência negativa calculada conforme informado pelo manual do fabricante na equação (4.3.1), a qual o resultado em geral se assemelha muito a simples divisão de V_2 por I_2 para os casos testados.

Figura 23: Impedância de sequência negativa – Falta AG



Fonte: Autoria própria – 2020

Diferente da maior parte dos fabricantes no mercado que utiliza a diferença entre o ângulo da corrente e tensão de sequência negativa, a SEL compara o valor da impedância de sequência negativa com um parâmetro ajustado ($Z2F$ e $Z2R$) para determinação da direção da falta.

Esta impedância é calculada pelo SEL da seguinte forma:

$$Z2 = \frac{\text{Re}[V_2 \cdot (I_2 \cdot 1\angle Z1L)^*]}{|I_2|^2} \quad (4.3.1)$$

Onde:

V_2 → Tensão de sequência negativa

I_2 → Corrente de sequência negativa

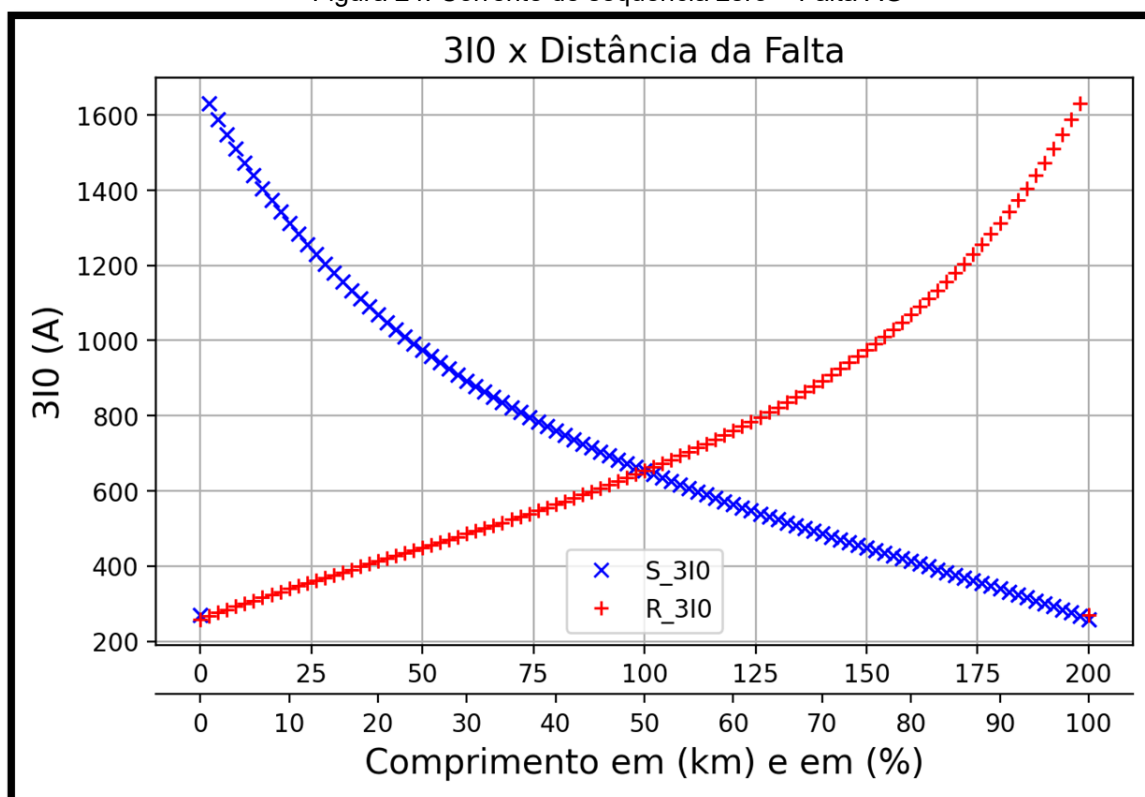
$1\angle Z1L$ → Um com ângulo da sequência positiva da linha

Os parâmetros presentes no SEL-311L para polarização do elemento direcional de neutro são análogos aos vistos anteriormente para sequência negativa, ao todo são 5 ajustes. Sendo eles:

- *50GFP: Menor valor de $3I_0$ para determinação de falta a frente.*
- *50GRP: Menor valor de $3I_0$ para determinação de falta atrás.*
- *a_0 : Fator de restrição da determinação de direção em função da razão $|I_0| / |I_1|$.*
- *Z0F: Limiar para determinação de uma falta a frente.*
- *Z0R: Limiar para determinação de uma falta atrás.*

Na Figura 24 é apresentada a magnitude da corrente de neutro para faltas monofásicas ao longo da linha, pela qual é possível estimar os ajustes para dos parâmetros 50GFP e 50GRP, a partir do qual são liberados a determinação de faltas a frente e atrás, respectivamente.

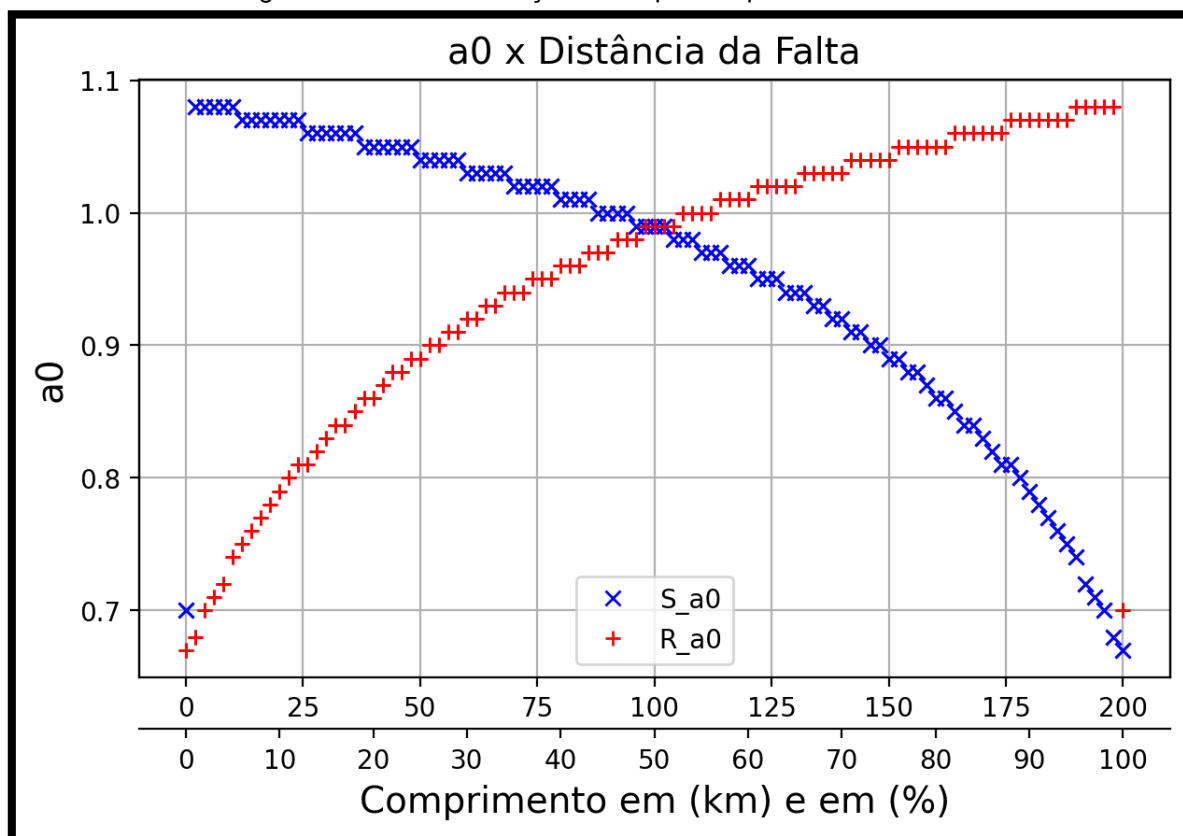
Figura 24: Corrente de sequência zero – Falta AG



Fonte: Autoria própria – 2020

É apresentado na Figura 25 a razão entre a componente de corrente de sequência zero e positiva.

Figura 25: Fator de restrição de sequência positiva – Falta AG

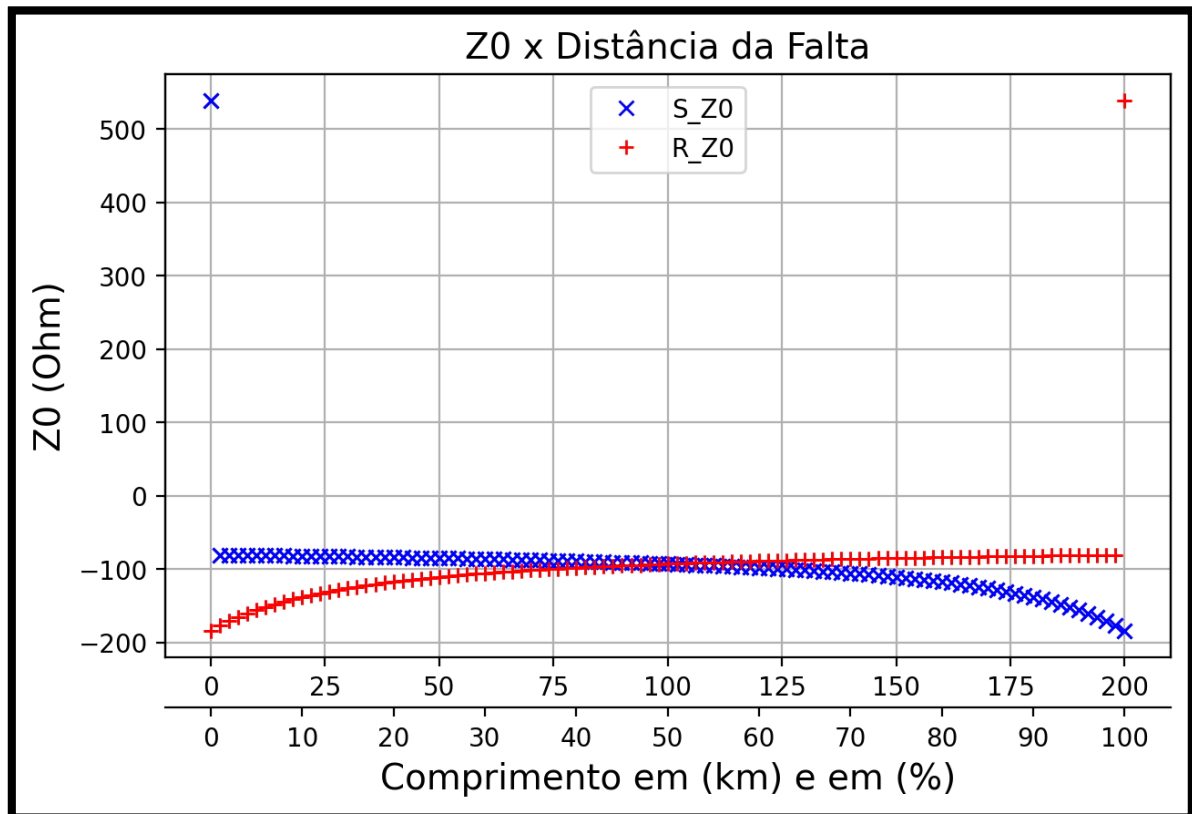


Fonte: Autoria própria – 2020

O ajuste a_0 impede a liberação do elemento direcional caso a razão $|I_0| / |I_1|$ seja menor que o valor definido em a_0 .

Tem-se na Figura 26 os valores de impedância de sequência zero calculados pela equação (4.3.2) para faltas monofásicas em toda a extensão da linha.

Figura 26: Impedância de sequência zero



Fonte: Autoria própria – 2020

Para determinação da direção da falta pela polarização por sequência zero, é comparada impedância de sequência zero com os ajustes Z0F e Z0R.

Esta impedância é calculada pelo SEL da seguinte forma:

$$Z_0 = \frac{\text{Re}[3V_0 \cdot (3I_0 \cdot 1\angle Z0L)^*]}{|3I_0|^2} \quad (4.3.2)$$

Onde:

V_0 → Tensão de sequência zero

I_0 → Corrente de sequência zero

$1\angle Z0L$ → Um com ângulo da sequência zero da linha

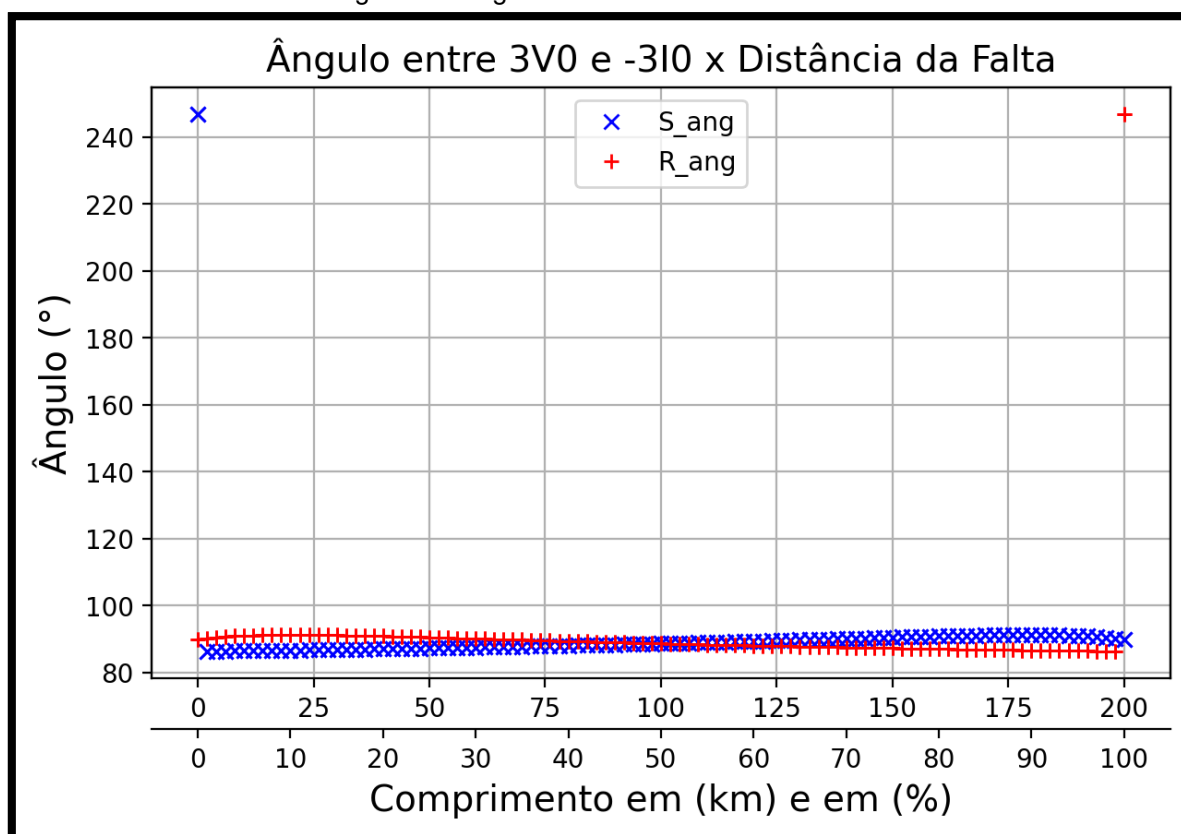
Cabe ressaltar que todos esses gráficos são apresentados apenas para as faltas AG. Caso fosse selecionado outro tipo de falta, por exemplo uma falta bifásica, não seriam apresentados ao usuário os gráficos das componentes de sequência zero.

4.3.2 Relé GE D90 Plus ou Siemens 7SJ62

Os modelos de IEDs da GE e Siemens tratados aqui utilizam a mesma filosofia para determinação da direção da falta, em ambos é analisada a diferença de ângulo entre a corrente e a tensão de sequência negativa ou zero, apesar da forma como as regiões (ângulos) em que a falta é considerada como sendo a frente ou atrás sejam informadas de modo diferente ao relés, a maneira como é feita a comparação dos ângulos medidos com as regiões ajustadas é semelhante, portando, ambos serão tratados neste item.

Para determinação da direção por polarização de sequência zero é utilizado a diferença de ângulo entre a tensão de sequência zero e a corrente de sequência zero rotacionada de 180° , conforme apresentado na Figura 27. Cabe ressaltar que a tensão de referência utilizada pelo IED não necessariamente estará em fase com a tensão de sequência zero, pois é possível definir nos ajustes uma inclinação adicional entre eles.

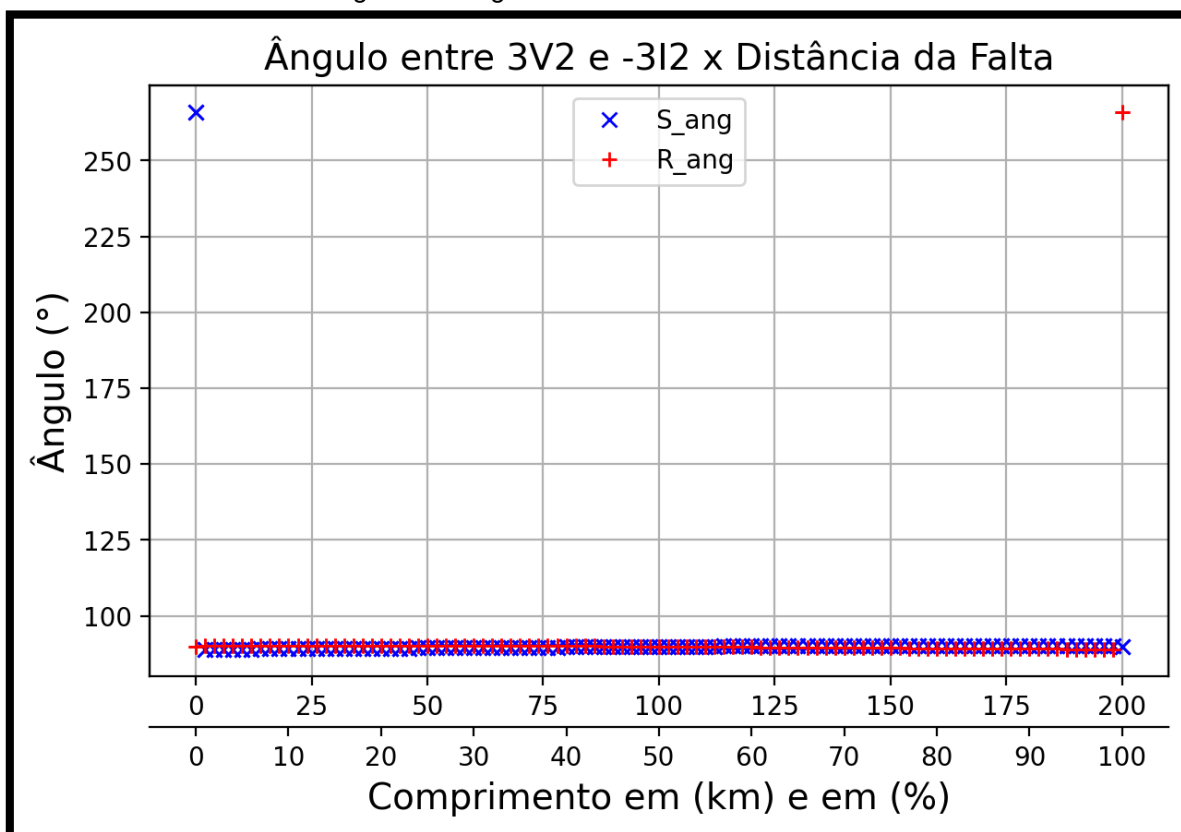
Figura 27: Ângulo entre $3V_0$ e $-3I_0$ – Falta AG



Fonte: Autoria própria – 2020

Na Figura 28 tem-se a diferença entre o ângulo da tensão de sequência negativa e a corrente de sequência negativa rotacionada de 180° de modo análogo a forma como é feito para a polarização por sequência zero.

Figura 28: Ângulo entre 3V2 e -3I2 – Falta AG



Fonte: Autoria própria – 2020

Vale salientar que os gráficos de sequência zero serão apresentados apenas para as faltas que envolvem a terra, como a monofásica e a bifásica terra. No caso de uma falta bifásica, são evidenciados os gráficos de sequência negativa e no caso da falta trifásica, é apresentado o elemento em quadratura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo é destinado as considerações finais sobre o exposto nos capítulos anteriores, além da sugestão de trabalhos futuros que possam ser construídos a partir deste.

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal motivação a ampliação de uma ferramenta para auxiliar os estudantes e profissionais da área de proteção na parametrização dos elementos dos relés de proteção, a partir da apresentação dos dados específicos de três modelos de relé.

A partir do aprimoramento do aplicativo agora é possível mais versatilidade para o usuário no sentido de ampliação dos tipos de faltas que podem ser realizadas, além da possibilidade da inserção de reatores *shunt* e de linhas paralelas. Além disso as informações de saída do *software* são mais personalizadas, apresentando os dados relevantes não só para o tipo de relé, mas também a partir do tipo de falta aplicada no sistema.

Também foi possível, a partir desse trabalho, obter a confirmação da veracidade dos resultados do aplicativo desenvolvido. Conforme discutido no capítulo 4, foi possível observar, comparando com um *software* já consolidado no mercado, que os resultados são satisfatórios e apresentam erros aceitáveis em relação ao programa tomado como base, com exceção para os ângulos no caso de uma falta trifásica, que precisam ser melhor analisados e verificado o motivo da diferença encontrada.

Durante os testes da aplicação, foi possível verificar a diferença de parâmetro relevante para cada tipo de relé e como há maneiras distintas de se chegar a mesma conclusão. Isso torna essa aplicação ainda mais relevante, pois com ela é possível se obter os dados necessários para calcular os parâmetros dos diversos IEDs presentes no mercado.

Por fim, todos os objetivos desse trabalho foram concluídos com sucesso, dando ainda mais credibilidade para a aplicação tendo uma comparação de resultados com um *software* consolidado no mercado e ampliando as opções de configuração do sistema e tipos de falta para o usuário.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento dessa aplicação foi possível verificar o potencial de crescimento que esse trabalho possui, dessa maneira são listadas abaixo algumas sugestões para o aprimoramento do presente trabalho:

- Interface gráfica para facilitar a interação com o usuário;
- Adicionar mais funções de proteção;
- Inclusão de novos relés de proteção;
- Inclusão de novos equipamentos, tais como transformadores;
- Inclusão de novos arranjos no sistema, como por exemplo fazer um sistema com três barras;
- Inclusão de linhas paralelas com indutâncias mútuas;

REFERÊNCIA

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL**, 2019. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/home?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2F&_101_assetEntryId=14476909&_101_type=content&_101_groupId=654800&_101_urlTitle=faq. Acesso em: 21 Abril 2019.

CONPROVE. A primeira ferramenta desenvolvida no Brasil para simulação de transitórios eletromagnéticos. Por que migrar para o PS Simul? **CONPROVE Engenharia**, 20 Setembro 2020. Disponível em: https://conprove.com/wp-content/uploads/2020/04/PS_SIMUL_Por_que_migrar_para_o_PS_Simul_V1.pdf. Acesso em: 20 Setembro 2020.

CONPROVE. CONPROVE Engenharia. **CONPROVE Engenharia**, 20 Setembro 2020. Disponível em: <https://conprove.com/produto/08-ps-simul-software-para-modelagem-do-sistema-de-potencia-e-simulacao-de-transitorios-eletromagneticos/>. Acesso em: 20 Setembro 2020.

FUCHS, R. D. **TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: Linhas aéreas**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 1977.

GLOVER, J. D.; OVERBYE, T. J.; SARMA, M. S. **Power System: Analysis & Design**. 6. ed. [S.l.]: Cengage, 2015.

HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power Systems Protection**. [S.l.]: Elsevier, 2004.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. Florianópolis: UFSC, v. 1, 1999.

KINDERMANN, G. **Curto Circuito**. Florianópolis.: UFSC, 2010.

ONS. ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, 2019. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 21 abr. 2019.

APÊNDICE A – CASO PARTICULAR DE LINHAS PARALELAS IGUAIS

Com ambas as linhas em paralelo possuindo seus parâmetros elétricos distintos, a matriz de quadripolos conforme obtido em (2.2.22), tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2} & \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} \\ C_1 + C_2 + \frac{(A_1 - A_2)(D_2 - D_1)}{B_1 + B_2} & \frac{B_2 D_1 + B_1 D_2}{B_1 + B_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R^T \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Já para o caso de duas linhas iguais, pode-se reescrever seus parâmetros ao realizar as seguintes substituições:

$$A = A_1 = A_2; B = B_1 = B_2; C = C_1 = C_2; D = D_1 = D_2 \quad (\text{A.2})$$

As quais resultaram na matriz de quadripolos para linhas paralelas iguais apresentada em (A.3).

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \frac{B}{2} \\ 2C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R^T \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$