

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA

ELVIO DA SILVA
PAULO CESAR MENDES

**DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA APLICATIVO DE APOIO À
CONFIGURAÇÃO DA FUNÇÃO DIRECIONAL DE
SOBRECORRENTE EM RELÉS DE PROTEÇÃO DIGITAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

ELVIO DA SILVA
PAULO CESAR MENDES

**DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA APLICATIVO DE APOIO À
CONFIGURAÇÃO DA FUNÇÃO DIRECIONAL DE
SOBRECORRENTE EM RELÉS DE PROTEÇÃO DIGITAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de TCC2 do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Gustavo Silveira
Magrin

CURITIBA

2019

Elvio da Silva
Paulo Cesar Mendes

Desenvolvimento de programa aplicativo de apoio à configuração da função direcional de sobrecorrente em relés de proteção digitais

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, 28 de fevereiro de 2019.

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

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Ma
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

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ulisses Chemin Netto, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

DA SILVA, Elvio MENDES, Paulo C. DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA APLICATIVO DE APOIO À CONFIGURAÇÃO DA FUNÇÃO DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE EM RELÉS DE PROTEÇÃO DIGITAIS. 84 f. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Elétrica - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

As ferramentas e procedimentos de configuração para uma dada função de proteção são diferentes para cada fabricante de relé de proteção existente no mercado e, algumas vezes, são diferentes, até mesmo, para um determinado fabricante. Esta falta de uniformidade causa dificuldades no entendimento do funcionamento da função de proteção desejada e em sua configuração. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta computacional de apoio à configuração da função de proteção direcional de sobrecorrente. Para isto, foram analisados as formas de detecção da direcionalidade de três fabricantes de relés e foram identificadas as principais variáveis envolvidas. A ferramenta foi desenvolvida na linguagem Python, utilizando a teoria de quadripolos aplicada à solução de sistemas trifásicos sob falta. A ferramenta pode contemplar casos de curto-circuito sem corrente de carga, com corrente de carga ou até mesmo sistemas desequilibrados. O aplicativo simula faltas ao longo de uma linha de transmissão que interliga duas fontes equivalentes de Thévenin e também faltas reversas aos relés de suas extremidades. Após a aplicação das faltas, o programa gera uma série de gráficos, relacionando as variáveis de interesse de cada relé com o comprimento da linha. A falta reversa de cada relé também é mostrada no mesmo gráfico, dando um ideia global de todas as faltas. A partir da observação do comportamento da falta, através dos gráficos gerados, o usuário tem condições de definir o ajuste da função direcional de sobrecorrente. O software não propõe ajustes para a função, mas ajuda o usuário a entender o comportamento de cada variável de interesse do relé para as faltas, dando uma visão gráfica de qual seria o ajuste. Os resultados apresentados neste trabalho limitam-se ao estudo da função direcional de sobrecorrente para uma falta fase-terra em uma linha de transmissão. Porém, a partir dos conceitos aqui apresentados, é possível a expansão para outros tipos de falta e ampliação do sistema. Pode-se concluir que a ferramenta, aqui apresentada, pode ajudar a melhorar o entendimento da função direcional de sobrecorrente tanto no âmbito da sala de aula quanto para profissionais de proteção do setor elétrico.

Palavras-chave: *Software* de suporte. Direcional de sobrecorrente. Python. Quadripolos.

ABSTRACT

DA SILVA, Elvio MENDES, Paulo C. DEVELOPMENT OF APPLICATION PROGRAM TO SUPPORT THE CONFIGURATION OF THE OVERCURRENT DIRECTIONAL FUNCTION IN DIGITAL PROTECTION RELAYS. 84 f. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Elétrica - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The configuration tools and procedures for a given protection function are different for each protection relay manufacturer available and sometimes even different for a particular manufacturer. This lack of uniformity causes difficulties in understanding the operation of the desired protection function and how to set them. In this way, the objective of this study was to develop a computational tool that support the configuration of the directional overcurrent protection function. For this, the behavior of three relay of different manufacturers were analyzed and the main variables involved were identified. The tool was developed based on Python language, using the quadrupole theory applied to the solution of missing three-phase systems. The tool can contemplate cases of short circuit without load current, with load current or even unbalanced systems. The application simulates faults along a transmission line that interconnects two equivalent sources of Thévenin and also reverse faults to the relays at its ends. After applying the faults, the program generates a series of graphs, relating the variables of interest of each relay to the length of the line. The reverse fault of each relay is also shown on the same graph, giving an overall idea of all faults. From the observation of the behavior of the fault, through the generated graphs, the user can define the adjustment of the directional function of the overcurrent. The software does not propose adjustments to the function, but it helps the user to understand the pattern of each variable of interest of the relay for the faults, providing a graphical vision of what the adjustment could be. The results presented in this paper are limited to the study of directional overcurrent function for a phase-to-ground fault on a transmission line. However, with the concepts presented here, it is possible expand to other types of problems and increase the size of the system. It can be concluded that the tool presented here could help improve the understanding of directional overcurrent function both within the classroom and for protection professionals in the electricity sector.

Keywords: Support software. Directional overcurrent. Python. Quadrupole.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Exemplo de uso da proteção direcional de sobrecorrente.	15
FIGURA 2	– Exemplo de direcional por Tensão-Corrente.	16
FIGURA 3	– Diagrama parcial típico de fiação do relé GE D90Plus.	20
FIGURA 4	– Polarização direcional da fase A.	21
FIGURA 5	– Configuração de ajustes do elemento direcional de sobrecorrente do relé GE D90Plus.	22
FIGURA 6	– Esquema lógico do elemento direcional de sobrecorrente de fase 1.	24
FIGURA 7	– Característica do direcional de neutro para polarização por tensão.	26
FIGURA 8	– Configuração de ajustes do direcional de sobrecorrente de neutro.	27
FIGURA 9	– Esquema lógico do elemento direcional de sobrecorrente de neutro 1.	29
FIGURA 10	– Característica do direcional de neutro para polarização por tensão.	31
FIGURA 11	– Configuração de ajustes do direcional de sobrecorrente de sequência negativa.	31
FIGURA 12	– Esquema lógico do elemento direcional de sobrecorrente de sequência negativa.	32
FIGURA 13	– Diagrama parcial de uma ligação possível do relé SIEMENS 7SJ62.	33
FIGURA 14	– Falta Fase-Terra (A-N).	36
FIGURA 15	– Falta Fase-Fase (B-C).	37
FIGURA 16	– Tela de configuração programador DIGSI.	38
FIGURA 17	– Rotação da tensão de referência, elemento direcional de fase.	39
FIGURA 18	– Característica para frente da função direcional, elemento direcional de fase.	39
FIGURA 19	– Rotação de tensão de referência, elemento direcional de terra com valores de sequência zero.	40
FIGURA 20	– Rotação da tensão de referência, elemento direcional de falta de terra com valores de sequência negativa.	41
FIGURA 21	– Entradas e saídas do relé SEL-311L.	42
FIGURA 22	– Primeira etapa da lógica de ativação do elemento direcional de sequência negativa polarizado por tensão.	44
FIGURA 23	– Segunda parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência negativa.	46
FIGURA 24	– Segunda parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência negativa para faltas envolvendo a terra.	46
FIGURA 25	– Plano Z2 com os limites de impedância de sequência negativa para faltas à frente e reversas.	47
FIGURA 26	– Primeira parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência zero.	48
FIGURA 27	– Segunda parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência zero.	49
FIGURA 28	– Representação genérica de um quadripolo com associação aos parâmetros de transmissão.	52
FIGURA 29	– Associação de quadripolos em cascata.	53
FIGURA 30	– Representação genérica de um quadripolo trifásico com associação aos	

	parâmetros de transmissão.	54
FIGURA 31	– Entrada de valores.	58
FIGURA 32	– Exemplo de sistema para entrada de dados no ambiente <i>Python</i>	58
FIGURA 33	– Falta atrás do relé S, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.	61
FIGURA 34	– Falta à frente do relé S, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.	62
FIGURA 35	– Falta ao longo da linha, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.	63
FIGURA 36	– Falta em 100% da linha para o relé S, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.	64
FIGURA 37	– Falta atrás relé R, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.	65
FIGURA 38	– Sistema para estudo de caso.	66
FIGURA 39	– Entrada de dados.	66
FIGURA 40	– Gráfico de $3I_2$ por distância no relé SEL-311L.	68
FIGURA 41	– Gráfico de a_2 por distância no relé SEL-311L.	69
FIGURA 42	– Gráfico de k_2 por distância no relé SEL-311L.	70
FIGURA 43	– Gráfico de Z_2 por distância no relé SEL-311L.	70
FIGURA 44	– Gráfico de $3I_0$ por distância no relé SEL-311L.	71
FIGURA 45	– Gráfico de a_0 por distância no relé SEL-311L.	72
FIGURA 46	– Gráfico de Z_0 por distância no relé SEL-311L.	72
FIGURA 47	– Gráfico da corrente I_a por distância no relé GE D90Plus.	73
FIGURA 48	– Gráfico da tensão V_{bc} por distância no relé GE D90Plus.	74
FIGURA 49	– Gráfico do ângulo entre I_a e V_{bc} por distância no relé GE D90Plus.	74
FIGURA 50	– Gráfico do ângulo entre $3I_0$ e $-3V_0$ por distância no relé GE D90Plus.	75
FIGURA 51	– Gráfico do ângulo entre I_2 e $-V_2$ por distância no relé GE D90Plus.	76
FIGURA 52	– Gráfico da corrente I_a por distância no relé SIEMENS 7SJ62.	77
FIGURA 53	– Gráfico da tensão V_{bc} por distância no relé SIEMENS 7SJ62.	77
FIGURA 54	– Gráfico do ângulo entre I_a e V_{bc} por distância no relé SIEMENS 7SJ62.	78
FIGURA 55	– Gráfico do ângulo entre $-3I_0$ e $3V_0$ por distância no relé SIEMENS 7SJ62.	78
FIGURA 56	– Gráfico do ângulo entre $-3I_2$ e $3V_2$ por distância no relé SIEMENS 7SJ62.	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Sinais de operação e de polarização.	22
TABELA 2	– Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional do relé GE D90Plus.	23
TABELA 3	– Configuração de fasores para 3I0 calculada.	25
TABELA 4	– Configuração de fasores para IG medida.	25
TABELA 5	– Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional de sobrecorrente de neutro do relé GE D90Plus.	27
TABELA 6	– Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional de sobrecorrente de neutro do relé GE D90Plus.	28
TABELA 7	– Unidade direcional de sobrecorrente de sequência negativa.	30
TABELA 8	– Unidade direcional de sequência negativa.	30
TABELA 9	– Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional de sobrecorrente de neutro do relé GE D90Plus.	30
TABELA 10	– Valores medidos para a determinação da direção da falta de fase-terra.	34
TABELA 11	– Valores medidos para a determinação da direção da falta fase-neutro.	35
TABELA 12	– Valores medidos para a determinação da direção da falta fase-fase.	35
TABELA 13	– Valores medidos para a determinação da direção da falta fase-fase-neutro.	35
TABELA 14	– Valores medidos para a determinação da direção da falta trifásica e trifásica-neutro.	36
TABELA 15	– Faixa de ajuste de cada controle.	49

LISTA DE SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
FREEDM	<i>Future Renewable Electric Energy Delivery and Management</i>
LTs	Linhas de transmissão
GE	<i>General Electric, Inc.</i>
TCs	Transformadores de Corrente
ECA	Ângulo Característico da Linha de Transmissão
TP	Transformador de Potencial
CNRI	<i>Corporation for National Research Initiatives</i>
PSF	<i>Python Software Foundation</i>
GPL	General Public License
RAD	Rapid Application Development
DRY	<i>Don't Repeat Yourself</i>
KISS	<i>Keep It Simple Stupid</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.1.1 Delimitação do tema	11
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 JUSTIFICATIVA	13
1.5 ETAPAS DA PESQUISA	13
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CONCEITOS E APLICAÇÕES DA FUNÇÃO DIRECIONAL	15
2.2 OUTROS ESTUDOS REALIZADOS	16
2.3 FUNÇÃO DIRECIONAL DE RELÉS COMERCIAIS	19
2.3.1 FUNÇÃO DIRECIONAL DO RELÉ GE D90PLUS	19
2.3.1.1 Elemento Direcional de sobrecorrente de fase	20
2.3.1.2 Elemento Direcional de sobrecorrente de neutro	24
2.3.1.3 Elemento Direcional de sobrecorrente por Sequência Negativa	29
2.3.2 FUNÇÃO DIRECIONAL DO RELÉ SIEMENS 7SJ62	32
2.3.2.1 Método de definição da direção	33
2.3.2.2 Determinação da Direção com Sistema de Sequência Zero	33
2.3.2.3 Determinação da Direção com Sistema de Sequência Negativa	34
2.3.2.4 Tensões de Polarização Cruzada para Determinação da Direção	34
2.3.2.5 Determinação da Direção dos Elementos Direcionais de Fase	37
2.3.2.6 Determinação da Direção do Elemento Direcional de Terra com Valores de Terra	40
2.3.2.7 Determinação da Direção do Elemento Direcional de Terra com Valores de Sequência Negativa	40
2.3.3 FUNÇÃO DIRECIONAL DO RELÉ <i>Schweitzer Engineering Laboratories</i> (SEL)	41
2.3.3.1 Elemento direcional de impedância de sequência negativa	42
3 FERRAMENTAS UTILIZADAS	50
3.1 A LINGUAGEM PYTHON	50
3.1.1 Razões para a Utilização da linguagem Python	50
3.2 REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO ATRAVÉS DE QUADRIPOLos	51
4 DESENVOLVIMENTO	56
4.1 DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO	56
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.2.1 Estudo de caso para o Relé SEL-311L	67
4.2.2 Estudo de caso para o Relé GE D90 Plus	72
4.2.3 Estudo de caso para o Relé SIEMENS 7SJ62	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	80

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Como um dos maiores sistemas elétricos interligados do mundo (ITAIPU, 2009), com mais de 134.000 km de extensão em linhas de transmissão (ONS, 2016), o Brasil necessita cada vez mais de produtos e metodologias modernas e confiáveis para a detecção de falhas no seu Sistema Elétrico de Potência, SEP.

A dinâmica da evolução do SEP brasileiro, com todas as suas características regionais e multiplicidade de concessionárias e equipamentos instalados (ONS, 2016), obriga os engenheiros e pesquisadores a buscar soluções rápidas e seguras para configuração e/ou reconfiguração dos seus equipamentos.

Com o avanço tecnológico dos microprocessadores, foi possível melhorar a segurança e confiabilidade dos relés de proteção baseados nestes dispositivos (MAMEDE, 2013) e, além disso, foi possível também aumentar a quantidade de opções de funções de proteção. As barreiras existente nos antigos relés eletromecânicos, onde cada relé possuía uma função específica com ajustes limitados, também foi ultrapassada, abrindo espaço para o desenvolvimento de algoritmos cada vez mais elaborados, baseados em estudos mais avançados sobre o que ocorre com fasores de tensão e corrente durante uma falta (COURY et al., 2007).

Porém, observa-se que as configurações e ajustes das funções de proteção dos fabricantes de relés de proteção são, muitas vezes, completamente distintas, ou seja, cada fabricante utiliza formas e métodos próprios para detecção da falha e atuação das diversas funções disponíveis num relé baseado em microprocessamento. Frequentemente o engenheiro de proteção enfrenta o desafio de configurar uma mesma função de maneiras diferentes em relés de fabricantes diversos. Desta forma, as funções de proteção são ajustadas para cada situação de aplicação segundo as orientações e forma de operação de cada fabricante.

Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir para o avanço das metodologias de configuração do Sistema de Proteção do SEP, desenvolvendo uma ferramenta de apoio à configuração de uma função de proteção de relés digitais existentes no mercado.

1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho visa desenvolver um aplicativo computacional onde o usuário irá escolher o relé de proteção do seu projeto, inserir os dados do seu sistema e terá uma resposta gráfica

com o comportamento dos parâmetros de ajuste em relação ao deslocamento dos pontos de falta ao longo da linha de transmissão, de acordo com o relé escolhido e das características desse sistema. Os cálculos dos parâmetros serão realizados na linguagem de programação *Python*. Portanto, este trabalho se limitará ao estudo e desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à configuração da função direcional de sobrecorrente considerando relés de proteção de três fabricantes diferentes.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O projeto do esquema de proteção de determinado equipamento ou sistema do SEP, muitas vezes, é realizado sem o conhecimento por parte do projetista de qual fabricante e/ou equipamento será fornecido à época da obra. Assim, cabe ao Engenheiro de Aplicação, muitas vezes em condições não muito adequadas, efetuar as configurações dos relés para atendimento aos requisitos do projeto. É nesse contexto que este trabalho se encaixa, pois trata da necessidade de criar uma ferramenta computacional auxiliar para a configuração e ajuste da função direcional de relés de proteção.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um programa aplicativo com base na linguagem *Python* para auxiliar na configuração da função direcional de sobrecorrente para três fabricantes de relés de proteção.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar as bibliografias relacionadas ao assunto do trabalho proposto;
- Estudar o princípio de funcionamento da função direcional de sobrecorrente e sua aplicação;
- Estudar as particularidades da função direcional de sobrecorrente de três fabricantes de relés de proteção;
- Estudar a linguagem de programação *Python*;
- Desenvolver um algoritmo capaz de, a partir da entrada dos dados do sistema em estudo, calcular faltas ao longo de uma linha de transmissão, gerando gráficos de tendências, nos quais o usuário possa observar os limites dos ajustes para cada um dos relés propostos;

- Determinar, através de um modelo com duas fontes equivalentes de *Thévenin* e uma linha de transmissão, as possibilidades de ajuste da função direcional de sobrecorrente para cada fabricante, de acordo com a forma de entrada e respostas esperadas.

1.4 JUSTIFICATIVA

A diversidade de fabricantes e de seus princípios de operação promovem a existência de configurações completamente distintas para uma mesma função de proteção, sendo esta a motivação da equipe para estudar métodos que visem a concentração, numa só ferramenta, das configurações da função de proteção direcional de sobrecorrente para alguns dos principais fabricantes do mercado.

As configurações automáticas e as recomendações dos fabricantes cobrem quase a totalidade dos casos práticos, porém, quando estas recomendações não se aplicam, poderão ocorrer falhas na atuação da proteção ou atuações indevidas. Com a excursão da falta em todo o comprimento da linha, seja ela longa ou curta, o engenheiro de proteção, poderá observar os valores mais adequados para cada ajuste de acordo com o perfil desta linha. Portanto, a engenharia ganhará uma ferramenta prática para auxiliar a configuração desta função com base nas particularidades de cada sistema.

1.5 ETAPAS DA PESQUISA

Visando atingir aos objetivos desta pesquisa científica, organizou-se este trabalho em etapas, conforme descrito abaixo:

Etapa I: Estudo das bibliografias relacionadas ao assunto do trabalho proposto como a utilização da função direcional e aplicações de ferramentas de cálculo da função direcional. Nesta etapa buscamos nos principais bancos de conhecimento os mais recentes estudos sobre os assuntos a serem tratados neste trabalho.

Etapa II: Estudo da função direcional de sobrecorrente e suas diversas variações.

Etapa III: Estudo da configuração da função direcional de diversos fabricantes de relés de proteção através de manuais e/ou recomendações de configurações. Como cada fabricante utiliza uma forma própria para o cálculo desta função, será estudado cada um deles e suas peculiaridades.

Etapa IV: Estudar a linguagem de programação *Python* e desenvolver um algoritmo para auxílio à configuração das funções direcionais de sobrecorrente dos relés estudados.

Etapa V: Implementar o aplicativo e simular faltas ao longo de uma linha previamente modelada, analisando as possibilidades de ajustes sugeridas pelo aplicativo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto de cinco capítulos. O primeiro capítulo destina-se à introdução, sendo subdividido em tema, problemas e premissas, objetivos, justificativa e as etapas da pesquisa.

O segundo capítulo explica os conceitos e aplicação da função direcional de sobrecorrente e dedica-se ao estudo das funções direcionais de sobrecorrente de três fabricantes. Nesse capítulo demonstramos as diversas associações da função direcional com outras funções nos relés digitais e como estas são configuradas nos relés escolhidos: cálculo da função, dados de entrada e dados de saída.

No terceiro capítulo descrevemos as ferramentas escolhidas para o desenvolvimento do projeto e a forma como este foi implementado de forma que reúna praticidade gráfica com uma sólida e segura base de cálculos dos parâmetros, para cada relé.

No quarto capítulo descrevemos os procedimentos utilizados para a obtenção dos dados de uma linha de transmissão, previamente modelada, analisando as configurações sugeridas pelo aplicativo desenvolvido.

Por fim, o quinto capítulo contém as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

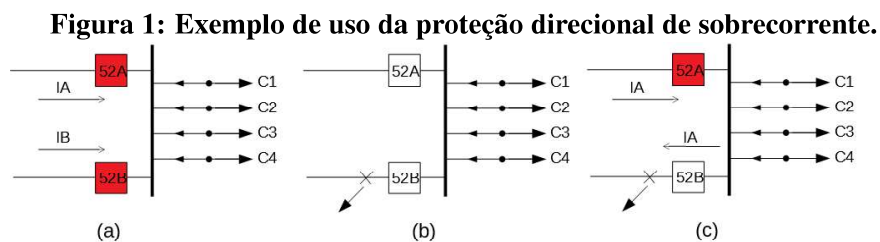
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS E APLICAÇÕES DA FUNÇÃO DIRECIONAL

Para sistemas de transmissão e distribuição de energia do tipo radial a proteção pode ser realizada apenas com relés de sobrecorrente, observando a magnitude da corrente no estudo de curto-circuito. Em casos em que o sistema é em anel, em que existem múltiplas fontes em direções opostas ao ponto terminal, o relé de sobrecorrente pode não ser capaz de atuar adequadamente (COURY et al., 2007).

Supondo um sistema onde duas fontes com seus respectivos disjuntores alimentam uma mesma barra, como na Figura 1. Os fluxos de potência das duas linhas estarão, em condições normais, no sentido das linhas para a barra de cargas, Figura 1a. Caso sejam utilizados relés apenas com a função de sobrecorrente (50/51) e ocorra uma falta entre a linha 2 e a barra, esta falta será detectada pelos dois relés, provocando a abertura dos seus respectivos disjuntores. Como consequência, ocorrerá o desligamento de todas as cargas alimentadas por este barramento, conforme Figura 1b.

Quando associamos a função direcional aos relés de sobrecorrente e a mesma falta ocorrer na linha 2, o sentido da corrente da barra para o ponto faltoso se inverte, sendo detectado somente pelo relé associado ao disjuntor da linha 2. Desta forma a barra de cargas continua sendo alimentada pela linha 1, conforme Figura 1c. Da mesma forma, caso a falta ocorra na linha 1, somente o relé desta linha detectará a falta, abrindo seu disjuntor.



Fonte: Autoria própria.

Relés direcionais são largamente utilizados para interpretar em qual direção a corrente flui em um circuito e daí surgiu o termo direcional. Basicamente, um relé direcional verifica a diferença no ângulo de fase entre duas grandezas que, em geral, são a corrente e a tensão. A direção da falta é dada pela posição fasorial da corrente em relação à grandeza de polarização, que pode ser uma das tensões (KINDERMANN, 2012).

Renewable Electric Energy Delivery and Management, FREEDM, buscar uma simplificação na comunicação entre os relés e melhorar a atuação no correto isolamento de faltas através da função direcional presente no relé SEL-351S. Para o desenvolvimento do estudo a atuação isolada do relé é simulada em um *software* chamado PSCAD. Em seguida a implementação do *hardware* é simulada em bancada. Concluiu-se que durante uma falta, com o aumento de carga, se a razão entre a corrente de falta e a corrente de carga é menor que 2, a falta não pode ser detectada.

Já Wang (2017), desenvolveu um novo esquema de verificação de direcionalidade de falta em uma configuração de linha de transmissão única com fonte nas duas extremidades, baseado em corrente não periódica de falta. Neste trabalho, também devem ser utilizados dois relés, um em cada extremidade da linha e eles devem se comunicar. Uma série de cálculos é realizado e simulado no *software* MATLAB, pois as correntes não periódicas de falta sofrem uma diferenciação de segunda ordem. Assim, observou-se que as correntes não periódicas de falta geram sinais (positivo ou negativo), que quando comparados nas duas extremidades podem discriminar as faltas como internas ou externas ao esquema de proteção.

Outros estudos foram realizados, inclusive com o desenvolvimento de ferramentas computacionais, tais como em Klock (2002), Negrão (2015) e Chelliah (2015), com a intenção de facilitar o trabalho repetitivo de calcular valores de curtos-circuitos sobre LTs utilizando curvas padronizadas para coordenar corretamente relés direcionais de sobrecorrente. Nesses casos, porém, a aplicação da coordenação estava voltada para a magnitude da corrente e o tempo de atuação entre relés, sem considerar efetivamente a direcionalidade do evento, a qual é objeto do presente trabalho.

Já em Misiak (2009), é apresentado um modelo de parametrização do relé SEL-351. São realizados testes e as funções são descritas, buscando uma metodologia de verificação da confiabilidade do relé, com a finalidade de otimizar o tempo e custo de profissionais da área e oferecer acesso a professores e alunos à tecnologia utilizada. No item sobre relés direcionais ele faz uma sucinta descrição do que seria esta função e uma forma de funcionamento. Em seguida realiza a parametrização da função direcional, a qual o autor declara ser a "principal função disponível no relé". Por fim, desenvolve uma série de ensaios estáticos, buscando o ponto de atuação do relé de acordo com o ajuste realizado.

Com intenção de auxiliar de forma prática o aprendizado do engenheiro de proteção, para que o acadêmico tenha contato direto com a tecnologia de relés microprocessados em Bordini (2008), os autores desenvolveram uma bancada com um relé específico obtido através de doação.

Em Docena (2003), os autores, visando atender uma demanda por tempo para os projetos de proteção de sistemas elétricos industriais, elaboraram um *software* para cálculos de curtos-circuitos nos barramentos de uma indústria e aplicaram os conceitos em um roteiro para implementação de um sistema de proteção.

Em 1998 Bill Fleming da *Schweitzer Engineering Laboratories* (FLEMING, 1998), apresentou o elemento direcional de sequência negativa implementado nos relés deste fabricante. Apesar de utilizar as mesmas informações de tensão e corrente de sequência negativa, nos relés da SEL, a direção da falha é determinada pela impedância de sequência negativa. A vantagem em relação ao método tradicional, segundo Fleming, reside no fato de ser possível detectar a direção correta da falha mesmo para uma tensão de sequência negativa muito pequena.

Berrocal (2017) em seu estudo sobre o comportamento da função direcional de um relé da SEL em uma linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda, concluiu que o elemento direcional 32QG não atua em alguns trechos desta. Para o relé comercial utilizado, o elemento direcional 32QG utiliza os parâmetros de corrente de sequência negativa, polarizado por tensão. Nesse mesmo estudo foi verificado que o elemento 32V, baseado na corrente de sequência zero, atua corretamente para toda a extensão da linha.

Numa avaliação dos vários métodos de identificação da direção de falhas em sistemas de transmissão, Jeff Roberts e Armando Guzmán (2006), estudaram as formas de detecção, vantagens e desvantagens de cada método. O trabalho concluiu que a combinação dos vários métodos poderá garantir a correta avaliação da direção da falha.

Em 2008, em seu trabalho de conclusão de curso “Ajuste e Coordenação de Relés de Sobrecorrente”, André Luiz Vitorino Almeida (2006) estudou a função de sobrecorrente de relés através de simulações realizadas no software *ASPEN OneLiner*. Nesse trabalho, André demonstra a importância de garantir a seletividade no desligamento do sistema, lembrando que o objetivo da proteção é a de isolar e eliminar o defeito o mais rápido possível, reduzindo as consequências de uma interrupção indesejada.

Em toda a bibliografia avaliada, não se encontrou nada semelhante ao que está sendo proposto neste trabalho, ou seja, uma aplicação de apoio ao desenvolvimento de ajustes de uma função de proteção, com a possibilidade de inclusão de outras funções de proteção, em diversos modelos de relés.

2.3 FUNÇÃO DIRECIONAL DE RELÉS COMERCIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionados três relés comerciais de proteção de linhas de transmissão, LTs, de empresas que, segundo técnicos e engenheiros do ramo, tem grande participação no mercado de Proteção de Sistemas e que possuem formas diferentes de verificação da direcionalidade de faltas na linha. São eles, os relés da SIEMENS, modelo SIPROTEC 7SJ62, SWCHEITZER, modelo SEL-311L e GE, modelo D90Plus.

Os três relés selecionados tem como características em comum o microprocessamento que permitem a aplicação de algoritmos para multifunções de proteção, para vários níveis de tensão de LTs de energia elétrica. Outras funções, tais como automatismo e medições de grandezas elétricas também podem estar presentes.

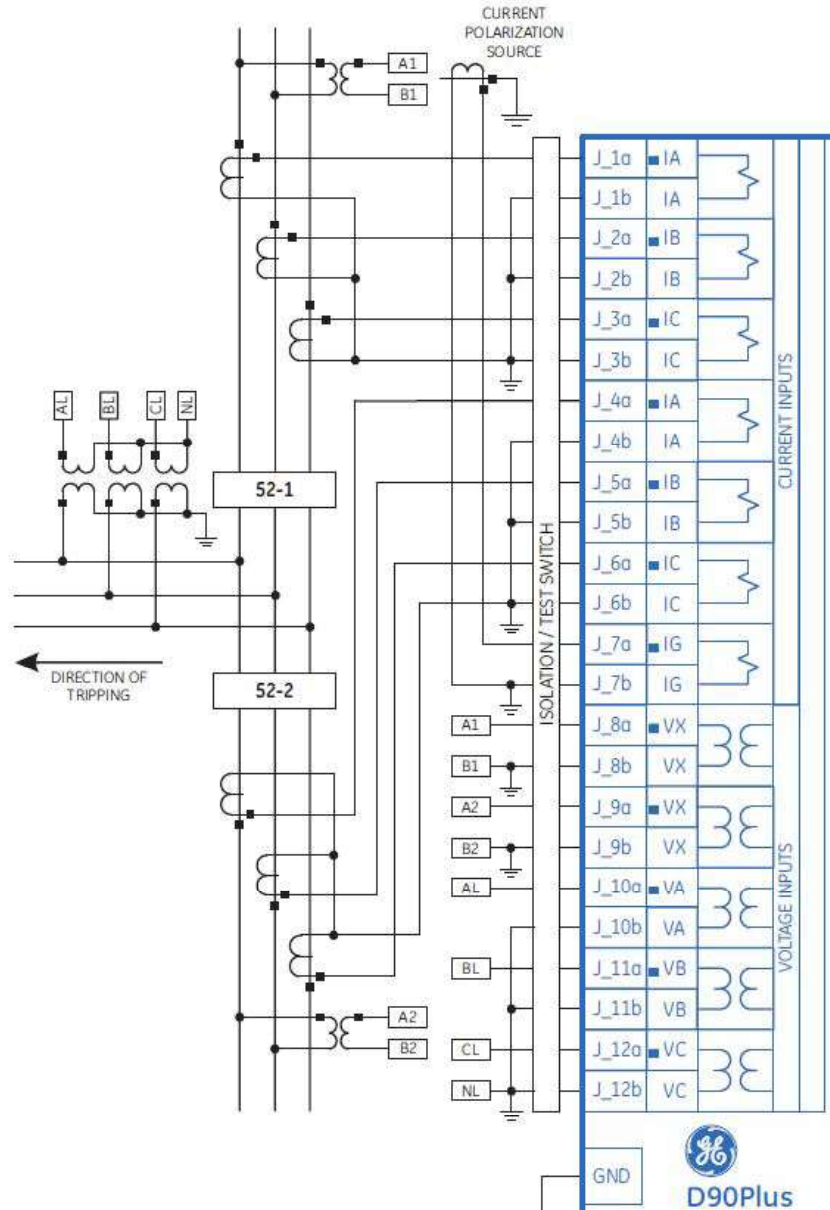
2.3.1 FUNÇÃO DIRECIONAL DO RELÉ GE D90PLUS

O relé da GE, D90Plus, possui elementos de supervisão direcional de fase, de neutro e de sequência-negativa.

Para entendimento sobre as entradas de valores das grandezas elétricas nos algoritmos do relé, observa-se que, para a supervisão direcional de fase, as quantidades de comparação são dadas pelas entradas analógicas das correntes I_A , I_B , I_C , as quais são ligadas por transformadores de corrente, TCs, respectivamente através dos conectores J_1a, J_1b, J_2a, J_2b, J_3a, J_3b, para o jogo de TCs 1 ou J_4a, J_4b, J_5a, J_5b, J_6a, J_6b, para o jogo de TCs 2, bem como as quantidades de polarização serão dadas pelas entradas analógicas das tensões V_A , V_B , V_C , ligadas por TPs através dos conectores J_10a, J_10b, J_11a, J_11b, J_12a, J_12b, conforme o diagrama da Figura 3.

Essas mesmas entradas são utilizadas para a supervisão direcional de sequência negativa. Essas entradas também podem ser utilizadas para supervisão direcional de neutro, ou, dependendo do modo de polarização desejado, também pode ser utilizada a entrada analógica da corrente I_G , ligada por um TC através dos conectores J_7a e J_7b. Neste caso, como será visto adiante, as tensões de polarização podem ser calculadas através dos TPs de fase e também podem ser medidas diretamente através das entradas analógicas de tensão V_X , ligadas por TPs através dos conectores J_8a, J_8b, para a comparação com o jogo de TCs 1 ou J_9a, J_9b, para a comparação com o jogo de TCs 2.

Figura 3: Diagrama parcial típico de fiação do relé GE D90Plus.



Fonte: (GE, 2016).

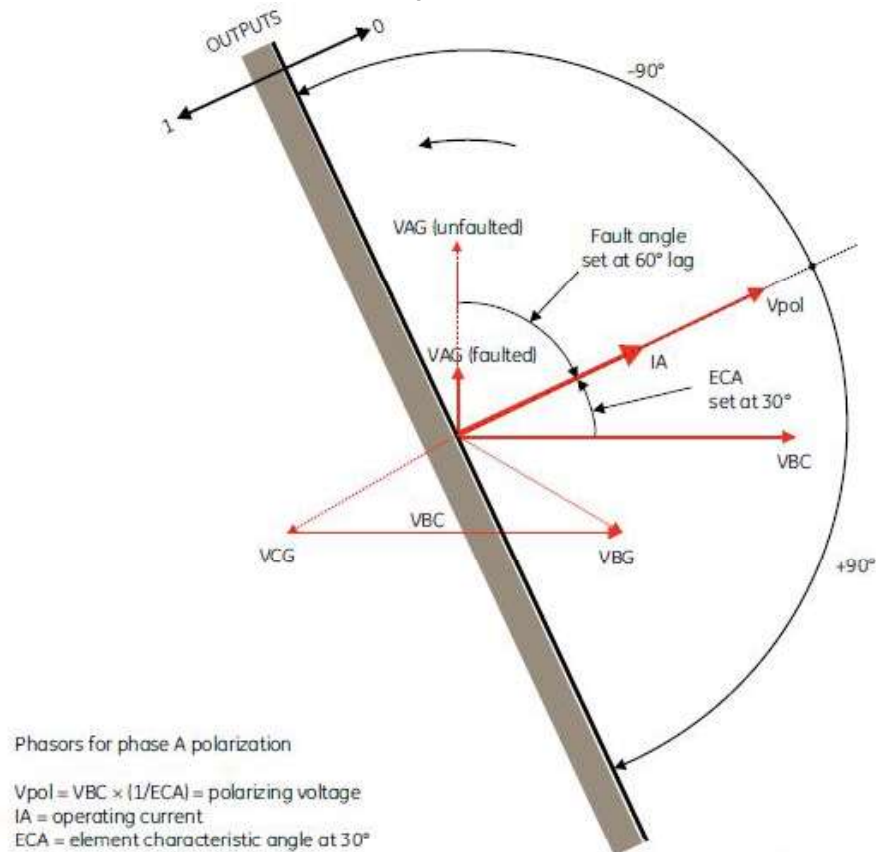
2.3.1.1 ELEMENTO DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE DE FASE

O elemento direcional de fase, sendo um para cada fase A, B e C e para cada fonte de corrente, determina a direção do fluxo de corrente de fase tanto para regime permanente como para condições de falta. A direção do fluxo de corrente é determinada pela diferença de ângulo entre a corrente de fase e a tensão de polarização, a qual é obtida pela medição do ângulo de fase-fase somado ao ângulo característico do elemento, parâmetro ECA.

A intenção deste elemento é bloquear a função de sobrecorrente para prevenir a

operação quando a corrente está circulando em uma direção em particular. Desta forma, o sinal de saída (*Outputs*) deste elemento é um binário 0 ou 1, conforme a Figura 4, que é utilizado para, respectivamente, liberação ou bloqueio de outra função de proteção tal como a função de sobrecorrente de fase.

Figura 4: Polarização direcional da fase A.



Fonte: (GE, 2016).

A tensão de polarização utilizada para verificação da direção é a que estiver sendo medida através dos TPs de fase em quadratura à fase em falta somada ao ângulo ECA, desde que essa tensão seja maior que o limiar de leitura do relé ajustado em *Pol V Threshold*. Assim, sempre que for possível a leitura da tensão de polarização e a corrente de operação for maior que 5% da corrente nominal do TC, o elemento estará apto a operar. Desta forma, observando-se a Figura 4, tem-se, neste exemplo, que a tensão de polarização (V_{pol}) é a tensão de base V_{BC} somado ao valor ajustado de $ECA = 30^\circ$. A $\pm 90^\circ$ de V_{pol} estão os limites de verificação da direção da corrente I_A , ou seja, se o ângulo da corrente I_A estiver compreendido entre $-90^\circ < \text{ângulo de } V_{pol} < +90^\circ$, o sinal lógico de saída do elemento será 0, indicando que a direção da corrente é à frente, permitindo a atuação do elemento de sobrecorrente de fase. Caso o ângulo da corrente I_A seja maior que o ângulo de $V_{pol} + 90^\circ$ ou menor que $V_{pol} - 90^\circ$, o sinal lógico de

saída do elemento será 1, indicando que a direção da corrente é reversa e, neste caso, aplica-se o bloqueio da atuação do elemento de sobrecorrente de fase.

A Tabela 1 mostra os sinais de operação e polarização usados para o controle direcional de fase.

Tabela 1: Sinais de operação e de polarização.

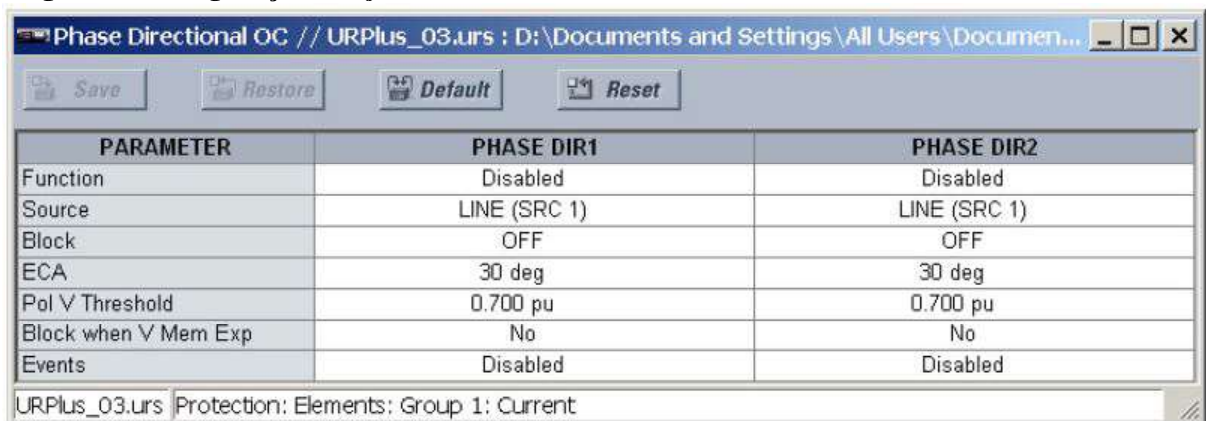
Fase	Sinal de Operação	Sinal de Polarização	
		Sequência ABC	Sequência ACB
A	Ângulo de I_A	Ângulo de $V_{BC} \times (1 \angle ECA)$	Ângulo de $V_{CB} \times (1 \angle ECA)$
B	Ângulo de I_B	Ângulo de $V_{CA} \times (1 \angle ECA)$	Ângulo de $V_{AC} \times (1 \angle ECA)$
C	Ângulo de I_C	Ângulo de $V_{AB} \times (1 \angle ECA)$	Ângulo de $V_{BA} \times (1 \angle ECA)$

Fonte: (GE, 2016).

Observa-se que desta forma o elemento funciona muito bem para uma falta monofásica, em que os ângulos das tensões adjacentes àquela fase em falta, praticamente não mudam. Contudo, neste elemento também está incorporada uma memória das tensões de polarização, a qual pode ser mantida válida por até um segundo, para auxiliar a obtenção da tensão de polarização para, por exemplo, faltas trifásicas. Caso a memória tenha se esgotado e não haja mais medição disponível, é opcional o bloqueio dos elementos sob controle direcional.

A Figura 5 é a visualização da tela de configuração da função direcional de sobrecorrente de fase do relé GE D90Plus e a Tabela 2 indica as faixas de ajustes e observações dos parâmetros mais relevantes.

Figura 5: Configuração de ajustes do elemento direcional de sobrecorrente do relé GE D90Plus.



PARAMETER	PHASE DIR1	PHASE DIR2
Function	Disabled	Disabled
Source	LINE (SRC 1)	LINE (SRC 1)
Block	OFF	OFF
ECA	30 deg	30 deg
Pol V Threshold	0.700 pu	0.700 pu
Block when V Mem Exp	No	No
Events	Disabled	Disabled

URPlus_03.urs Protection: Elements: Group 1: Current

Fonte: (GE, 2016).

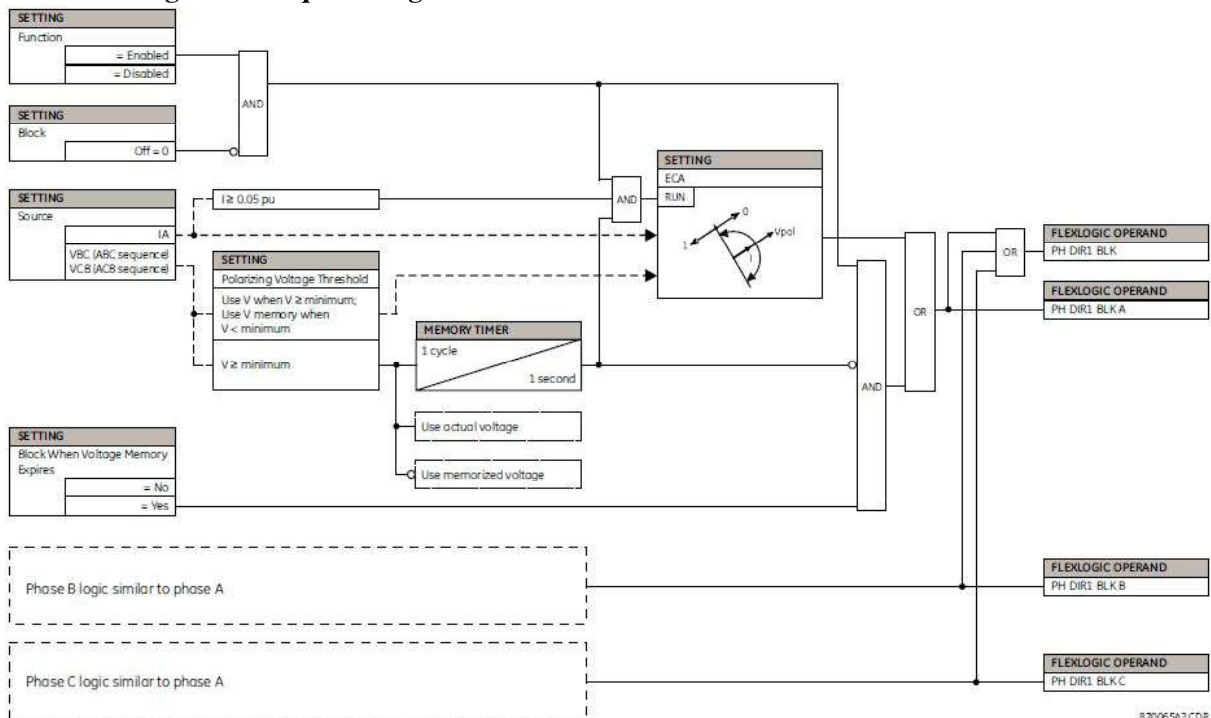
Tabela 2: Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional do relé GE D90Plus.

Parâmetro	Faixa de ajustes	Observações
<i>Source</i>	<i>LINE</i> (SRC1), BKR 1 (SRC2), BKR2 (SRC3)	Usado para selecionar qual conjunto de TCs será utilizado como quantidade de operação do elemento.
ECA	0° a 359° em passos de 1°	Ângulo característico do elemento, o qual desloca a tensão de referência para a região à frente, formando V_{pol} .
<i>Pol V Threshold</i>	0.000 a 3.000pu em passos de 0.001	Ajuste utilizado para estabelecer qual o valor mínimo de V_{pol} que será considerada confiável.
<i>Block when V Mem Exp</i>	<i>Yes, No</i>	Quando ajustado em <i>Yes</i> (Sim), todas as funções sob controle direcional deste elemento serão bloqueados após expirar a memória de V_{pol} . Quando ajustado em <i>No</i> (Não), todas as funções sob controle direcional poderão atuar.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 6 é a representação do esquema lógico do elemento direcional de fase. A operação fundamental do elemento, a qual teve seu funcionamento explicado anteriormente na Figura 4, está representada pelo bloco ECA, o qual é ativado quando o elemento está habilitado (*Function*), nenhuma lógica o está bloqueando (*Block*) e a fonte (*Source*) pode ser lida.

Figura 6: Esquema lógico do elemento direcional de sobrecorrente de fase 1.



Fonte: (GE, 2016).

2.3.1.2 ELEMENTO DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO

Neste relé está disponível um elemento de proteção direcional de sobrecorrente de neutro, o qual é subdividido em duas unidades, chamadas de unidade direcional e unidade de sobrecorrente. A unidade direcional, quando ativada, atua sobre uma das duas unidades de sobrecorrente, sendo uma para faltas consideradas à frente e outra para faltas reversas.

A operação de cada uma destas unidades de sobrecorrente ocorre quando a corrente de operação de sequência zero ou a corrente medida no aterramento é excedida, conforme ajuste individual para atuações à frente ou reversas e a direção observada pela unidade direcional está dentro dos limites ajustados, de acordo com o modo de polarização desejado. Enfatizamos que, apesar da existência da polarização por corrente neste relé, a mesma não está no escopo deste trabalho.

Para determinar a direção da falta, a unidade direcional compara o ângulo da corrente de sequência zero, (I_0 - ver Tabela 3) calculado a partir de I_A , I_B e I_C , ou a corrente medida em I_G , Tabela 4, ao fasor selecionado para polarização, os quais podem ser a tensão de sequência zero (V_0), a tensão medida em VX ou a corrente medida em I_G . Assim como no caso do elemento direcional de sobrecorrente de fase, aplica-se um ângulo característico para cada

elemento. Além disso, aplicam-se também ângulos limites, para que um elemento não atue na zona de atuação do outro.

Tabela 3: Configuração de fasores para 3I0 calculada.

Modo polarização	Direção	Comparação de fasores
Tensão	Para frente	$-V_0 + Z_{\text{offset}} \times I_0$ e $I_0 \times 1 \angle ECA$
Tensão	Para trás	$-V_0 + Z_{\text{offset}} \times -I_0$ e $I_0 \times 1 \angle ECA$
Corrente	Para frente	I_G e I_0
Corrente	Para trás	I_G e $-I_0$
Dual	Para frente	$-V_0 + Z_{\text{offset}} \times I_0$ e $I_0 \times 1 \angle ECA$ ou I_G e I_0
Dual	Para trás	$-V_0 + Z_{\text{offset}} \times I_0$ e $-V_0 + Z_{\text{offset}} \times (-I_0)$ e $I_0 \times 1 \angle ECA$

Fonte: (GE, 2016).

Tabela 4: Configuração de fasores para IG medida.

Modo polarização	Direção	Comparação de fasores
Tensão	Para frente	$-V_0 + Z_{\text{offset}} \times I_G/3$ e $I_G \times 1 \angle ECA$
Tensão	Para trás	$-V_0 + Z_{\text{offset}} \times (-I_G/3)$ e $I_G \times 1 \angle ECA$

Fonte: (GE, 2016).

A Figura 7 exemplifica o funcionamento da unidade direcional polarizada por tensão de sequência zero. Neste exemplo, fixou-se a tensão VAG como referência e há uma falta fase-terra. Como se sabe, as faltas monofásicas causam desequilíbrio no sistema, ou seja, serão observadas tensões e correntes de sequência negativa e de sequência zero. Para este elemento em questão, são calculadas a tensão de sequência zero e a corrente de sequência zero no desequilíbrio, através de:

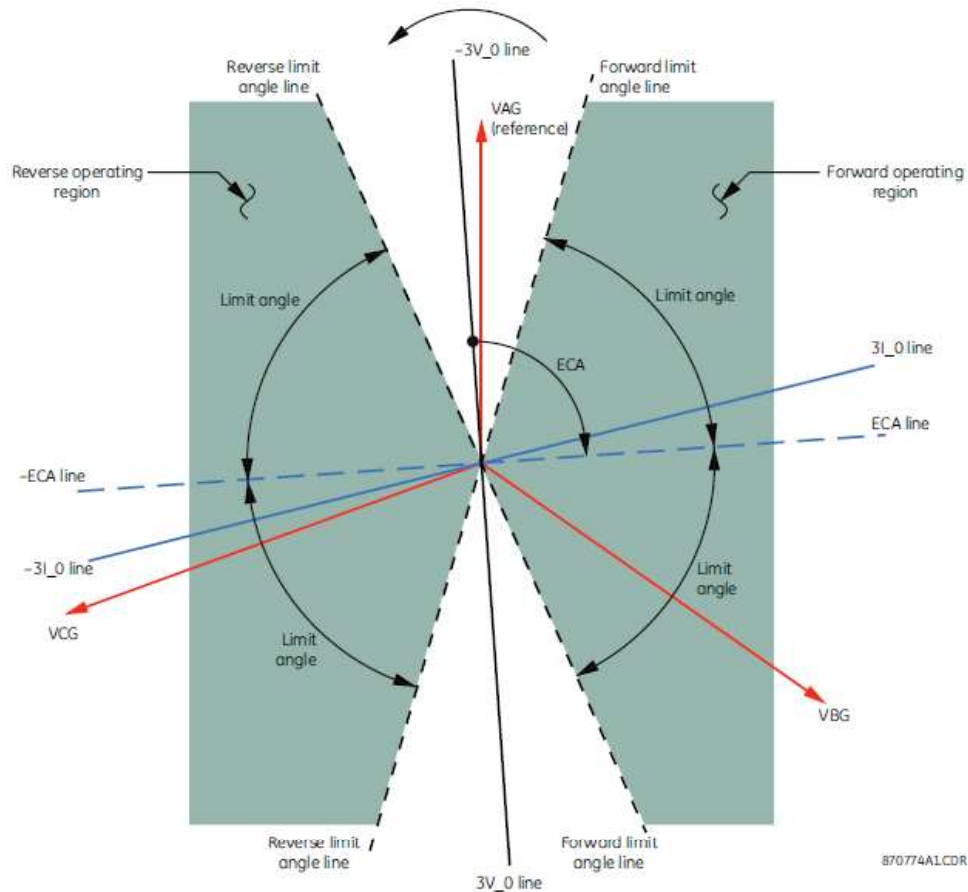
$$\dot{V}_0 = 1/3(\dot{V}_{AG} + \dot{V}_{BG} + \dot{V}_{CG}) \quad (1)$$

$$\dot{I}_0 = 1/3\dot{I}_N = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) \quad (2)$$

Ainda no exemplo, o elemento está ajustado com ângulo característico $ECA = 90^\circ$, formando a linha de centro para operação. Também estão ajustados em $\pm 80^\circ$ os limites angulares em relação ao ECA, formando assim as duas zonas limites de operação dos elementos

direcionais. Ou seja, se o ângulo da corrente de sequência zero estiver compreendido na região delimitada pelos limites angulares para faltas à frente (*Forward operating region*), a unidade de sobrecorrente à frente será ativada. Se o ângulo da corrente de sequência zero estiver compreendido na região delimitada pelos limites angulares para faltas reversas (*Reverse operating region*), a unidade de sobrecorrente reversa será ativada.

Figura 7: Característica do direcional de neutro para polarização por tensão.



Fonte: (GE, 2016).

A Figura 8 é a visualização da tela de configuração da função direcional de sobrecorrente de neutro do relé GE D90Plus.

Figura 8: Configuração de ajustes do direcional de sobrecorrente de neutro.

PARAMETER	NEUTRAL DIR OC1	NEUTRAL DIR OC2
Function	Disabled	Disabled
Source	LINE (SRC 1)	LINE (SRC 1)
Polarizing	Voltage	Voltage
Polarizing Voltage	Calculated V0	Calculated V0
Operating Current	Calculated 3I0	Calculated 3I0
Positive-Sequence Restraint	0.063	0.063
Offset	0.00 ohms	0.00 ohms
Forward ECA	75 ° Lag	75 ° Lag
Forward Limit Angle	90 deg	90 deg
Forward Pickup	0.050 pu	0.050 pu
Reverse Limit Angle	90 deg	90 deg
Reverse Pickup	0.050 pu	0.050 pu
Block	OFF	OFF
Events	Disabled	Disabled

URPlus_03.urs Protection: Elements: Group 1: Current

Fonte: (GE, 2016).

As Tabelas 5 e 6 indicam as faixas de ajustes e observações dos parâmetros mais relevantes.

Tabela 5: Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional de sobrecorrente de neutro do relé GE D90Plus.

Parâmetro	Faixa de ajustes	Observações
<i>Polarizing</i>	<i>Voltage, Current, Dual</i>	Seleção da quantidade de polarização, entre tensão, corrente ou ambos.
<i>Polarizing Voltage</i>	<i>Calculated V0, Measured VX</i>	Seleção de qual tensão de polarização será utilizada quando o ajuste <i>Polarizing for Voltage</i> ou <i>Dual</i> . Quando este ajuste for <i>Calculated V0</i> , será calculado o valor de tensão de sequência zero conforme explicado na Figura 8. Quando este ajuste for <i>Measured VX</i> , a tensão de polarização será a medida em VX.

Fonte: Autoria própria.

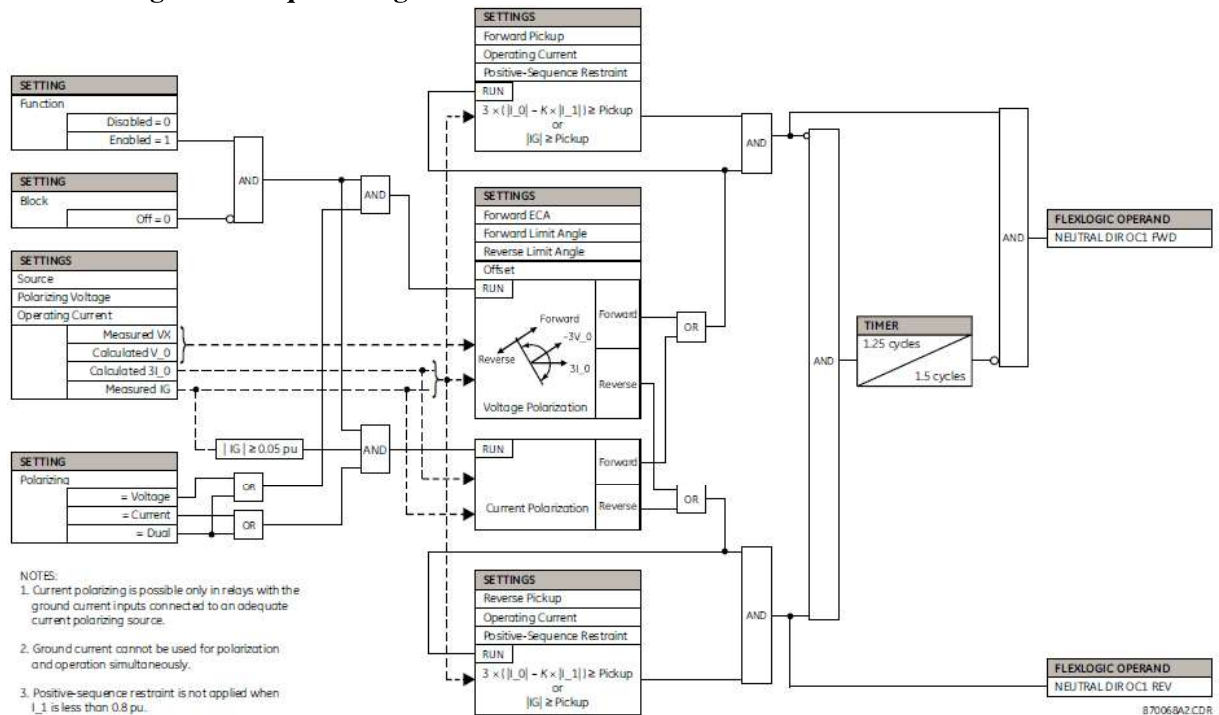
Tabela 6: Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional de sobrecorrente de neutro do relé GE D90Plus.

Parâmetro	Faixa de ajustes	Observações
<i>Operating Current</i>	<i>Calculated 3I₀, Measured IG</i>	Seleção para a corrente de operação, entre corrente de sequência zero calculada conforme explicado na Figura 8, ou corrente medida no TC de aterramento.
<i>Positive-Sequence Restraint</i>	0.000 a 0.500 em passos de 0.001	Ajuste da quantidade de restrição de sequência positiva, utilizado na unidade de sobrecorrente.
<i>Offset</i>	0.00 a 250.000 Ohms em passos de 0.01	Ajuste de especificação do deslocamento de impedância. Utilizado para verificação de direção de falta em linhas com compensação série. Valores em secundário dos TCs e TPs.
<i>Forward Limit Angle</i>	40° a 90° em passos de 1°	Definição do limite angular simétrico para a direção à frente
<i>Forward Pickup</i>	0.006 a 30.000 pu em passos de 0.001	Define o valor para o limiar (<i>pickup</i>) para atuação da unidade de sobrecorrente para faltas à frente.
<i>Reverse Limit Angle</i>	40° a 90° em passos de 1°	Definição do limite angular simétrico para a direção reversa
<i>Reverse Pickup</i>	0.006 a 30.000 pu em passos de 0.001	Define o valor para o limiar (<i>pickup</i>) para atuação da unidade de sobrecorrente para faltas reversas.
<i>Forward ECA</i>	-90° a 90° em passos de 1°	Ângulo característico do elemento para a direção à frente no modo de polarização <i>Voltage</i> . O ângulo característico para a direção reversa sempre estará deslocado a 180° deste ajuste.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 9 é a representação do esquema lógico do elemento direcional de sobrecorrente de neutro. A operação fundamental da unidade direcional, a qual teve seu funcionamento explicado anteriormente na Figura 6, está representada pelo bloco central que possui, entre outros, o ajuste de ângulo ECA, o qual é ativado de forma similar ao do elemento direcional de sobrecorrente de fase.

Figura 9: Esquema lógico do elemento direcional de sobrecorrente de neutro 1.



Fonte: (GE, 2016).

2.3.1.3 ELEMENTO DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE POR SEQUÊNCIA NEGATIVA

Nesse relé estão disponíveis dois elementos de proteção direcional de sobrecorrente por sequência negativa, sendo um para faltas consideradas à frente e outro para faltas reversas.

Este elemento funciona de forma muito similar ao elemento direcional de sobrecorrente de neutro porém, as quantidades de operação e de polarização da unidade direcional são estritamente a corrente de sequência negativa (I_2) e tensão de sequência negativa (V_2), conforme Tabela 7. Já a unidade de sobrecorrente pode utilizar a magnitude de corrente de sequência negativa ou de sequência zero, conforme pode ser visto na Tabela 8. Observa-se, todavia, que para o modo de operação de sequência zero da unidade de sobrecorrente, poderá haver restrição por corrente de sequência positiva através do ajuste de K (ver ajuste *Positive-Sequence Restraint*), quando esta corrente for maior que 0,8 pu.

Tabela 7: Unidade direcional de sobrecorrente de sequência negativa.

Modo de operação	Corrente de operação	Condição
Sequência negativa	$I_{op} = I_{-2} - K \times I_{-1} $	
Sequência zero	$I_{op} = 3 \times (I_{01} - K \times I_{-1})$	se $ I_{-1} > 0,8 \text{ pu}$
Sequência zero	$I_{op} = 3 \times I_{01} $	se $ I_{-1} < 0,8 \text{ pu}$

Fonte: (GE, 2016).

Tabela 8: Unidade direcional de sequência negativa.

Modo de polarização	Direção	Fasores comparados
Sequência negativa	Para frente	$-V_{-2} + Z_{offset} \times I_{-2}$ e $I_{-2} \times 1 \angle ECA$
Sequência negativa	Para trás	$-V_{-2} + Z_{offset} \times I_{-2}$ e $-(I_{-2} \times 1 \angle ECA)$
Sequência zero	Para frente	$-V_{-2} + Z_{offset} \times I_{-2}$ e $I_{-2} \times 1 \angle ECA$
Sequência zero	Para trás	$-V_{-2} + Z_{offset} \times I_{-2}$ e $-(I_{-2} \times 1 \angle ECA)$

Fonte: (GE, 2016).

A Figura 10 exemplifica o funcionamento da unidade direcional polarizada por tensão de sequência negativa para uma falta similar à da Figura 7, porém com ECA e ângulos limites diferentes. Observa-se que o funcionamento é o mesmo, porém com variáveis diferentes na atuação, como pode ser visto no diagrama lógico para o elemento direcional de sobrecorrente de sequência negativa na Figura 12.

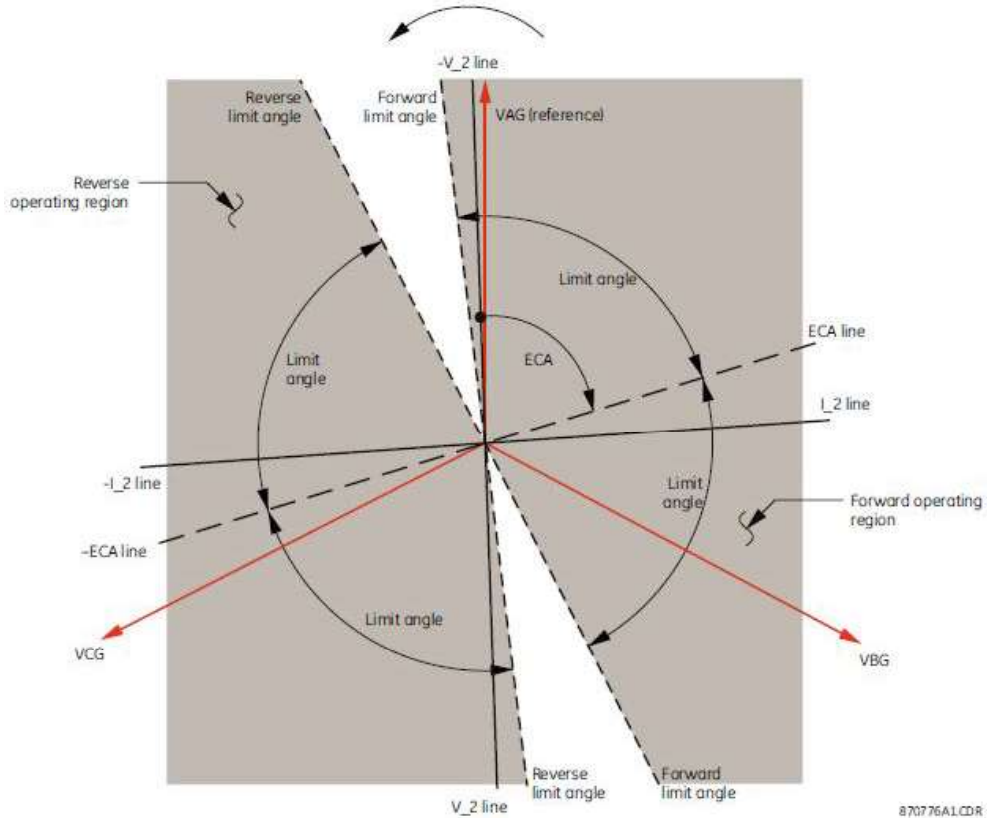
A Figura 11 é a visualização da tela de configuração da função direcional de sobrecorrente de sequência negativa do relé GE D90Plus e a Tabela 9 indica apenas o ajuste diferente daqueles existentes na Tabela 5, devido à grande similaridade entre os elementos direcionais de sobrecorrente de neutro e de sequência negativa.

Tabela 9: Parâmetros, faixas de ajustes e observações para ajuste da função direcional de sobrecorrente de neutro do relé GE D90Plus.

Parâmetro	Faixa de ajustes	Observações
<i>Type</i>	<i>Neg Sequence, Zero Sequence</i>	Seleciona o modo de operação da unidade de sobrecorrente

Fonte: Autoria própria.

Figura 10: Característica do direcional de neutro para polarização por tensão.



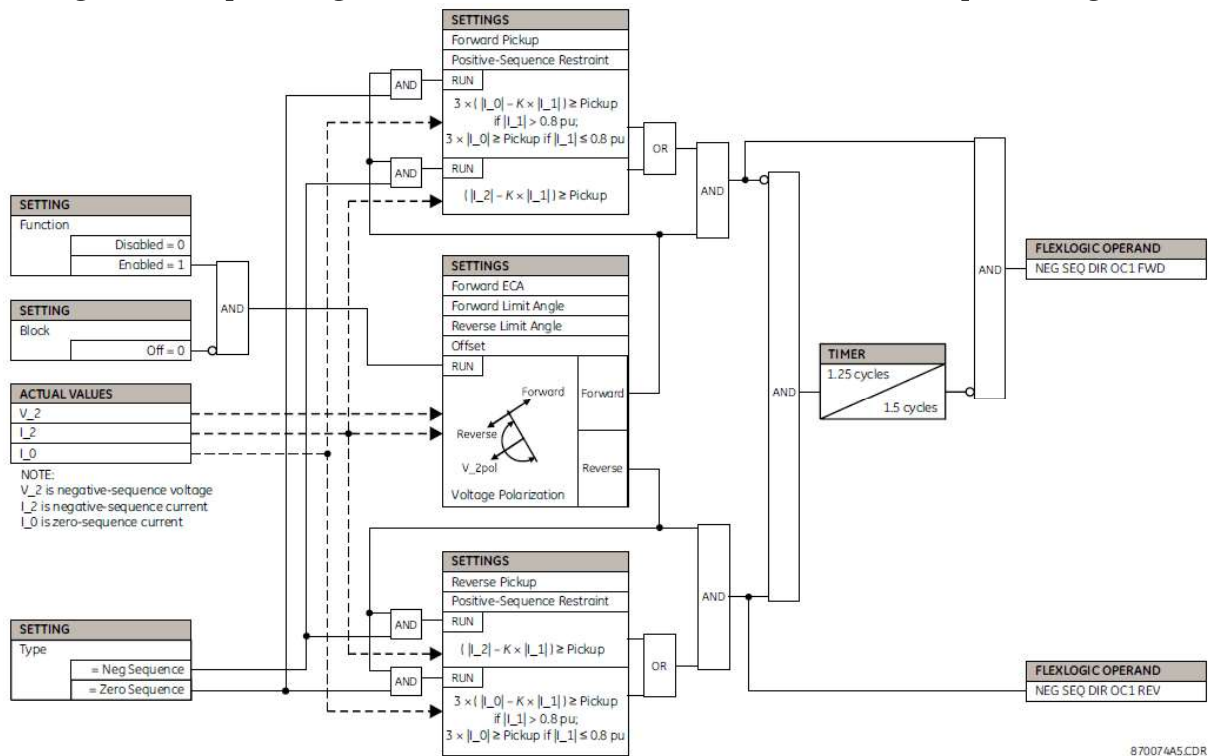
Fonte: (GE, 2016).

Figura 11: Configuração de ajustes do direcional de sobrecorrente de sequência negativa.

PARAMETER	NEGATIVE SEQ DIR OC1	NEGATIVE SEQ DIR OC2
Function	Disabled	Disabled
Source	LINE (SRC 1)	LINE (SRC 1)
Offset	0.00 ohms	0.00 ohms
Type	Neg Sequence	Neg Sequence
Positive-Sequence Restraint	0.063	0.063
Forward ECA	75 ° Lag	75 ° Lag
Forward Limit Angle	90 deg	90 deg
Forward Pickup	0.05 pu	0.05 pu
Reverse Limit Angle	90 deg	90 deg
Reverse Pickup	0.05 pu	0.05 pu
Block	OFF	OFF
Events	Disabled	Disabled

Fonte: (GE, 2016).

Figura 12: Esquema lógico do elemento direcional de sobrecorrente de sequência negativa.



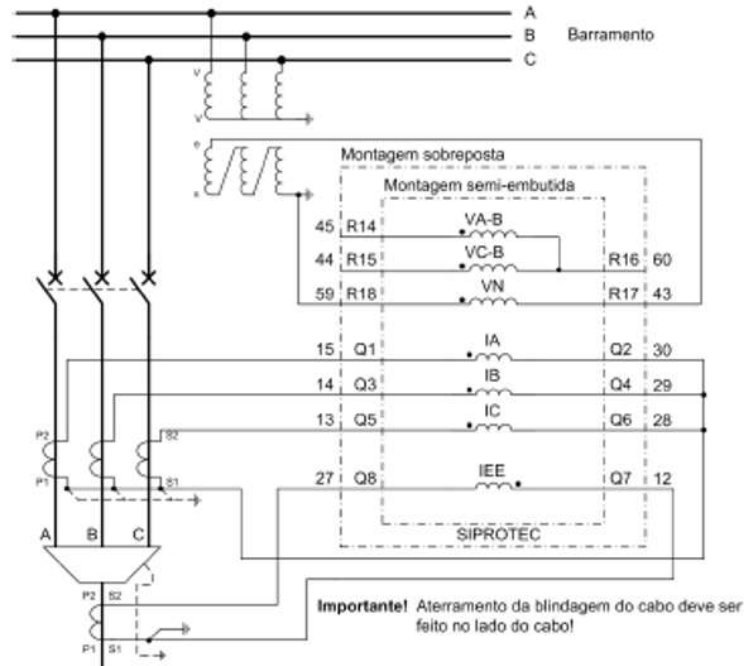
Fonte: (GE, 2016).

2.3.2 FUNÇÃO DIRECIONAL DO RELÉ SIEMENS 7SJ62

Os elementos direcionais do relé SIEMENS 7SJ62, podem ser polarizados por tensão de sequência positiva, de sequência negativa ou de sequência zero (SIEMENS, 2007). Na Figura 13 são mostradas as diversas conexões necessárias ao funcionamento do elemento. Para as medições das tensões e correntes, este relé possui quatro entradas analógicas. Para as três correntes de fase, IA, IB e IC, através de seus respectivos TCs ligados aos terminais Q1 a Q6 e medição de neutro (terra), através da entrada IEE com a ligação de um TC aos terminais Q7 e Q8. As tensões fase-fase são medidas no relé através de TPs com seus secundários ligados em VA-B e VC-B, conectados em R14, R15 e R16. Além disso, possui uma entrada analógica de tensão para medição de tensão de neutro, conectada através de TP em R17 e R18.

Segundo o manual do relé 7SJ62/63/64 da Siemens (SIEMENS, 2007), a determinação da direção de falta é executada de forma independente para cada um dos quatro elementos direcionais, três fases, terra ou soma de corrente 3I0. A determinação da direção da falta é determinada pela diferença entre os ângulos da corrente de falta e da tensão de referência.

Figura 13: Diagrama parcial de uma ligação possível do relé SIEMENS 7SJ62.



Fonte: (SIEMENS, 2007).

2.3.2.1 MÉTODO DE DEFINIÇÃO DA DIREÇÃO

Para o cálculo da direcionalidade de uma falta para os elementos de fase, a corrente de curto-circuito é obtida da fase afetada e a referência de ângulo é retirada da tensão fase-fase das outras duas fases. No caso de faltas trifásicas, onde as tensões tornam-se desprezíveis e não permitindo sua utilização como referência, os relés da Siemens armazenam dois ciclos em memória que são suficientes para a determinar a direção da falta. Caso o fechamento ocorrer sob falta e não existirem valores de tensão armazenados, ocorre o *trip* do elemento mesmo sem a direção da falta ser conhecida.

Para as faltas à terra dois métodos de detecção estão disponíveis: por sequência zero e por sequência negativa.

2.3.2.2 DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO COM SISTEMA DE SEQUÊNCIA ZERO

A direção de uma falta à terra pode ser determinada pela comparação entre as grandezas de sequência zero do sistema. O elemento de corrente usa a corrente de neutro, IEE, já o elemento de tensão usa a tensão VN como referência, desde que estas estejam conectadas ao relé. Caso contrário, o relé calcula a corrente de terra somando fasorialmente as três correntes

de fases e a tensão de referência somando fasorialmente as tensões trifásicas de sequência zero ($3V_0$). Caso a tensão V_N ou $3V_0$ não seja suficiente para ser usada como referência, a direção para este elemento ficará indeterminada, não sendo gerado *trip* através dos elementos direcionais de terra.

2.3.2.3 DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO COM SISTEMA DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

A determinação da direção da falha pela sequência negativa utiliza a corrente de sequência negativa e as tensões de sequência negativa, como valores de atuação e referência, respectivamente. Como ocorre no sistema de sequência zero, a determinação da direção, no sistema de sequência negativa, somente será válida caso os valores para a determinação da direção superem o mínimo exigido. Senão, a direção não é determinada.

2.3.2.4 TENSÕES DE POLARIZAÇÃO CRUZADA PARA DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO

Na Tabela 10 podemos ver que para uma sobrecorrente numa das fases, são usadas como referência, a diferença entre as tensões das fases opostas.

Já num curto-circuito fase-terra, Tabela 11, fase-fase, Tabela 12, fase-fase-terra, Tabela 13, trifásico e trifásico-terra, Tabela 14, a determinação da direção da falha, pode ser dada por dois ou mais elementos. Os relés da Siemens utilizam esta particularidade do sistema trifásico para o cruzamento de informações, de forma a garantir a correta localização da falta desde que os valores correspondentes tenham magnitudes suficientes para a partida do elemento direcional. A esta característica a Siemens chama referência cruzada.

Tabela 10: Valores medidos para a determinação da direção da falta de fase-terra.

<i>Pickup</i>	Elemento Direcional							
	A		B		C		N	
	Corr.	Tens.	Cor.	Tens.	Corr.	Tens.	Corr.	Tens.
A	I_A	$V_B - V_C$	-	-	-	-	-	-
B	-	-	I_B	$V_C - V_A$	-	-	-	-
C	-	-	-	-	I_C	$V_A - V_B$	-	-
N	-	-	-	-	-	-	I_N	V_N

Fonte: (SIEMENS, 2007).

Tabela 11: Valores medidos para a determinação da direção da falta fase-neutro.

<i>Pickup</i>	Elemento Direcional							
	A		B		C		N	
	Corr.	Tens.	Cor.	Tens.	Corr.	Tens.	Corr.	Tens.
A,N	I_A	$V_B - V_C$	-	-	-	-	I_N	V_N
B,N	-	-	I_B	$V_C - V_A$	-	-	I_N	V_N
C,N	-	-	-	-	I_C	$V_A - V_B$	I_N	V_N

Fonte: (SIEMENS, 2007).

Tabela 12: Valores medidos para a determinação da direção da falta fase-fase.

<i>Pickup</i>	Elemento Direcional							
	A		B		C		N	
	Corr.	Tens.	Cor.	Tens.	Corr.	Tens.	Corr.	Tens.
A,B	I_A	$V_B - V_C$	I_B	$V_C - V_A$	-	-	-	-
B,C	-	-	I_B	$V_C - V_A$	I_C	$V_A - V_B$	-	-
A,C	I_A	$V_B - V_C$	-	-	I_C	$V_A - V_C$	-	-

Fonte: (SIEMENS, 2007).

Tabela 13: Valores medidos para a determinação da direção da falta fase-fase-neutro.

<i>Pickup</i>	Elemento Direcional							
	A		B		C		N	
	Corr.	Tens.	Cor.	Tens.	Corr.	Tens.	Corr.	Tens.
A,B,N	I_A	$V_B - V_C$	I_B	$V_C - V_A$	-	-	I_N	V_N
B,C,N	-	-	I_B	$V_C - V_A$	-	-	I_N	V_N
A,C,N	I_A	$V_B - V_C$	-	-	I_C	$V_A - V_B$	I_N	V_N

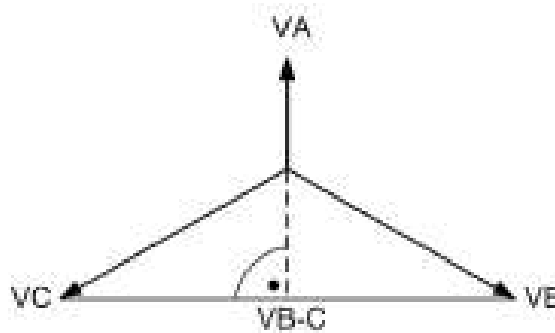
Fonte: (SIEMENS, 2007).

Tabela 14: Valores medidos para a determinação da direção da falta trifásica e trifásica-neutro.

<i>Pickup</i>	Elemento Direcional							
	A		B		C		N	
	Corr.	Tens.	Cor.	Tens.	Corr.	Tens.	Corr.	Tens.
A,B,C	I_A	$V_B - V_C$	I_B	$V_C - V_A$	I_C	$V_A - V_B$	-	-
A,B,C,N	I_A	$V_B - V_C$	I_B	$V_C - V_A$	I_C	$V_A - V_B$	I_N	V_N

Fonte: (SIEMENS, 2007).

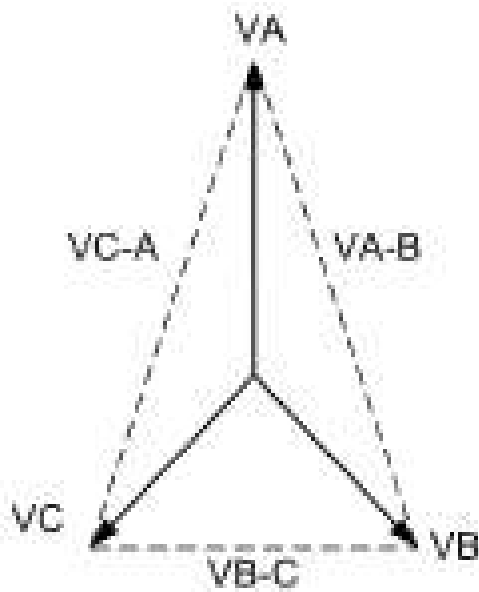
A Figura 14 mostra uma falha na fase A para terra. Verificamos que a tensão na fase faltosa está a 90° da tensão de referência ($V_B - V_C$).

Figura 14: Falta Fase-Terra (A-N).

Fonte: (SIEMENS, 2007).

Para as faltas fase-fase, o ângulo entre a tensão de referência e as tensões faltosas varia entre 90° e 60° . Quanto mais remota a falta, maior será este ângulo, como mostra a Figura 15, onde as fases B e C estão em curto-circuito e a referência pode estar em VCA ou VAB (polarização cruzada).

Figura 15: Falta Fase-Fase (B-C).



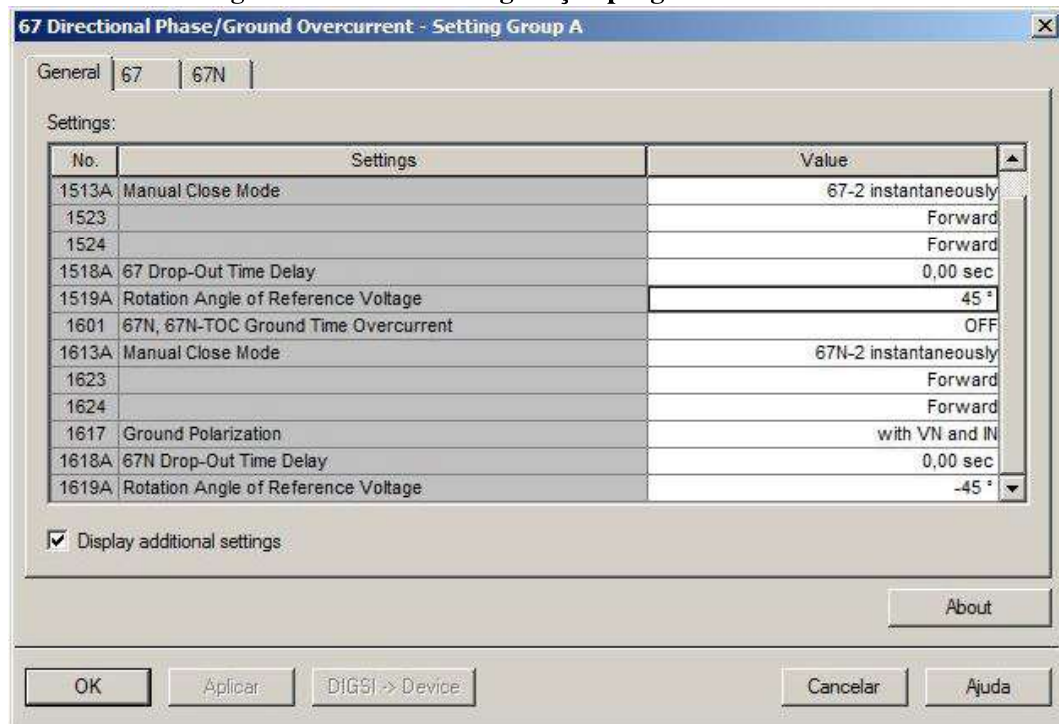
Fonte: (SIEMENS, 2007).

2.3.2.5 DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DOS ELEMENTOS DIRECIONAIS DE FASE

A direção da falta é determinada pela diferença entre o ângulo de fase da corrente de atuação e da tensão de referência (SIEMENS, 2007). Dependendo da configuração da rede, o ângulo da tensão de referência pode ser rotacionado até um valor muito próximo do ângulo da corrente de falta. Este procedimento facilita a determinação da direção da falta.

A Figura 16 é uma tela exemplo de configuração do ângulo de rotação, ajustes 1519 e 1619, no relé Siemens, através do programador DIGSI4.

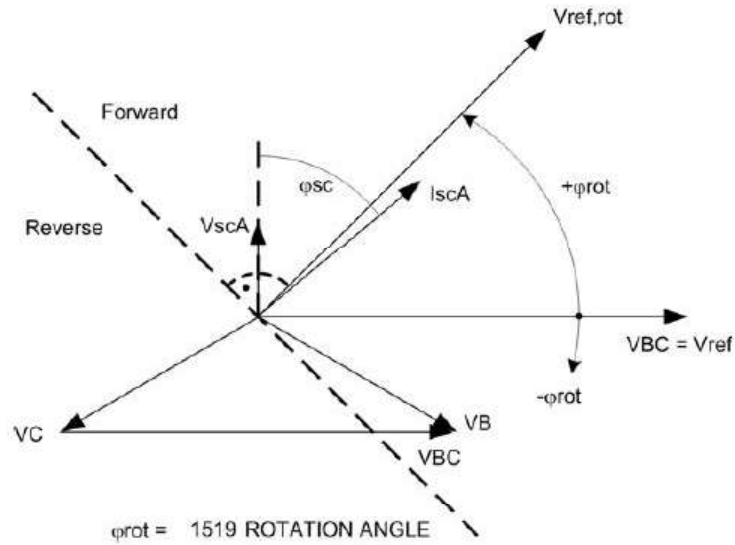
Figura 16: Tela de configuração programador DIGSI.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 17 mostra como se comportam os elementos direcionais para uma falta monopolar na fase A para terra. Verificamos que a corrente de curto-circuito, I_{scA} , segue a tensão de falta com o ângulo ϕ_{sc} . A tensão de referência VBC, é rotacionada gerando o fasor ($V_{ref,rot}$) com um ângulo ϕ_{rot} , o qual é configurado pelo ajuste 1519 *ROTATION ANGLE*. No caso apresentado, uma rotação de $+45^\circ \phi_{rot}$ para VBC.

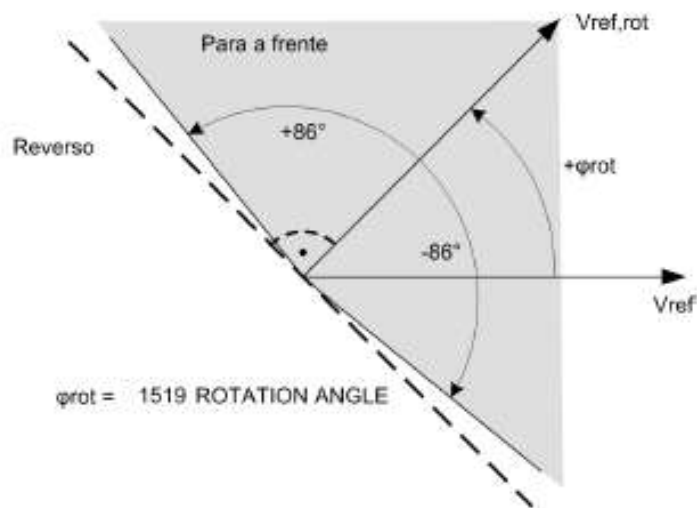
Figura 17: Rotação da tensão de referência, elemento direcional de fase.



Fonte: (SIEMENS, 2007).

Ao redor do vetor $V_{ref,rot}$ é criada uma área com um ângulo de $\pm 86^\circ$, conforme Figura 18. Uma corrente de falta nessa área indica direção para frente e caso esta corrente apareça na área oposta a indicação é de falta para trás. Já na área intermediária a direção fica indefinida.

Figura 18: Característica para frente da função direcional, elemento direcional de fase.

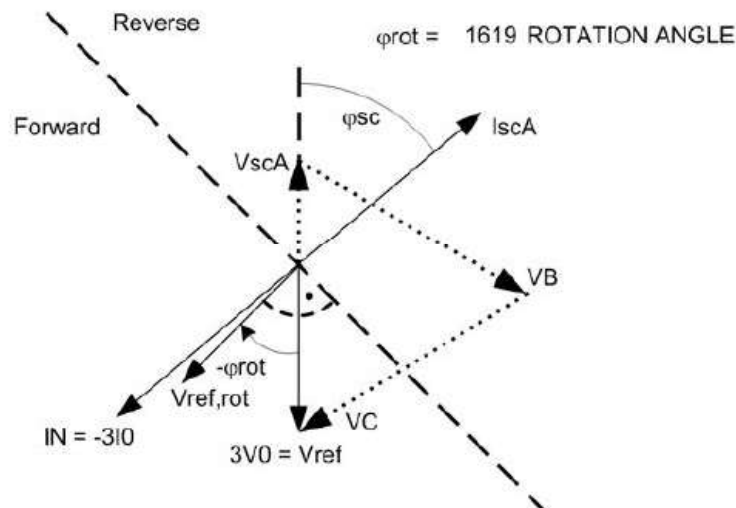


Fonte: (SIEMENS, 2007).

2.3.2.6 DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DO ELEMENTO DIRECIONAL DE TERRA COM VALORES DE TERRA

Para o elemento direcional de terra, como vemos na Figura 19, a tensão de referência é a própria tensão de falta, ou seja, $3V_0$ (ou V_N), rotacionada pelo ângulo (φ_{rot}). A corrente de falta $-3I_0$ aparece do lado oposto à corrente de falta I_{scA} . Da mesma forma que o elemento de fase, a tensão de referência $V_{ref,rot}$ do elemento de terra forma uma área de $\pm 86^\circ$ ao redor deste fasor. Esta área define uma falta para frente e na área oposta, falta reversa. A rotação da tensão de referência é feita pelo ajuste 1619 *ROTATION ANGLE*. No caso da Figura 19, uma rotação de -45° .

Figura 19: Rotação de tensão de referência, elemento direcional de terra com valores de sequência zero.



Fonte: (SIEMENS, 2007).

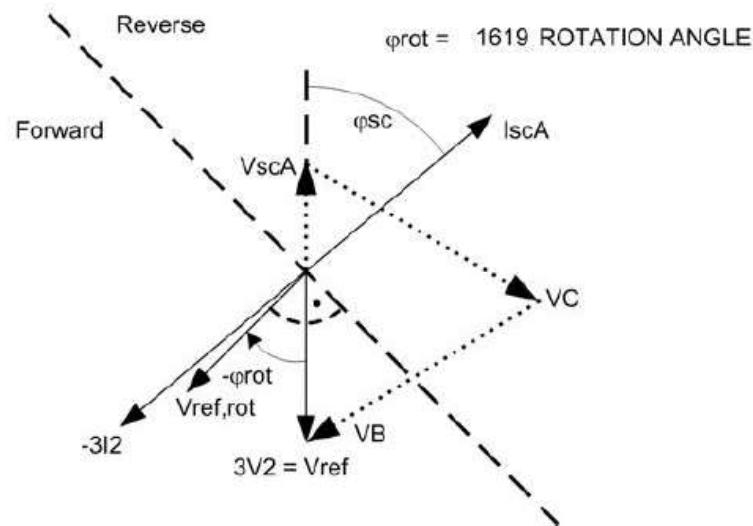
A área para frente é também uma faixa de $\pm 86^\circ$ ao redor da tensão de referência $V_{ref,rot}$. Se o vetor da falta de corrente $-3I_0$ (ou I_N) estiver nessa área, o relé detecta a direção para frente.

2.3.2.7 DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DO ELEMENTO DIRECIONAL DE TERRA COM VALORES DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

A Figura 20 mostra o posicionamento dos fasores da tensão de referência e da corrente de falta utilizando os valores de sequência negativa. A corrente de falta é a mesma usada nos exemplos anteriores (I_{scA}) e verificamos que a corrente $-3V_2$ esta posicionada exatamente sobre a corrente de neutro $-3I_0$. Como os valores para a sequência negativa são os mesmos da

sequência zero, o ângulo de $V_{ref,rot}$ também é feito pelo ajuste 1619 *ROTATION ANGLE*.

Figura 20: Rotação da tensão de referência, elemento direcional de falta de terra com valores de sequência negativa.



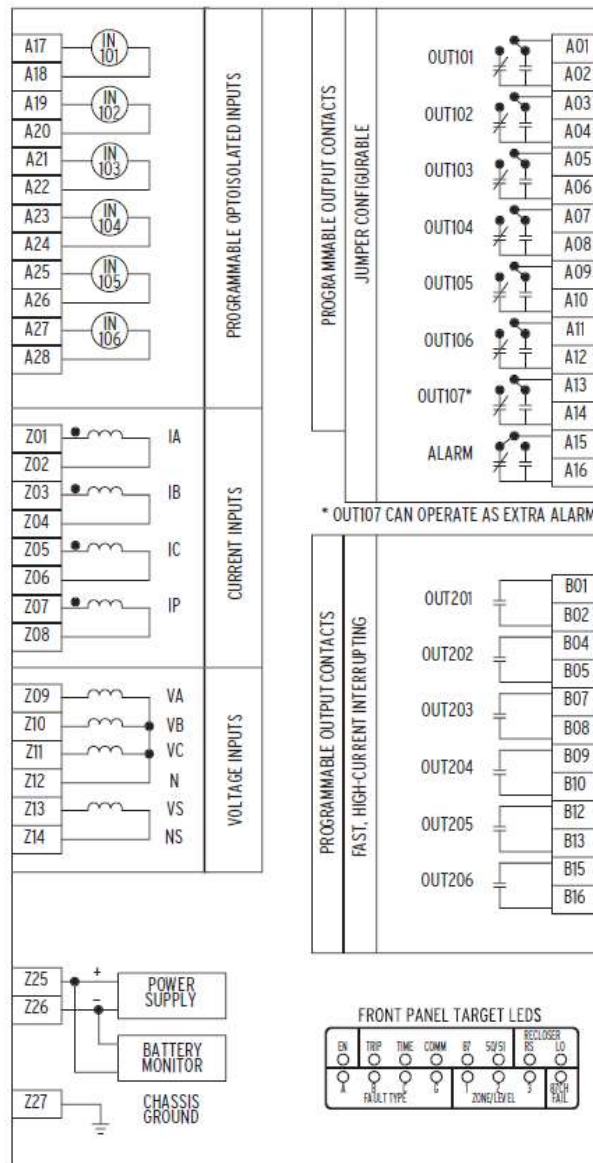
Fonte: (SIEMENS, 2007).

Como na sequência zero, a faixa de $\pm 86^\circ$ ao redor da tensão de referência $V_{ref,rot}$ limita a área para a indicação de falta para frente. Caso a corrente de falta encontre-se na área oposta ao fasor $V_{ref,rot}$, a falta está na direção reversa.

2.3.3 FUNÇÃO DIRECIONAL DO RELÉ *SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES* (SEL)

De acordo com o manual do fabricante (SEL, 2011), os elementos direcionais do relé SEL-311L, podem ser polarizados por tensão de sequência negativa, sequência zero ou polarizado por medição de corrente. Para tanto, como mostra a Figura 21, este relé possui quatro entradas analógicas de corrente para serem utilizadas para medição das três correntes de fase, IA, IB e IC, através de seus respectivos TCs ligados aos terminais Z01 a Z06 e caso se deseje utilizar a polarização direcional por corrente, utiliza-se a entrada IP para ligação de um TC aos terminais Z07 e Z08. As tensões de fase são medidas no relé através de TPs com seus secundários ligados em conexão estrela, sendo o ponto comum conectado em Z12 e as fases VAN, VBN e VCN, conectados respectivamente em Z09, Z10 e Z11. Além disso, possui uma entrada analógica de tensão para sincronismo entre linhas, conectado através de TP em Z13 e Z14.

Figura 21: Entradas e saídas do relé SEL-311L.



Fonte: (SEL, 2011).

2.3.3.1 ELEMENTO DIRECIONAL DE IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

Quando a potência da fonte atrás do relé é muito forte, a tensão de sequência negativa é reduzida durante a falta. Em consequência disso, a impedância também será reduzida, diminuindo a sensibilidade do relé (FLEMING, 1998).

Com o objetivo de melhorar o desempenho da função direcional, a SEL utiliza em seus relés o elemento direcional baseado na impedância de sequência negativa. Assim, utilizando as mesmas grandezas do elemento tradicional, ao invés de usar o produto da tensão pela corrente de sequência negativa, utiliza-se a relação entre estas duas grandezas, ou seja, a impedância.

Desta forma, mesmo para tensões de sequência negativa muito pequenas é possível identificar a direcionalidade da falta (FLEMING, 1998).

Os ajustes necessários para o controle direcional com polarização por tensão de sequência negativa no relé SEL-311L, são realizados em conformidade com as Figuras 22, 23, 24 e 25 , explicados a seguir:

- 50QFP: é a corrente de partida para a direção à frente. Quando a corrente de sequência negativa $|3I_2|$ for maior que este ajuste, é ativada a saída 50QF. Segundo o fabricante, idealmente é ajustado com um valor maior que a corrente desbalanceada para carga nominal (I_{2n}) e menor que a mais baixa magnitude da corrente esperada para uma falta desbalanceada à frente (I_{2ccf}), ou seja:

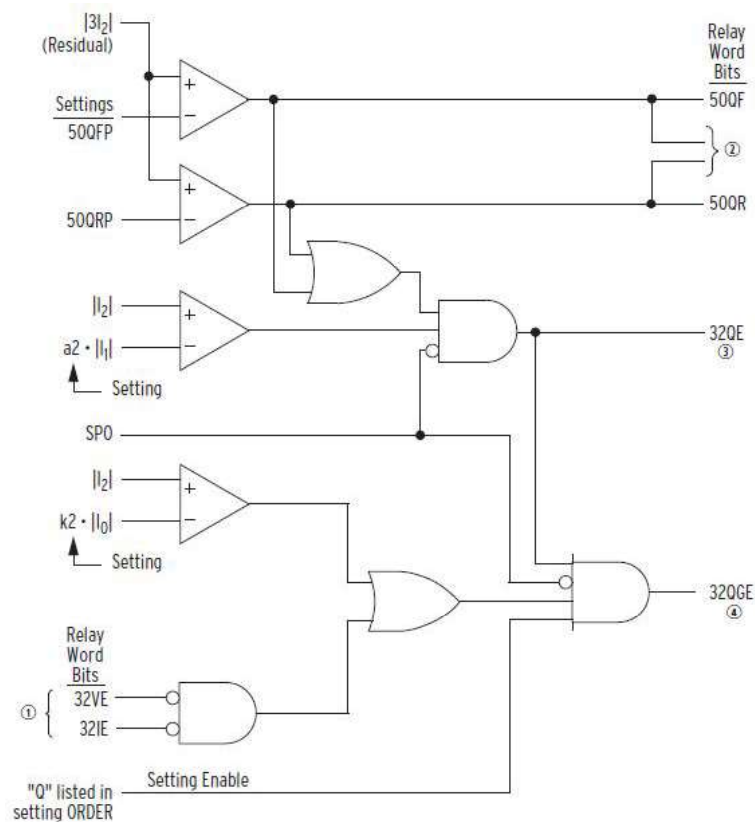
$$3.I_{2n} < 50QFP < 3.I_{2ccf} \quad (3)$$

- 50QRP: é a corrente de partida para a direção reversa. Quando a corrente de sequência negativa $|3I_2|$ for maior que este ajuste, é ativada a saída 50QR. O fabricante recomenda que este seja ajustado com um valor maior que a corrente desbalanceada para carga nominal (I_{2n}), e menor que a mais baixa magnitude da corrente esperada para uma falta desbalanceada reversa (I_{2ccr}) (SEL, 2011), ou seja:

$$3.I_{2n} < 50QRP < 3.I_{2ccr} \quad (4)$$

- 50QRP e 50QFP possuem ajustes entre 0,25 e 5A secundário para corrente nominal de entrada para TCs de 5A ou entre 0,05 e 1A secundário para corrente nominal de entrada para TCs de 1A.
- a_2 : é o fator de restrição por corrente de sequência positiva, dado por $|I_2|/|I_1|$. É ajustado com um valor entre 0,02 e 0,5 (adimensional). Este fator tem a função de aumentar a segurança do elemento direcional de sequência negativa, prevenindo sua atuação quando houver, por exemplo, operação em sistema fortemente desbalanceado, em casos de falta trifásicas, em que há saturação dos TCs, etc (SEL, 2011).
- k_2 : é o fator de restrição por corrente de sequência zero, dado por $|I_2|/|I_0|$. É ajustado com um valor entre 0,10 e 1,20 (adimensional). Este fator assegura que o relé irá utilizar os valores mais consistentes para tomar as decisões sobre a direção da distância de falta à terra e sobrecorrentes residuais de terra (SEL, 2011).

Figura 22: Primeira etapa da lógica de ativação do elemento direcional de sequência negativa polarizado por tensão.



Fonte: (SEL, 2011).

Na Figura 23 temos a lógica onde a impedância Z_2 é calculada através da tensão e corrente de sequência negativa (V_2 e I_2 , respectivamente). Nesta lógica também são indicadas as habilitações 50Q e 32Q oriundas da lógica anterior, Figura 22. Os ajustes e habilitações para esta etapa são:

- Z_2F : ajuste utilizado para calcular o menor valor de impedância de sequência negativa para a qual uma falta é considerada à frente, conforme indicado na Figura 24:
 - Se $Z_2F \leq 0$, então $Forward\ Threshold = 0,75 \times Z_2F - 0,25 \times |V_2/I_2|$;
 - Se $Z_2F > 0$, então $Forward\ Threshold = 1,25 \times Z_2F - 0,25 \times |V_2/I_2|$.
- Z_2R : ajuste utilizado para calcular o menor valor de impedância de sequência negativa para a qual uma falta é considerada reversa, conforme indicado na Figura 24:
 - Se $Z_2R \leq 0$, então $Reverse\ Threshold = 0,75 \times Z_2R + 0,25 \times |V_2/I_2|$;
 - Se $Z_2R > 0$, então $Reverse\ Threshold = 1,25 \times Z_2R + 0,25 \times |V_2/I_2|$.

- Z2F e Z2R são avaliados como impedâncias de sequência negativa e possuem ajustes entre $-64,00$ e $+64,00\Omega$, secundário, para corrente nominal de entrada com TC de 5A ou entre $-320,00$ e $+320,00\Omega$, secundário, para corrente nominal de entrada com TC de 1A. O fabricante recomenda que, quando forem realizados pelo usuário, o ajuste Z2R deve ser maior que o ajuste Z2F em pelo menos $0,1\Omega$, quando usando TC de 5A nominal e, pelo menos, $0,5\Omega$, para TC de 1A nominal.

Uma vez ultrapassados os limites ajustados em 50QFP, 50QRP e a2, as saídas 50QF, 50QR e 32QE serão habilitadas, atuando conforme a Figura 23. Além disso, ultrapassando o limite ajustado em k2, a saída 32QGE também será habilitada e as atuações ocorrerão conforme a Figura 24. Assim:

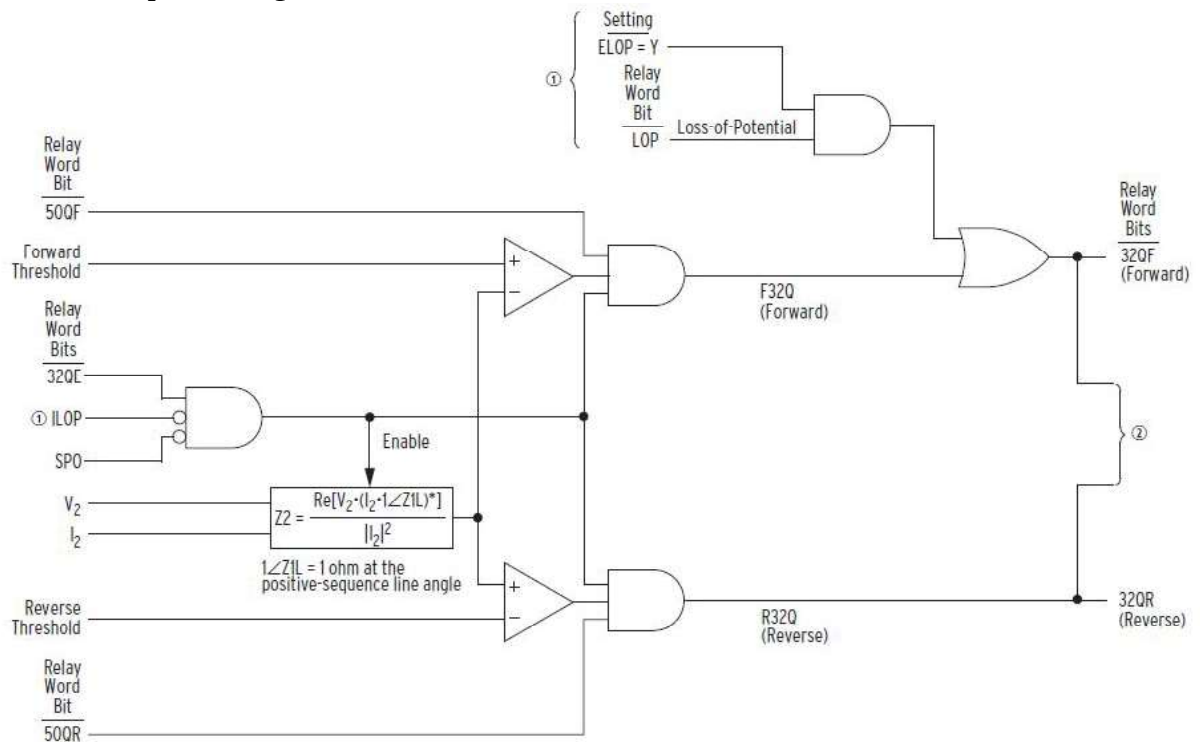
- 50QF e 50QR: são palavras internas e acessíveis, que diferem quando a falta é à frente ou reversa, respectivamente.
- 32QE/32QGE: é uma palavra interna e acessível que habilita o cálculo da impedância de sequência negativa para verificação do limiar de falta à frente ou reversa e também habilita a próxima fase de verificação do relé. O cálculo da impedância de sequência negativa é dado por:

$$Z2 = Re[V_2x(I_2x1\angle Z1L)^*]/|I_2|^2 \quad (5)$$

onde, $1\angle Z1L = 1\Omega$ com o ângulo da impedância de sequência positiva.

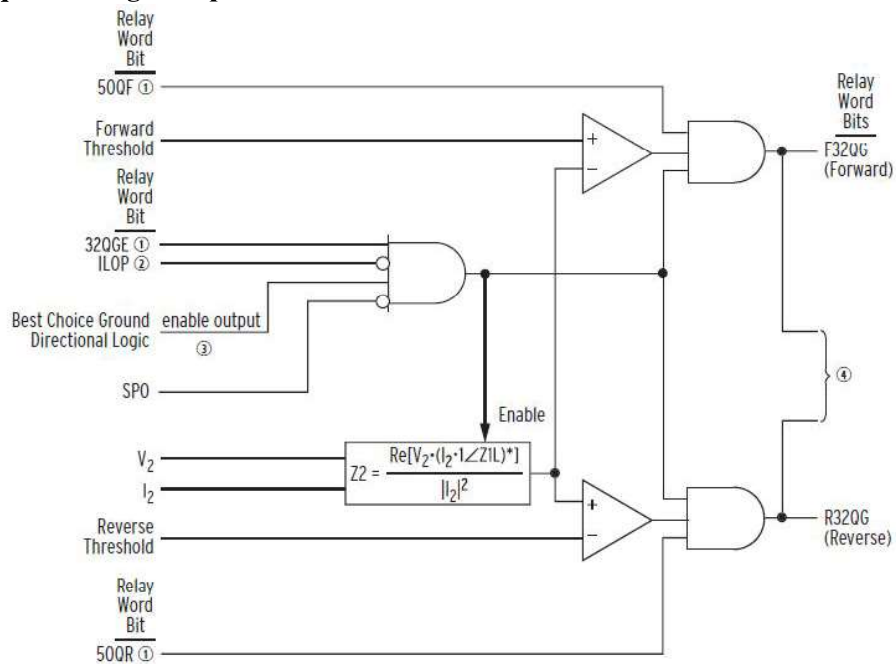
Assim, observa-se que, de forma dinâmica, são calculados os ajustes limitadores (*Forward Threshold* e *Reverse Threshold*) a partir dos ajustes de usuário Z2F e Z2R, para comparação com a impedância de sequência negativa (Z2). Quando a comparação gerar uma saída ativa em um dos comparadores das Figuras 23 e 24, as demais condições já terão sido atendidas e haverá a habilitação de uma das saídas 32QF, 32QR, F32QG ou R32QG, conforme o caso para falta à frente ou reversa, para controle direcional de outras funções do relé.

Figura 23: Segunda parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência negativa.



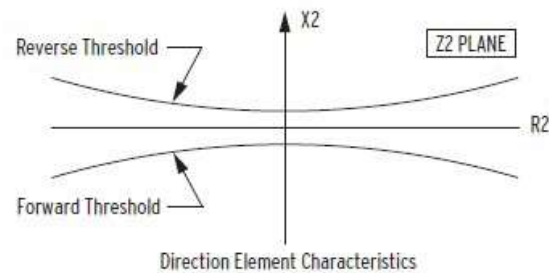
Fonte: (SEL, 2011).

Figura 24: Segunda parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência negativa para faltas envolvendo a terra.



Fonte: (SEL, 2011).

Figura 25: Plano Z2 com os limites de impedância de sequência negativa para faltas à frente e reversas.



Forward Threshold:

$$\text{If } Z2F \text{ Setting} \leq 0, \text{ Forward Threshold} = 0.75 \cdot Z2F - 0.25 \cdot \left| \frac{V_2}{I_2} \right|$$

$$\text{If } Z2F \text{ Setting} > 0, \text{ Forward Threshold} = 1.25 \cdot Z2F - 0.25 \cdot \left| \frac{V_2}{I_2} \right|$$

Reverse Threshold:

$$\text{If } Z2R \text{ Setting} \geq 0, \text{ Reverse Threshold} = 0.75 \cdot Z2R + 0.25 \cdot \left| \frac{V_2}{I_2} \right|$$

$$\text{If } Z2R \text{ Setting} < 0, \text{ Reverse Threshold} = 1.25 \cdot Z2R + 0.25 \cdot \left| \frac{V_2}{I_2} \right|$$

Fonte: (SEL, 2011).

De forma similar ao que é ajustado para o controle direcional polarizado por tensão de sequência negativa, o relé SEL-311L pode ser ajustado para atuar no controle direcional através da polarização por tensão de sequência zero. Neste caso, e conforme as Figura 26 e 27, os ajustes serão em 50GFP, 50GRP, a0, Z0F e Z0R, sendo que:

- 50GFP e 50GRP: dependem da corrente de sequência zero $|3I_0|$ e são ajustados semelhantemente a 50QFP e 50QRP apresentados anteriormente.
- a0: é também um fator de restrição de corrente de sequência positiva, dado por $|I_0|/|I_1|$ e é ajustado da mesma maneira que a2.
- Z0F e Z0R: são os ajustes para cálculo das menores impedâncias de sequência zero que são consideradas faltas à frente ou reversas, análogo aos ajustes Z2F e Z2R. O comparativo para atuação deste ajuste é a variável da impedância de sequência zero (Z0) dada por:

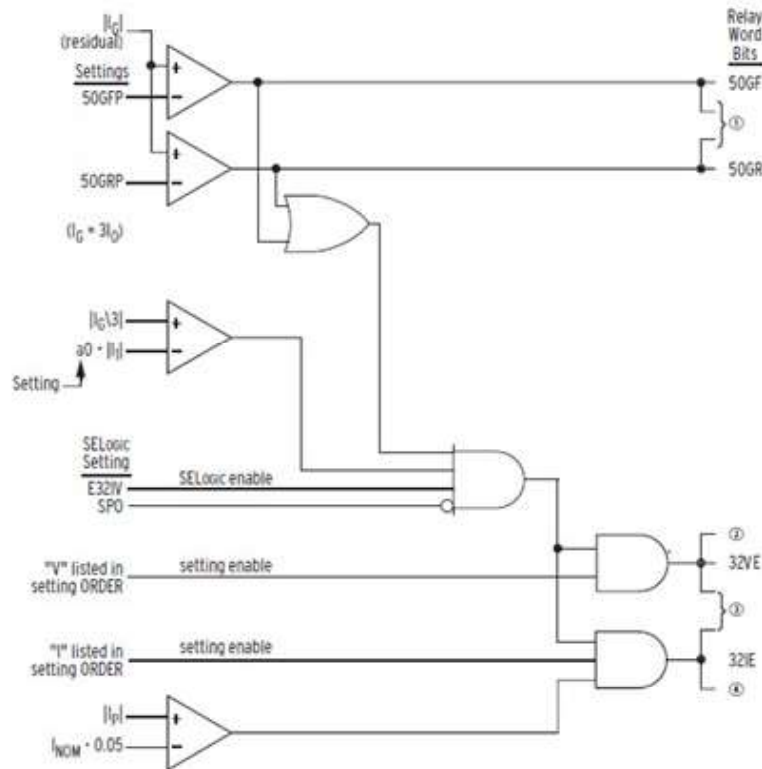
$$Z0 = \text{Re}[3V_0x(3I_0x1\angle Z0L)^*]/|3I_0|^2 \quad (6)$$

onde $1\angle Z0L = 1$ é o ângulo da impedância característica de sequência zero.

Neste trabalho apresentamos os valores de $|3I_2|$ e $|3I_0|$ numa excursão de faltas à frente e reversa, auxiliando na decisão de quais valores de ajuste utilizar em 50QFP, 50QRP, 50GFP e

50GRP. Também são apresentados os valores de comportamento esperado para os ajustes de a2, k2 e a0 para a série de faltas, além dos valores esperados de Z2 e Z0, que subsidiarão os ajustes de Z2F, Z2R, Z0F e Z0R.

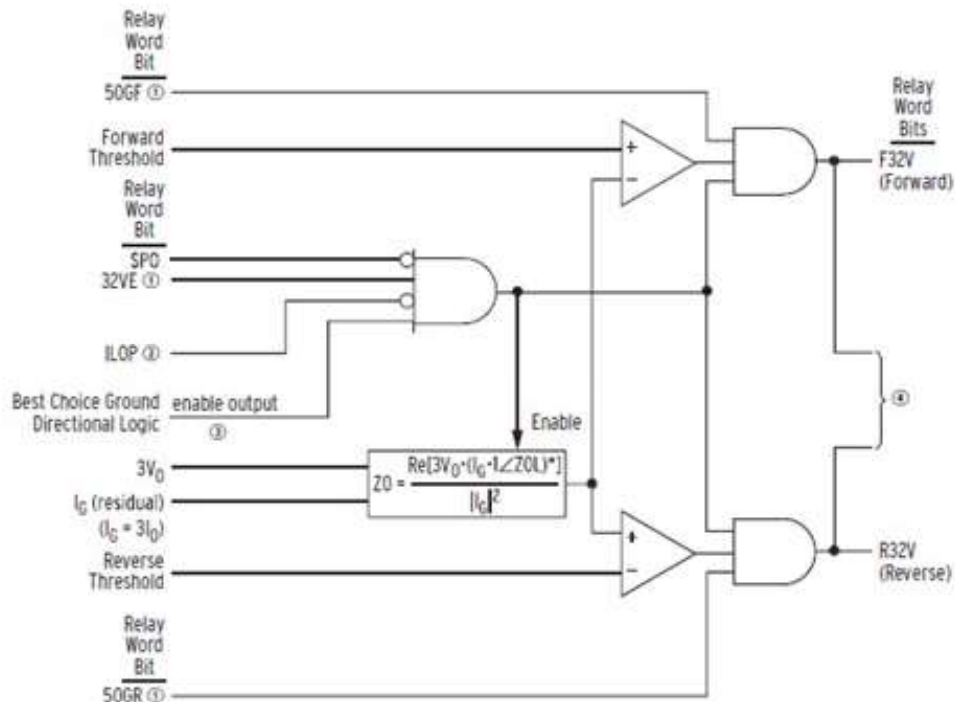
Figura 26: Primeira parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência zero.



Fonte: (SEL, 2011).

Considerando os ajustes Z1MAG como a impedância de sequência positiva e Z0MAG como a impedância de sequência zero da linha de transmissão e com base na corrente nominal de fase (IA, IB e IC) igual a 5A, a Tabela 15 mostra os valores possíveis para o ajuste da função direcional de sobrecorrente no relé SEL. Na coluna, Faixa de Ajuste, estão os valores possíveis no modo E32 em manual, já no modo E32 = AUTO, os dados são preenchidos automaticamente com os valores desta coluna.

Figura 27: Segunda parte da lógica de ativação do controle direcional através da polarização por tensão de sequência zero.



Fonte: (SEL, 2011).

Tabela 15: Faixa de ajuste de cada controle.

Controle	Faixa de Ajuste	Valor para E32 = "AUTO"
Z2F	-64 a +64 ohm	Z1MAG/2
Z2R	-64 a +64 ohm	Z1MAG/2 + 0,1
Z0F	-64 a +64 ohm	Z0MAG/2
Z0R	-64 a +64 ohm	Z0MAG/2 + 0,1
50QFP	0,25 a 5,00 A	0,5 A
50QRP	0,25 a 5,00 A	0,25 A
50GFP	0,25 a 5,00 A	0,50 A
50GRP	0,25 a 5,00 A	0,25 A
a0	0,02 a 0,50 (sem unidade)	0,1
a2	0,02 a 0,50 (sem unidade)	0,1
k2	0,10 a 1,20 (sem unidade)	0,2

Fonte: (SEL, 2011).

3 FERRAMENTAS UTILIZADAS

3.1 A LINGUAGEM PYTHON

A linguagem Python foi criada nos anos 90 por Guido van Rossum na *Stichting Mathematisch Centrum*, na Holanda baseada numa linguagem chamada ABC. Atualmente, Guido ainda é o principal autor do Python, embora receba muitas contribuições de outros. Em 1995, Guido continuou seu trabalho em Python na *Corporation for National Research Initiatives* (CNRI) em Reston, Virgínia, lançando várias versões do Python. No ano 2000, Guido e a equipe principal de desenvolvimento do Python mudaram-se para o *BeOpen.com* com a intenção de formar a equipe *BeOpen PythonLabs*. Em outubro do mesmo ano, toda a equipe da *PythonLabs* mudou-se para a *Digital Creations* (hoje *Zope Corporation*). Em 2001, foi criada a *Python Software Foundation* (PSF) cujo objetivo específico era manter a propriedade intelectual sobre a linguagem Python. A *Zope Corporation* continuou ligada ao Python como um membro patrocinador da PSF (PYTHON, 2018).

3.1.1 RAZÕES PARA A UTILIZAÇÃO DA LINGUAGEM PYTHON

No seu artigo, 10 motivos para você aprender Python, Kraus Peter Laube (LAUBE, 2009), descreve as razões pelas quais, na sua opinião, a linguagem Python é uma excelente opção para desenvolvimento:

- Livre e de código aberto: Sob licença da *Python Software Foundation*, similar à *General Public License* (GPL), porém pode-se distribuir os binários sem a necessidade de anexar seus códigos fontes, faz com que seja a primeira consideração para sua utilização;
- Multiplataforma: Como uma linguagem interpretada, o Python roda em qualquer sistema com o seu interpretador. Além disso, para quem tem intimidade com a linguagem Java, pode-se escrevê-lo em Jython como um dos “dialetos” do Python;
- Alto Nível: De desenvolvimento rápido (*Rapid Application Development* (RAD)) seguindo técnicas de DRY (*Don't Repeat Yourself*) e KISS (*Keep It Simple Stupid*), o Python é uma linguagem de alto nível e, portanto, inteligível;
- Orientada a Objetos: Sendo orientada a objetos, tudo para o Python é objeto, porém nada impede que se programe de uma forma estruturada ou funcional;

- Tipagem dinâmica forte: Ou seja, pode-se atribuir a uma variável qualquer tipo de valor e em qualquer momento do código;
- Sintaxe: Uma das características mais marcantes do Python é sua sintaxe. A limitação de um bloco de programa é feito através da indentação, forçando o programador a indentar seu código, dando mais clareza e legibilidade. Além disso, reduz consideravelmente o uso de caracteres especiais, tais como: `::`, `:=`, `,`, etc. Desta forma, com o Python é possível escrever um *for* que testa uma determinada sequência e monta uma lista em somente uma linha de programa;
- *Frameworks*: Por ser multiplataforma, com o Python é possível desenvolver para qualquer ambiente, seja *desktop*, *web* ou móvel. Para tanto, conta com *frameworks* que auxiliam desde o desenvolvimento web, de jogos ou algoritmos mais complexos de cálculos avançados;
- Mercado: Contando com grandes usuários como o *Youtube*, *EVE Online*, *Firaxis Games* e *Google*, o Python ganha mercado gradativamente sendo cultuada pelos entendidos do assunto. No Brasil podemos citar: Elipse Software, Globo.com, Mercado Livre, Intelbras, Zap Imóveis, Hotel Urbano, etc (PYTHONBR, 2018);
- Documentação: Além da extensa fonte de informações internacionais, no site da comunidade brasileira existe uma lista de fontes de estudos;
- Divertido: E, por fim, segundo o autor, o Python é extremamente divertido. Afirmando que a linguagem "reacendeu" sua paixão pelo mundo da programação.

Assim, nossa escolha pela linguagem Python foi determinada por alguns motivos já mencionados por Laube (2009), como ser uma linguagem livre e de código aberto, pela sua tipagem dinâmica e pela sintaxe limpa. Além dessas, podemos citar a sua multiplataforma que facilitará a continuidade deste projeto.

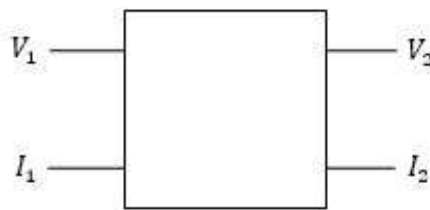
3.2 REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO ATRAVÉS DE QUADRIPOLOS

Para se avaliar o estado de um sistema de potência em regime permanente e na frequência fundamental, em geral se utiliza a análise do fluxo de potência, em que o sistema é representado pelo equivalente de sequência positiva. Desta forma, para os valores dos terminais ou pontos de interesse, o equivalente é facilmente transformado para sequência de fases. Porém quando o sistema está em desequilíbrio, o equivalente de sequência positiva não fornece mais

a solução completa. Assim, caso se deseje a resposta em regime permanente no domínio da frequência para um sistema em desequilíbrio, é necessária a representação dos componentes do circuito no domínio das fases (ALCAHUAMAN, 2013). A teoria de quadripolos apresenta uma boa solução para este caso.

Um quadripolo é uma rede de dois acessos em que os sinais podem entrar ou sair em cada par de terminais. Associando-se pares de tensão e corrente aos terminais do quadripolo e sendo o circuito linear, podemos relacionar as variáveis de diversas maneiras. Uma associação importante para os engenheiros de transmissão forma os “parâmetros de transmissão” A , B , C e D (JOHNSON JONH L. HILBURN, 1994). Sua representação genérica é conforme a Figura 28.

Figura 28: Representação genérica de um quadripolo com associação aos parâmetros de transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

Essa associação é importante pois representa as variáveis de uma porta (V_1, I_1), à outra porta (V_2, I_2) da seguinte forma:

$$\dot{V}_1 = A\dot{V}_2 + B\dot{I}_2 \quad (7)$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{V}_2 + D\dot{I}_2 \quad (8)$$

Ou em forma matricial:

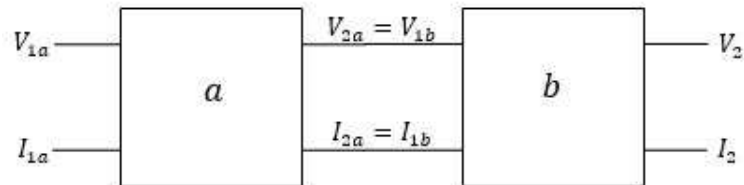
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde A é uma relação de tensão, B e C são respectivamente uma impedância e uma admitância de transferência e D é uma relação de corrente. Os inversos de A e de D fornecem os ganhos de tensão e de corrente do sistema.

Um bloco de quadripolo pode representar um subsistema, ou seja, um componente

de um sistema. Desta forma, os subsistemas podem ser associados convenientemente para representar um sistema completo (JOHNSON JONH L. HILBURN, 1994). Neste trabalho abordamos a associação em cascata, na qual a saída de um quadripolo é a entrada do próximo, conforme a Figura 29

Figura 29: Associação de quadripolos em cascata.



Fonte: Autoria Própria.

Matematicamente, a associação em cascata é representada pela multiplicação das matrizes dos quadripolos, desta forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_b & B_b \\ C_b & D_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sendo, portanto:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_b & B_b \\ C_b & D_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

Temos que:

$$A = A_a A_b + B_a C_b$$

$$B = A_a B_b + B_a D_b$$

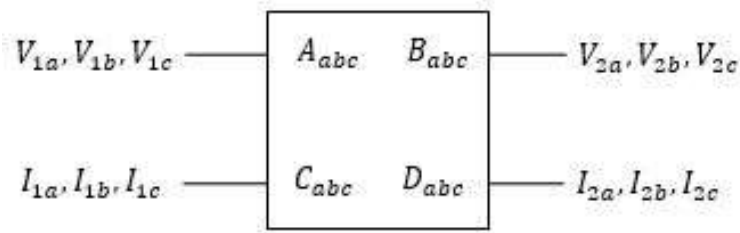
$$C = C_a A_b + D_a C_b$$

$$D = C_a B_b + D_a D_b$$

Alcahuaman (2013), em sua tese de doutorado “Otimização de linhas de transmissão para manobra de abertura monopolar – análise da influência dos parâmetros transversais do sistema de compensação reativa”, desenvolveu a representação dos componentes de um sistema elétrico desequilibrado em quadripolos trifásicos, para obter a resposta sustentada deste sistema.

A representação genérica de um quadripolo em um sistema trifásico é conforme a Figura 30 e a associação em cascata é realizada da mesma forma que em um quadripolo monopolar:

Figura 30: Representação genérica de um quadripolo trifásico com associação aos parâmetros de transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

Os valores dos parâmetros do quadripolo trifásico no domínio das fases, em forma matricial, são calculados com a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} A_{abc} & B_{abc} \\ C_{abc} & D_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{120} & B_{120} \\ C_{120} & D_{120} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde H é a matriz de transformação de Fortescue dada por:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

T é a matriz inversa de H e $a = 1 \angle 120^\circ$.

Para uma linha de transmissão, as submatrizes são (BERROCAL, 2017):

$$A_{120} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1.l) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2.l) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_0.l) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B_{120} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{c1} \cdot \sinh(\gamma_1.l) & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{c1} \cdot \sinh(\gamma_2.l) & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{c0} \cdot \sinh(\gamma_0.l) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C_{120} = \begin{bmatrix} \sinh(\gamma_1.l) / \bar{Z}_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_2.l) / \bar{Z}_{c2} & 0 \\ 0 & 0 & \sinh(\gamma_0.l) / \bar{Z}_{c0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$D_{120} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1.l) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2.l) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_0.l) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Tal que:

$$\bar{Z}_{c1} = \sqrt{\frac{Zl_1}{Yl_1}} \quad \bar{Z}_{c2} = \sqrt{\frac{Zl_2}{Yl_2}} \quad \bar{Z}_{c0} = \sqrt{\frac{Zl_0}{Yl_0}} \quad (18)$$

$$\gamma_1 = \sqrt{Zl_1.Yl_1} \quad \gamma_2 = \sqrt{Zl_2.Yl_2} \quad \gamma_0 = \sqrt{Zl_0.Yl_0} \quad (19)$$

E Zl_1 , Zl_2 , Zl_0 , Yl_1 , Yl_2 e Yl_0 , são parâmetros de impedâncias longitudinais e admitâncias transversais da linha.

A forma matricial de uma impedância trifásica utilizando-se os valores característicos em componentes simétricas é a seguinte (BERROCAL, 2017):

$$Z_{120} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \bar{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \bar{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \bar{Z}_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Já, uma falta monofásica, neste caso representado na fase A, tem a seguinte forma matricial (BERROCAL, 2017):

$$R_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1/R & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Onde R é a resistência do ponto de falta em ohm.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO

A aplicação criada foi dividida em três partes para se tornar mais organizada e facilitar o entendimento do desenvolvimento. A primeira parte, chamada de “globais” (*Codigo_67_globais.py*) é a parte da aplicação que contém as constantes globais e onde são realizados os cálculos de formação das matrizes constantes que serão utilizadas para, por exemplo, converter uma matriz de tensão de sequência de fases em uma matriz de tensão de componentes simétricas.

A segunda parte da aplicação, chamada de “funções” (*Codigo_67_funcoes.py*) contém todas as funções definidas neste projeto, desde a formação das matrizes que compõem o sistema ao desenho dos gráficos que são apresentados como resultado final para cada relé escolhido.

Já a terceira parte, chamada de “principal” (*Codigo_67_main.py*), contém os valores de entrada e solicitações ao usuário, tais como a solicitação dos parâmetros dos sistemas equivalentes e da linha em estudo como também a seleção do relé, além de fazer as conexões com os arquivos de globais e funções, ou seja, este é o arquivo de interface com o usuário da aplicação.

No arquivo principal, foi desenvolvida uma função que recebe todos os parâmetros do sistema para inicialização da aplicação no interpretador *Python*.

Assim, a interação entre as três partes da aplicação ocorre da seguinte maneira: com os arquivos carregados no ambiente *Python*, inicialmente o usuário descreve o sistema utilizando a função “*run_67()*”, onde, dentro dos parênteses da função é necessário inserir os seguintes parâmetros com valores do sistema que se deseja o estudo:

- V_s_mag , V_s_ang : magnitude e ângulo da tensão de *Thévenin* do sistema equivalente S; valor absoluto da tensão de linha em volts [V] e ângulo em graus [°];
- I_s_mag , I_s_ang : magnitude e ângulo da corrente do fluxo de potência no sistema equivalente S; valor absoluto em amperes [A] e ângulo em graus [°];
- Z_{s_1} , Z_{s_0} : impedância complexa de *Thévenin* de sequência positiva e de sequência zero do sistema equivalente S; valores no formato (Re+Imj) em ohm [Ω];
- V_r_mag , V_r_ang : magnitude e ângulo da tensão de *Thévenin* do sistema equivalente R; valor absoluto da tensão de linha em volts [V] e ângulo em graus [°];

- I_r_mag , I_r_ang : magnitude e ângulo da corrente do fluxo de potência no sistema equivalente R; valor absoluto em amperes [A] e ângulo em graus [$^{\circ}$];
- Z_r_1 , Z_r_0 : impedância complexa de *Thévenin* de sequência positiva e de sequência zero do sistema equivalente R; valores no formato (Re+Imj) em ohm [Ω].

Também deve-se indicar os parâmetros da linha, conforme a seguir:

- Zl_1 , Zl_0 : impedância longitudinal unitária complexa de sequência positiva e de sequência zero da linha de transmissão; valores no formato (Re+Imj) em ohm por quilometro [Ω/km];
- Yl_1 , Yl_0 : admitância transversal unitária complexa de sequência positiva e de sequência zero da linha de transmissão; valores no formato (Re+Imj) em siemens por quilometro [S/km];
- l : comprimento total da linha em quilômetros.

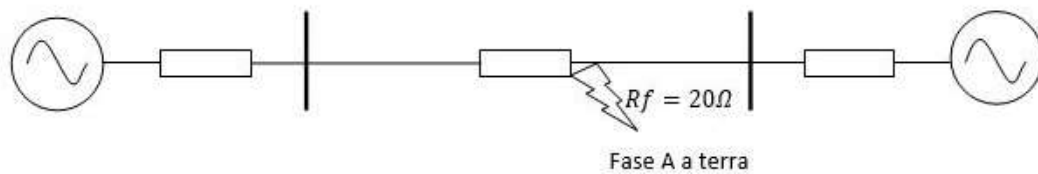
A resistência de aterramento, parâmetro “Rf”, deve ser indicada em seu valor absoluto em Ohms [Ω]. O número de pontos a serem verificados ao longo da linha também pode ser dimensionado através do parâmetro “np”, porém, para o caso em estudo, foi definido 100 pontos de faltas. O tipo de falta, parâmetro “tf”, conforme explicado anteriormente, foi limitado a uma falta monofásicas na fase A por ponto. Para estudos futuros, existe a possibilidade de seleção entre 5 tipos de faltas: monofásica, bifásica, bifásica a terra, trifásica e trifásica a terra. Por fim, a seleção do relé de proteção, parâmetro “rele”, é feita através de um número inteiro sequenciado que foi dado de forma aleatória, assim, para os 3 relés em estudo temos:

- 1: Relé SEL-311L;
- 2: Relé GE D90Plus;
- 3: Relé SIEMENS 7SJ62.

Observa-se que o relé de proteção sempre será o mesmo modelo nos dois lados da linha. Como exemplo, para o sistema da Figura 32, a entrada de valores no ambiente *Python* é realizada como mostrado na Figura 31:

Figura 31: Entrada de valores.

```
>>> run_67(Vs_mag=130, Vs_ang=10, Is_mag=0, Is_ang=0, Zs_1=1+2j,
Zs_0=2+4j, Vr_mag=115, Vr_ang=0, Ir_mag=0, Ir_ang=0, Zr_1=0.1+0.2j,
Zr_0=0.2+0.4j, l=100, Zl_1=0.01+0.02j, Zl_0=0.02+0.04j,
Yl_1=0.00+0.000000001j, Yl_0=0.00+0.000000001j, Rf=20, np=100, tf=1,
rele=1)
```

Fonte: Autoria Própria.**Figura 32: Exemplo de sistema para entrada de dados no ambiente *Python*.**

$V_s = 130 \angle 10^\circ \text{ V}$	$Z_{s_1} = 1 + 2j\Omega$	$Z_{l_1} = 0.01 + 0.02j\Omega/\text{km}$	$Z_{r_1} = 0.1 + 0.2j\Omega$	$V_r = 115 \angle 0^\circ \text{ V}$
$I_s = 0 \angle 0^\circ \text{ A}$	$Z_{s_0} = 2 + 4j\Omega$	$Z_{l_0} = 0.02 + 0.04j\Omega/\text{km}$	$Z_{r_0} = 0.2 + 0.4j\Omega$	$I_r = 0 \angle 0^\circ \text{ A}$
	Relé S SEL 311L	$Y_{l_1} = 0.000000001 \text{ jS}/\text{km}$	Relé R SEL 311L	
		$Y_{l_0} = 0.000000001 \text{ jS}/\text{km}$		
		$l = 100 \text{ km}$		

Fonte: Autoria Própria.

Foram escolhidos estes formatos para a entrada de dados por estes serem os mais usuais na engenharia de proteção de linhas. Além disso, não está definido se as entradas de magnitudes são dadas em valores de primário ou de secundário de TCs e TPs, ficando a critério e cuidado do usuário de quais magnitudes utilizar. Assim que o sistema estiver parametrizado e o comando de entrada for acionado, o usuário aguarda a aplicação percorrer o algoritmo e gerar o resultado. Desta forma, define-se que os passos a seguir independem de interação com o usuário.

Uma vez que o sistema está parametrizado, o algoritmo principal solicita ao arquivo de funções a geração das matrizes de quadripolos dos sistemas equivalentes S e R e da falta. As matrizes de impedâncias dos sistemas equivalentes são geradas e devolvidas ao algoritmo principal no formato de componentes simétricas e em seguida transformadas em sequência de fases. Já as matrizes de tensão e corrente, bem como a impedância de falta, são devolvidas apenas em sequência de fases. Observa-se que o cálculo para o regime permanente de cada

falta é realizado em sequência de fases, por isso a necessidade de se transformar as matrizes de impedâncias dadas originalmente em componentes simétricas, para sequência de fases. Observa-se também que o valor de impedância de sequência negativa é igual ao da impedância de sequência positiva. A transformação de matrizes de componentes simétricas, M_{120} , para sequência de fases, M_{abc} , é feita com a seguinte equação:

$$M_{abc} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \cdot M_{120} \cdot \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \quad (22)$$

Em seguida, o algoritmo principal solicita ao arquivo de funções a aplicação de uma falta atrás do relé do sistema S, então gera uma sequência de faltas ao longo da linha e uma falta atrás do relé do sistema R. Os valores obtidos são os de tensão e corrente de cada falta aplicada, medidos pelos relés das duas fontes S e R, tanto em sequência de fases quanto em componentes simétricas, e são armazenados sequencialmente em variáveis do tipo lista, para uso na continuidade do algoritmo.

No arquivo de funções a aplicação das faltas ocorre da seguinte maneira: dado o ponto de aplicação, o algoritmo verifica o comprimento da linha e decide se os cálculos serão feitos para uma linha curta ou linha longa. Se a linha é curta ($l \leq 100\text{km}$), os parâmetros de admitância da linha são desconsiderados e descreve-se a matriz de impedância da linha apenas com os valores das componentes simétricas fornecidas e, em seguida, transformada em sequência de fases:

$$Zl_{120} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Zl_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & Zl_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & Zl_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Se a linha é longa ($l > 100\text{km}$), são calculados a impedância característica e o coeficiente de propagação da linha, para em seguida calcular a matriz de impedância da linha, assim:

$$\begin{aligned} Zc_1 &= \sqrt{\frac{Zl_1}{Yl_1}} & Zc_0 &= \sqrt{\frac{Zl_0}{Yl_0}} & \text{Impedâncias características} \\ \gamma_1 &= \sqrt{Zl_1 \cdot Yl_1} & \gamma_0 &= \sqrt{Zl_0 \cdot Yl_0} & \text{Coeficientes de propagação} \end{aligned}$$

A matriz de impedância de linha longa é representada por uma matriz de submatrizes em componentes simétricas que em seguida são transformadas em sequência de fases. Convém notar que estas submatrizes não são os parâmetros de transmissão apresentados no tópico

anterior:

$$Zl_{120} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (24)$$

Onde as submatrizes são as seguintes:

$$A = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1.l) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_1.l) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_0.l) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B = \begin{bmatrix} Zc_1.\sinh(\gamma_1.l) & 0 & 0 \\ 0 & Zc_1.\sinh(\gamma_1.l) & 0 \\ 0 & 0 & Zc_0.\sinh(\gamma_0.l) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\sinh(\gamma_1.l)}{Zc_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sinh(\gamma_1.l)}{Zc_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sinh(\gamma_0.l)}{Zc_0} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$D = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1.l) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_1.l) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_0.l) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Após a tomada de decisão sobre o comprimento da linha, a função “desenha” o sistema em formato de quadripolos em série, posicionando a falta proporcionalmente ao número de pontos solicitados e, então, calcula os valores medidos pelos relés conforme apresentado anteriormente e detalhado a seguir.

Considerando VI_S a matriz coluna das tensões e correntes na fonte S e VI_R a matriz coluna das tensões e correntes na fonte R, ou seja:

$$VI_S = \begin{bmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} \quad (29)$$

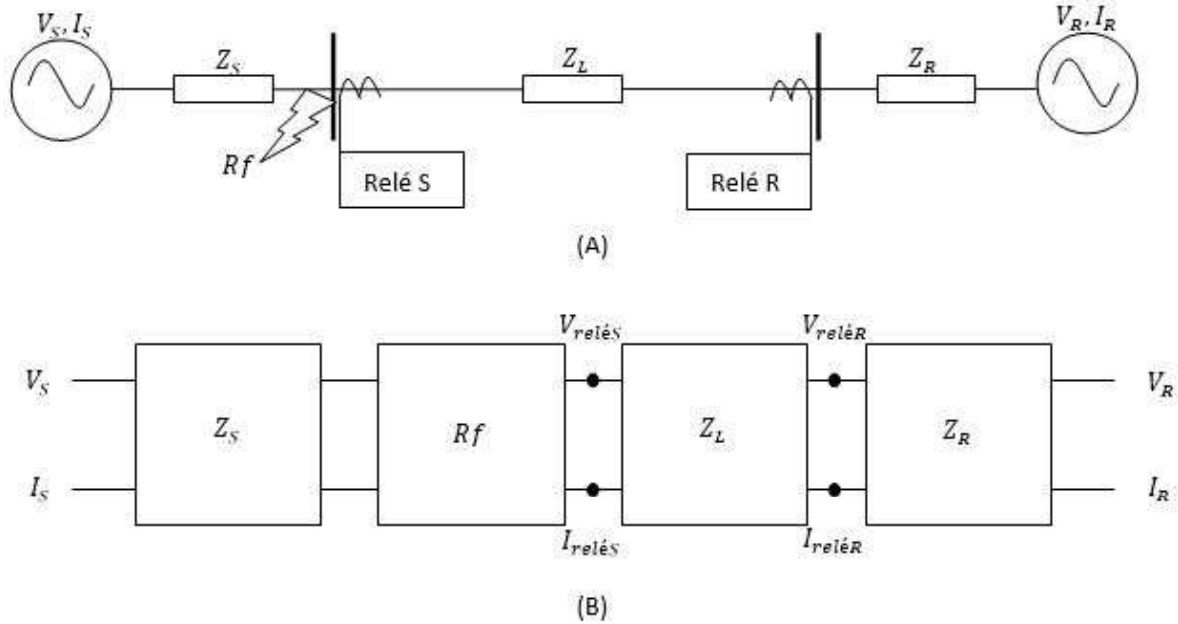
e

$$VI_R = \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (30)$$

O primeiro ponto de aplicação de falta será atrás do relé S. O sistema em falta é representado conforme a Figura 33. Por inspeção, percebe-se que a aplicação da falta atrás do relé S será equivalente a uma falta em 100% da linha vista pelo relé R, igualmente a uma

falta logo à frente do relé S. Então, neste ponto, o algoritmo não calcula os valores medidos pelo relé R.

Figura 33: Falta atrás do relé S, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.



Fonte: Autoria Própria.

Seja Q a matriz de impedâncias total do sistema, F a matriz de impedâncias vista pelo relé S e VI_{relS} a matriz coluna das tensões e correntes em sequência de fases medidas pelo relé S:

$$Q = Z_S \cdot R_f \cdot Z_L \cdot Z_R, \quad (31)$$

$$F = Z_L \cdot Z_R \quad (32)$$

e

$$VI_{relS} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{relS} \\ \dot{I}_{relS} \end{bmatrix} \quad (33)$$

A equação geral do sistema é dada por:

$$VI_S = Q \cdot VI_R \quad (34)$$

Se considerarmos

$$Q = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (35)$$

onde A , B , C e D são matrizes de ordem 3×3 e contém os parâmetros de transmissão do sistema trifásico, então:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (36)$$

e:

$$\dot{V}_S = A \cdot \dot{V}_R + B \cdot \dot{I}_R \quad (37)$$

de onde podemos isolar a corrente observada pela fonte R durante a falta aplicada:

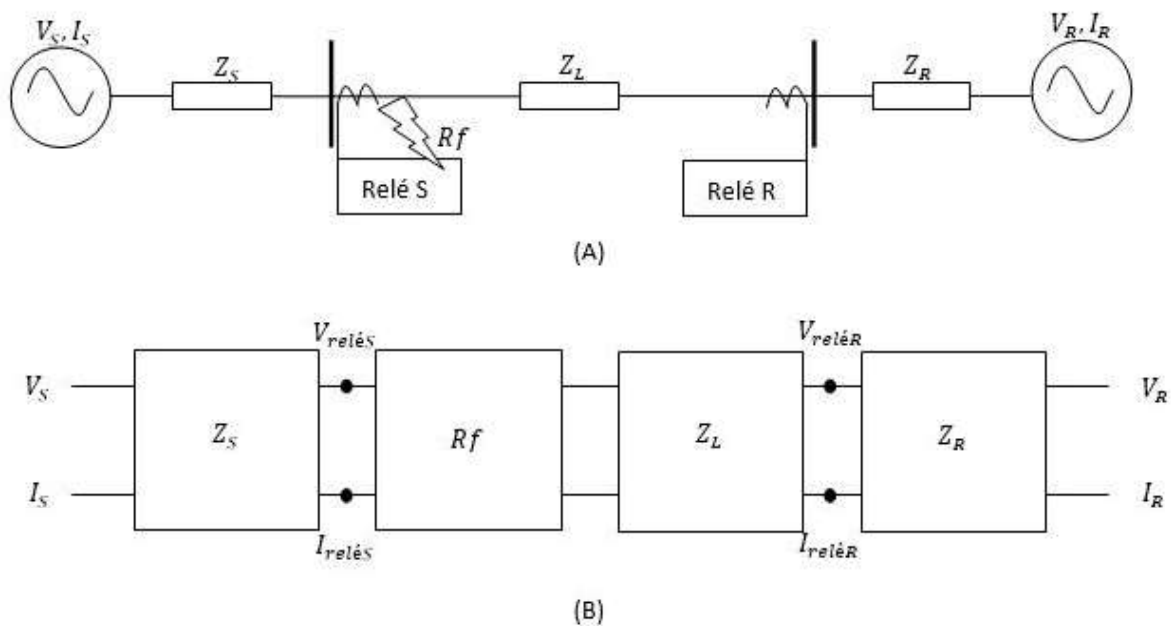
$$\dot{I}_R = B^{-1} \cdot (\dot{V}_S - A \cdot \dot{V}_R) \quad (38)$$

Como, por hipótese, as tensões das fontes não mudam durante a falta, podemos finalmente calcular as tensões e correntes medidas pelo relé S:

$$VI_{relS} = F \cdot VI_R \quad (39)$$

O ponto seguinte é à frente do TC do relé S. Conforme se verifica na Figura 34, é possível calcular também os valores de falta considerando a impedância total da linha vista pelo relé R.

Figura 34: Falta à frente do relé S, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.



Fonte: Autoria Própria.

A matriz Q de impedâncias total do sistema é a mesma do ponto de falta anterior, porém na matriz F , das impedâncias vistas pelo relé S, houve a inclusão da resistência de falta. Desta forma:

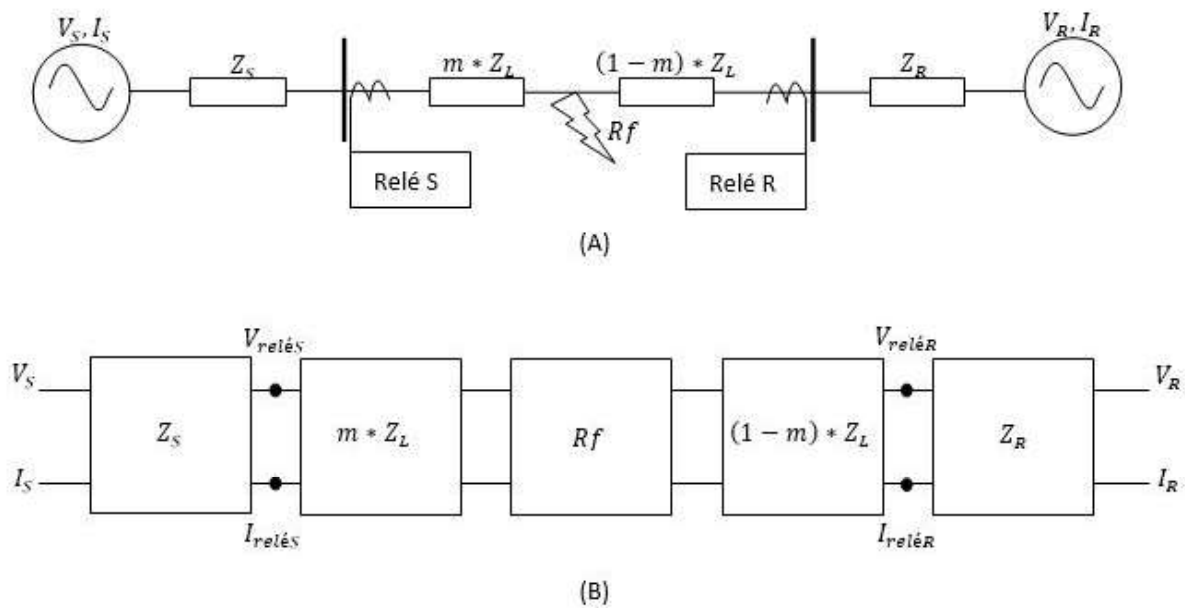
$$F = R_f \cdot Z_L \cdot Z_R \quad (40)$$

Assim o cálculo das tensões e correntes resultantes de uma falta logo à frente do relé S é feito substituindo-se (40) na Equação (39). Já para o cálculo das medições vistas pelo relé R neste ponto, temos:

$$V_{I_{rel}R} = Z_R \cdot V_{I_R} \quad (41)$$

A seguir é aplicada a sequência de faltas ao longo da linha. Para se deslocar o ponto de falta, utiliza-se uma variável m para posicionamento. Esta variável é dependente do número de pontos de faltas solicitados ao longo da linha, mas limitado a $0 < m < 1$. A Figura 35A apresenta o diagrama unifilar do sistema e a Figura 35B o esquema de quadripolos para o sistema em falta ao longo da linha.

Figura 35: Falta ao longo da linha, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.



Fonte: Autoria Própria.

Portanto para a matriz Q temos:

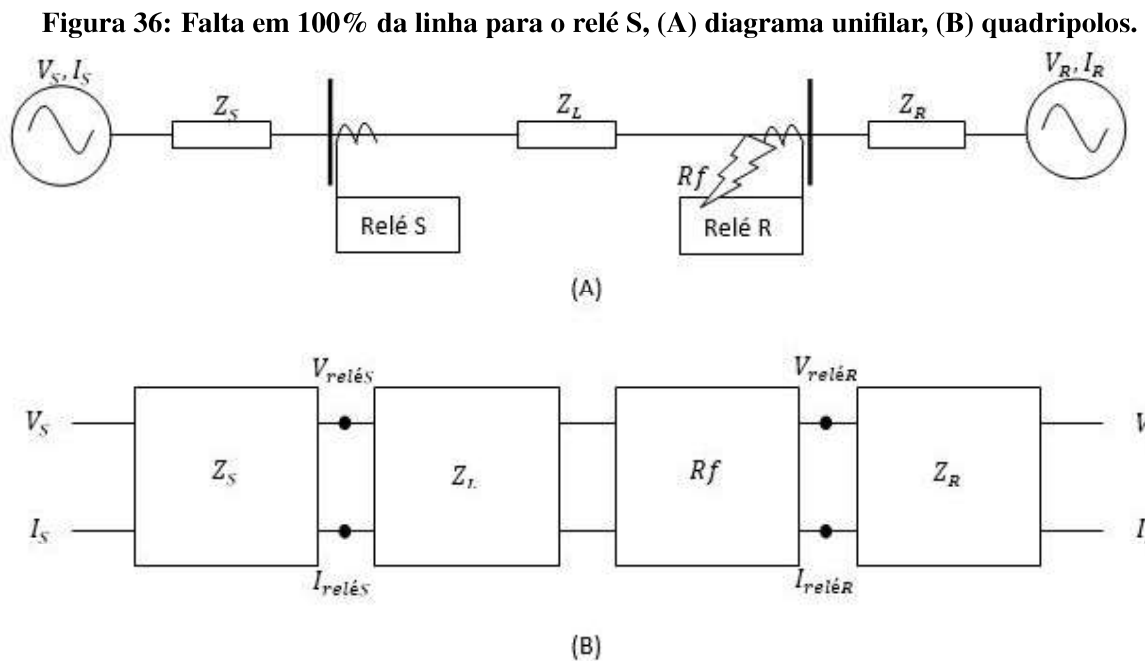
$$Q = Z_S \cdot (m \cdot Z_L) \cdot R_f \cdot [(1-m) \cdot Z_L] \cdot Z_R \quad (42)$$

e para F :

$$F = (m \cdot Z_L) \cdot R_f \cdot [(1 - m) \cdot Z_L] \cdot Z_R \quad (43)$$

Assim, os valores de tensão e corrente do sistema são calculados substituindo-se (42) em (34). Na sequência, substituindo-se (43) em (39), obtemos os valores de tensão e corrente medidos pelo relé S. A Equação (41) mantém-se inalterada para as medidas do relé R para a sequência de faltas ao longo da linha.

Posteriormente é aplicada a falta a 100% da linha vista pelo relé S, o que caracteriza uma falta logo à frente do relé R. A representação do sistema neste caso é conforme a Figura 36.



Fonte: Autoria Própria.

Neste sistema sob falta, as matrizes Q e F serão:

$$Q = Z_S \cdot Z_L \cdot R_f \cdot Z_R \quad (44)$$

e

$$F = Z_L \cdot R_f \cdot Z_R \quad (45)$$

que, substituídos convenientemente nas Equações (34) e (40), obtém os valores medidos pelo relé S. A Equação (41) ainda é utilizada para as medidas do relé R.

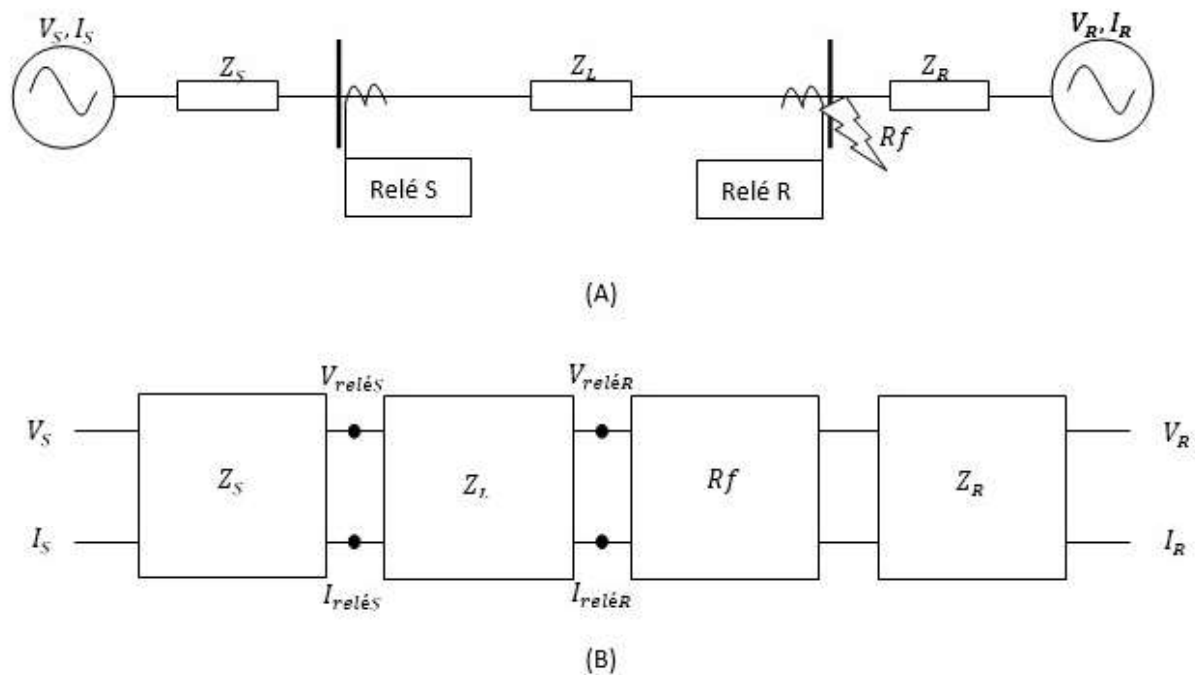
Por fim, é realizado o cálculo para as tensões e correntes medidas pelo relé R quando

ocorre uma falta atrás deste. A Figura 37 é a representação do sistema para este caso.

A matriz Q é idêntica ao ponto anterior para ser substituída na Equação (33). Neste ponto não é necessário calcular a matriz F , uma vez que os valores obtidos para as medições do relé S serão os mesmos que foram obtidos no ponto de falta anterior. Porém para as medições de tensão e corrente do relé R serão:

$$VI_{relR} = (Rf.Z_R).VI_R \quad (46)$$

Figura 37: Falta atrás relé R, (A) diagrama unifilar, (B) quadripolos.



Fonte: Autoria Própria.

O próximo passo do algoritmo principal é solicitar ao arquivo de funções a tratativa dos valores armazenados, de acordo com os parâmetros a serem estudados para o relé selecionado. Cada relé possui um algoritmo característico que define os cálculos e valores a serem retornados em formato de gráfico para a leitura do usuário. Os valores em estudo de cada relé foram apresentados no Capítulo 2 deste trabalho.

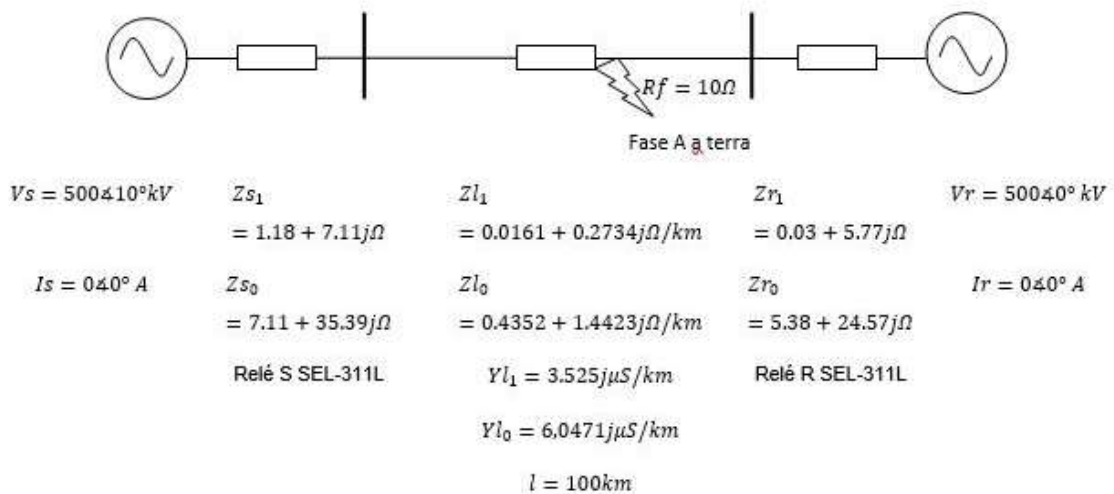
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para exemplificar a utilização da aplicação, o aplicativo foi parametrizado e executado com os dados do sistema da Figura 38 e os resultados e discussões são apresentados a seguir.

Este sistema é composto por uma linha curta de 100km e suposta totalmente transposta que transfere energia entre dois sistemas equivalentes de 500kV. Para este exemplo, as faltas aplicadas são monofásicas na fase A. Observa-se que não foi definida uma corrente fluindo no sistema, mas poderiam ser incluídos valores que poderiam influenciar no resultado final. Além disso, todos os valores são apresentados para o lado de primários dos TCs e TPs.

Para o sistema da Figura 38, com a aplicação carregada no interpretador, a entrada de valores no ambiente Python é realizada como na Figura 39.

Figura 38: Sistema para estudo de caso.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 39: Entrada de dados.

```
>>> run_67(Vs_mag=500000, Vs_ang=10, Is_mag=0, Is_ang=0,
Zs_1=1.18+7.11j, Zs_0=7.11+35.39j, Vr_mag=500000, Vr_ang=0, Ir_mag=0,
Ir_ang=0, Zr_1=0.03+5.77j, Zr_0=5.38+24.57j, l=100,
Zl_1=0.0161+0.2734j, Zl_0=0.4352+1.4423j, Yl_1=0.00+0.0000003525j,
Yl_0=0.00+0.0000060471j, Rf=10, np=100, tf=1, rele=1)
```

Fonte: Autoria Própria.

Para cada modelo de relé, conforme discutido em capítulo anterior, o parâmetro *rele* deve ser re-configurado. Como resultado, os gráficos apresentados representam a variação de cada parâmetro do relé em estudo para as faltas a cada certa distância em quilômetros do relé, observando o ponto inicial no relé do sistema S e finalizando no relé do sistema R. Desta forma, a verificação dos parâmetros do sistema R é verificada inicialmente em 100% da linha e se

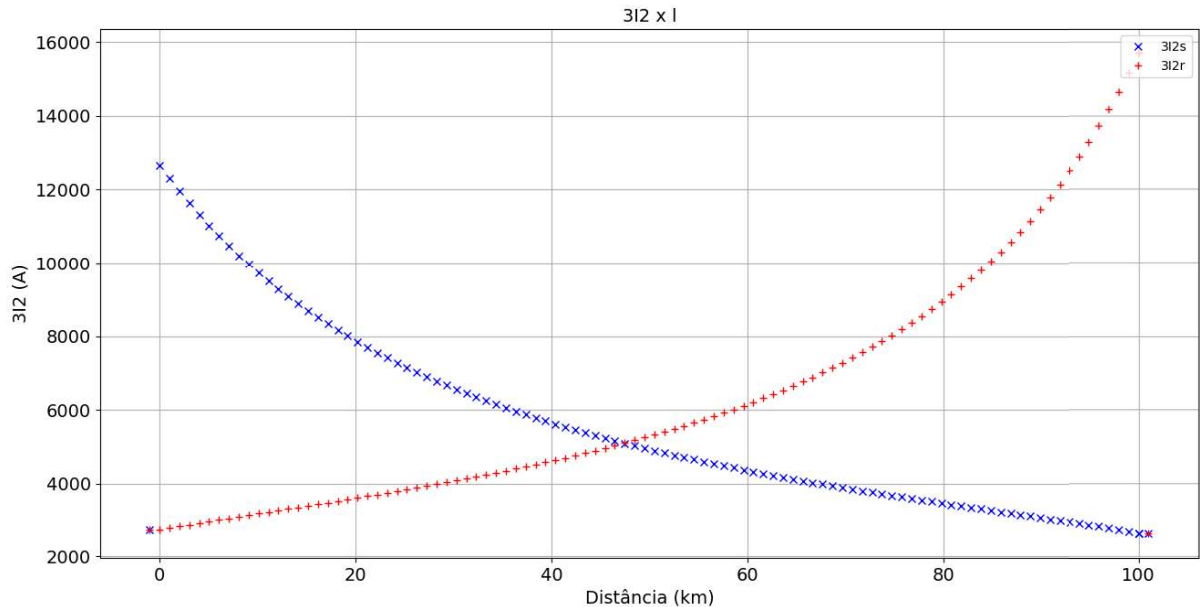
distanciando para 0% da linha. Para este trabalho, ficou definido que os pontos apresentados pelo símbolo “x” em azul representam o relé do sistema S e pelo símbolo “+” em vermelho representam o relé do sistema R, conforme legenda no canto superior direito de cada gráfico.

4.2.1 ESTUDO DE CASO PARA O RELÉ SEL-311L

O relé da Schweitzer, SEL-311L, resulta em uma série de 7 gráficos, independentemente do tipo de falta, pois a premissa deste relé é a verificação de componentes simétricas de sequência negativa e zero e os possíveis desequilíbrios do sistema.

Conforme a Figura 40, neste exemplo, o relé SEL-311L observa uma atenuação da corrente de sequência negativa em função da distância da falta. Assim, o relé do sistema S tem uma corrente de sequência negativa de aproximadamente 12,5kA para uma falta logo à sua frente e essa corrente varia até pouco menos que 3kA quando a falta ocorre na extremidade final vista por este relé. Além disso, como existe, para este relé do sistema S, apenas influência do sistema R quando a falta é atrás do relé S, a corrente de sequência negativa neste ponto também fica abaixo dos 3kA. Para o relé do sistema R a verificação é semelhante, mas o valor de corrente inicial é de aproximadamente 16kA para uma falta logo à sua frente devido ao sistema R ser mais forte. Assim, é possível verificar os valores de corrente de sequência negativa que serão medidos por cada relé para faltas a frente e reversa. Estes valores são utilizados para ajustar a sensibilidade dos parâmetros 50QFP e 50QRP. Por exemplo, o ajuste 50QFP, que é o limite mínimo de corrente para faltas a frente, deve ser ajustado abaixo do menor valor encontrado para as faltas a frente, 3kA neste exemplo.

Figura 40: Gráfico de $3I_2$ por distância no relé SEL-311L.

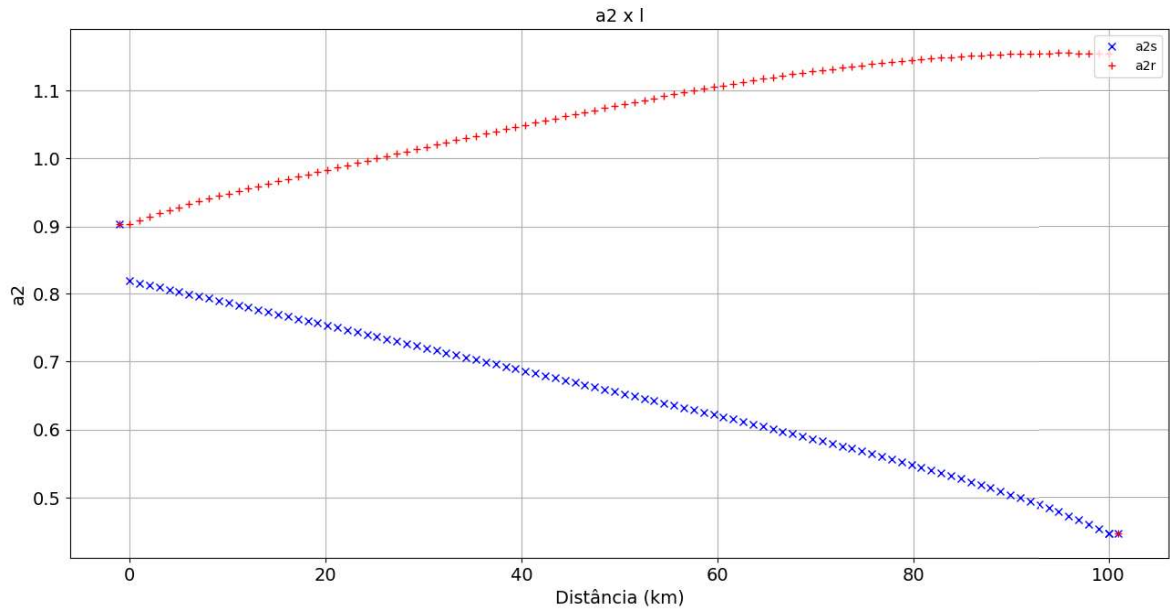


Fonte: Autoria Própria.

É importante ressaltar que, se os valores são primários, como neste exemplo, fica a cargo do usuário replicar os resultados para valores secundários antes de ajustar o relé. Além disso, o aplicativo fornece valores bases para ajudar o usuário a encontrar a sensibilidade correta para o relé, ficando a cargo do usuário a definição do ajuste.

O gráfico da Figura 41 apresenta o desequilíbrio provocado pelas faltas em toda a extensão da linha. Verifica-se que os relés interpretam um desequilíbrio maior quanto mais próximo a falta for deles. Assim, neste caso, observa-se que o ajuste de a_2 varia entre 0,4 a 0,9 para faltas à frente do relé S e próximo a 0,9 para a falta atrás desse relé. Já para o relé do sistema R, se verifica um desequilíbrio mais acentuado, variando entre 0,9 a quase 1,2 para as faltas à frente, porém, devido à influência da fonte mais fraca, quando a falta é atrás do relé R, o desequilíbrio passa a ser inferior a 0,5. Conforme explicado anteriormente, o desequilíbrio é calculado pela relação entre a corrente de sequência negativa e a corrente de sequência positiva.

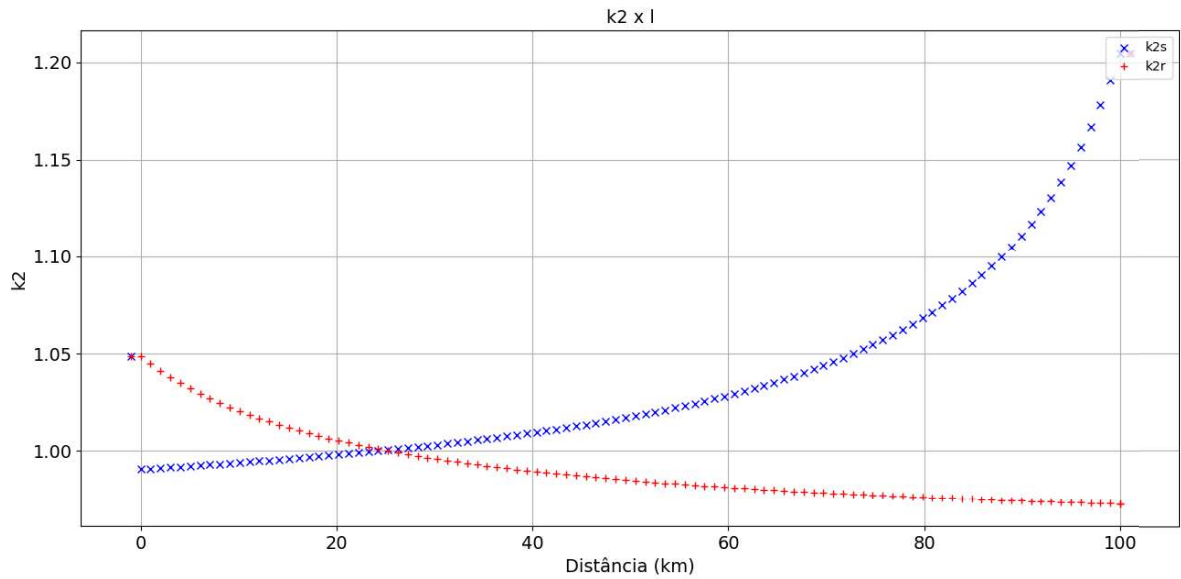
Figura 41: Gráfico de a_2 por distância no relé SEL-311L.



Fonte: Autoria Própria.

Já o gráfico da Figura 42 apresenta a variação da corrente de sequência negativa relativamente à corrente de sequência zero para a certificação da existência de falta à terra. Neste exemplo, tanto para o relé do sistema S quanto o relé do sistema R, verifica-se, como era de se esperar, uma forte presença do elemento terra ao longo da sequência de faltas. Como as correntes de sequência negativa são grandes, comprovadas na Figura 40, verifica-se que as correntes de sequência zero são igualmente grandes, pois a relação entre esses dois valores variam entre 0,95 a 1,20, demonstrando que as faltas são à terra.

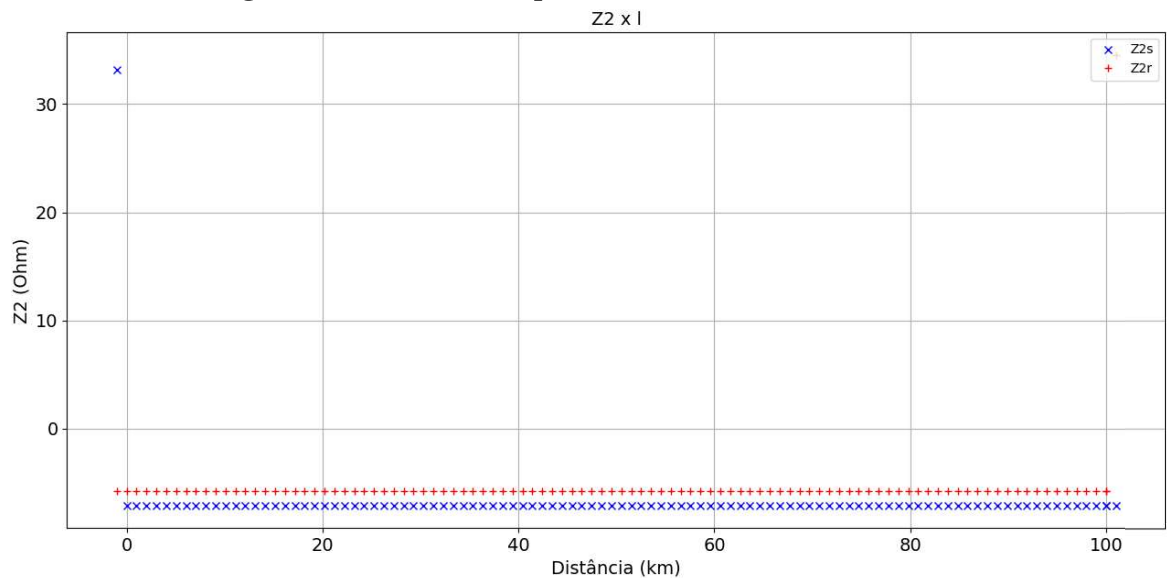
Figura 42: Gráfico de k_2 por distância no relé SEL-311L.



Fonte: Autoria Própria.

A seguir, o gráfico da Figura 43 apresenta os valores de impedâncias de sequência negativa calculadas pelos relés a partir dos valores medidos de tensão e corrente provocados pelas faltas.

Figura 43: Gráfico de Z_2 por distância no relé SEL-311L.



Fonte: Autoria Própria.

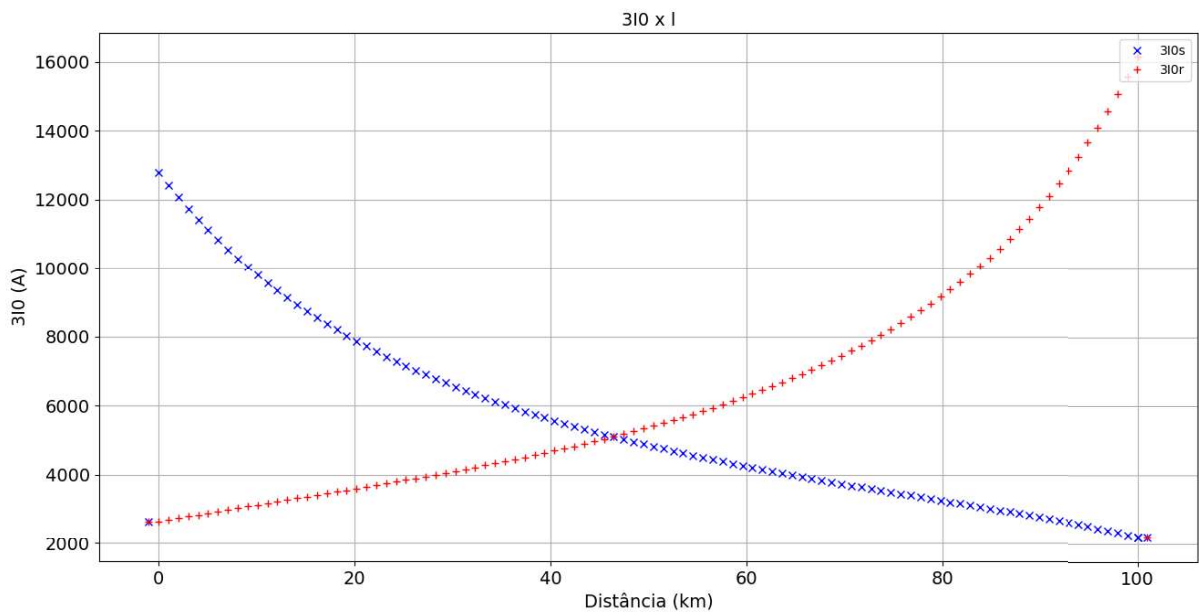
Observa-se que os valores apresentados estão em conformidade aos valores de impedância de sequência negativa de cada sistema para as faltas à frente e reversa, ou seja,

para uma falta à frente, a impedância medida é a que está atrás do relé e para uma falta atrás do mesmo, o relé observa toda a impedância à sua frente. Os valores apresentados auxiliam na escolha do melhor ajuste para os parâmetros Z2F e Z2R dos relés, os quais são os ajustes que determinam os limiares de sensibilidade de faltas à frente ou reversas.

Os gráficos das Figuras 44, 45 e 46 têm interpretação semelhante à das Figuras 40, 41 e 43 nesta ordem, porém, ao invés de se observar o desequilíbrio pela corrente de sequência negativa, se observa os valores de sequência zero, que somente ocorrem quando a falta é à terra.

Comprova-se, portanto, que a sequência de faltas teve presença do elemento terra, devido à grande magnitude das correntes de sequência zero apresentadas na Figura 44, além da presença de impedância de sequência zero apresentada na Figura 46 e principalmente pela existência de relação entre os a corrente de sequência zero e a corrente de sequência positiva, a qual variou entre 0,3 e 1,2, conforme pode ser observado na Figura 45 através do parâmetro a0.

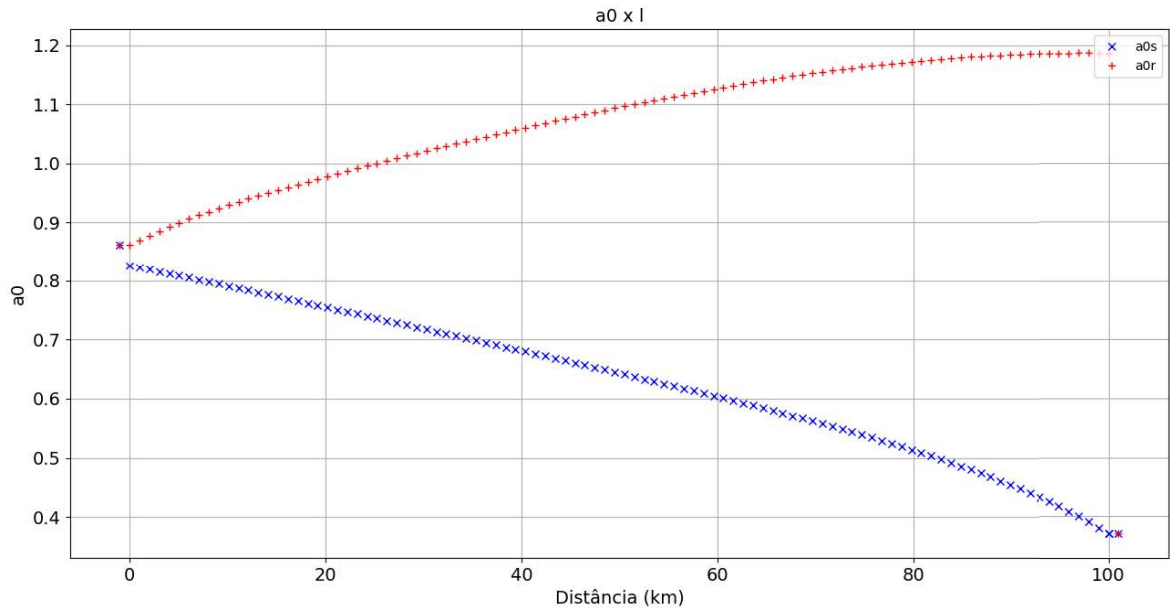
Figura 44: Gráfico de $3I_0$ por distância no relé SEL-311L.



Fonte: Autoria Própria.

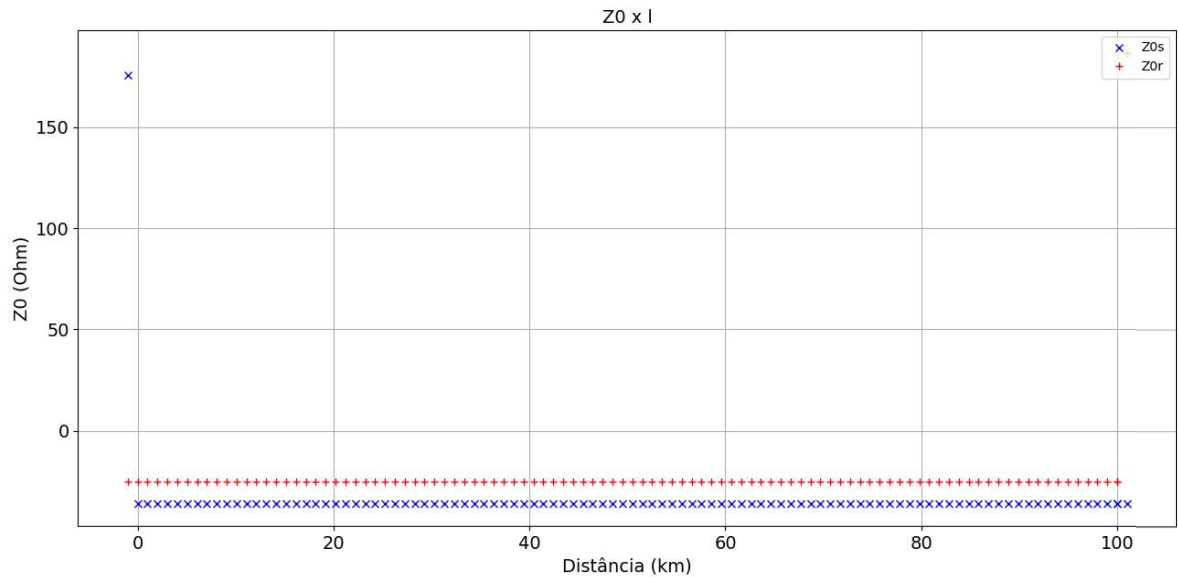
Pode-se portanto, com esses resultados, avaliar-se os possíveis ajustes dos parâmetros 50GFP, 50GRP, a0, Z0F e Z0R do relé SEL-311L.

Figura 45: Gráfico de a_0 por distância no relé SEL-311L.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 46: Gráfico de Z_0 por distância no relé SEL-311L.



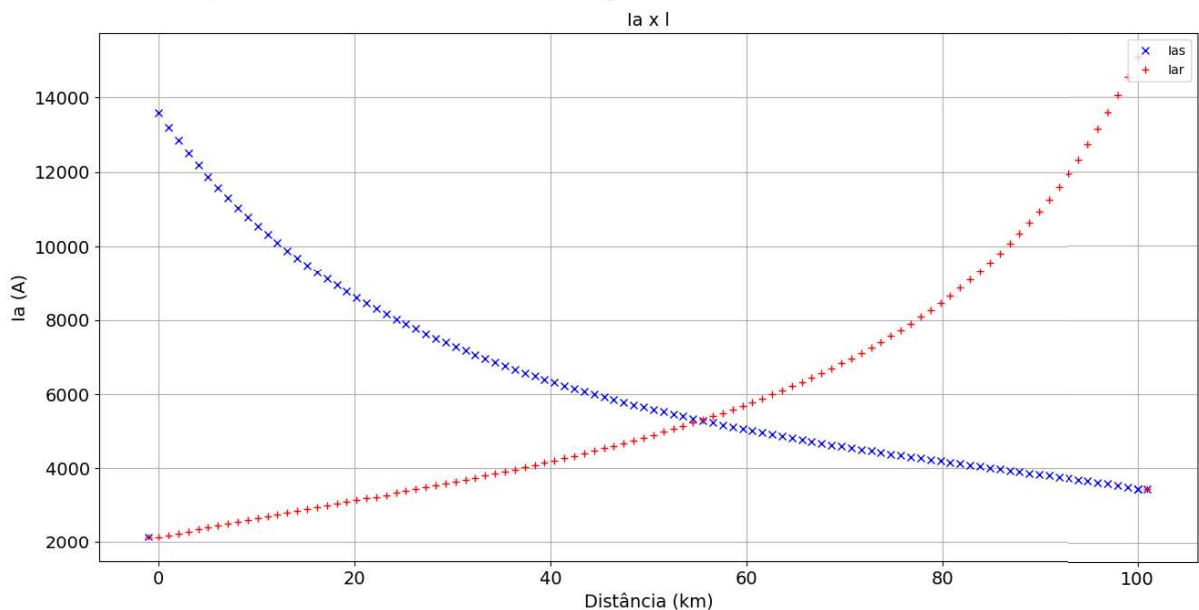
Fonte: Autoria Própria.

4.2.2 ESTUDO DE CASO PARA O RELÉ GE D90 PLUS

O relé da GE, D90Plus, para este estudo de caso, resulta em uma série de 5 gráficos, sendo 3 para o elemento de sobrecorrente de fase, 1 para o elemento de sequência negativa e

1 para o elemento de sequência zero. A Figura 47 apresenta a corrente da fase A (I_a) medida pelos relés para cada ponto de falta. Com o resultado apresentado deve-se assegurar que a menor corrente apresentada, ou seja, algo em torno de 3,5kA para o relé do sistema S e 2kA para o relé do sistema R não seja menor do que 5% da corrente nominal do TC quando refletido para o secundário. Desta forma o relé poderá atuar corretamente para todos os pontos. Já na Figura 48 é possível verificar qual a menor tensão a ser ajustada no parâmetro *Pol V Threshold*, observando-se que os valores deste exemplo devem ser refletidos para os secundários dos TPs. Como visto anteriormente, na ocorrência de uma tensão menor do que a deste parâmetro, o relé utilizará o valor de tensão armazenado em memória para definição da direção da falta ou bloqueará a atuação da função direcional de fase, conforme opção do usuário. Observando-se esses cuidados, será possível determinar o ajuste para o parâmetro ECA, ou seja, do ângulo característico formado entre a tensão de polarização e a corrente de falta, para determinar o que é considerado uma falta à frente ou reversa.

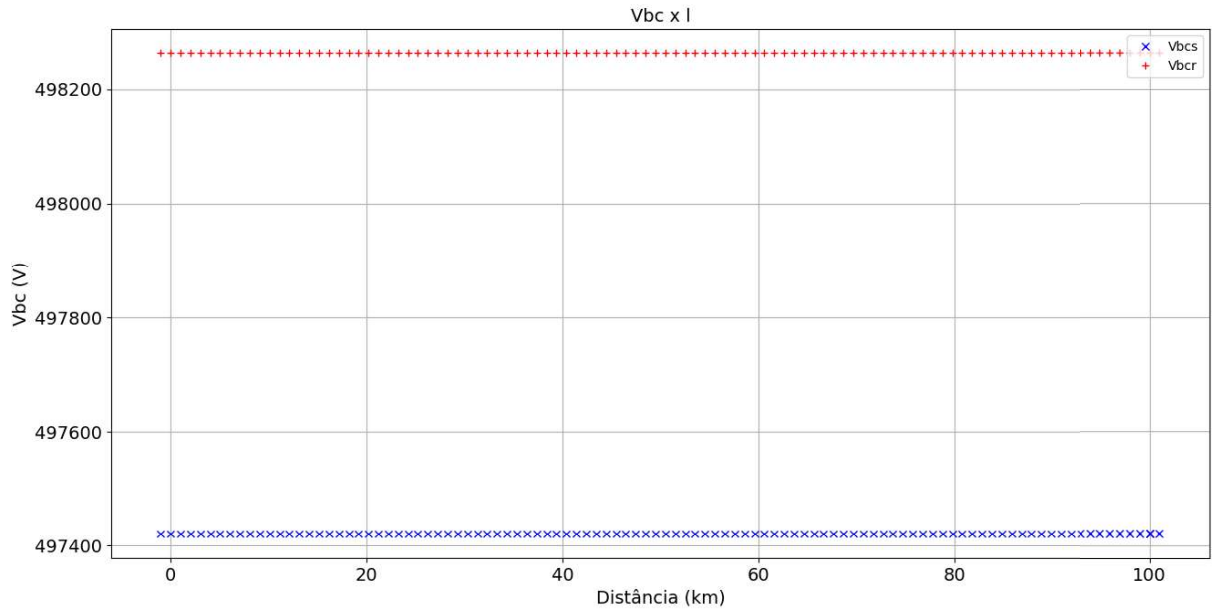
Figura 47: Gráfico da corrente I_a por distância no relé GE D90Plus.



Fonte: Autoria Própria.

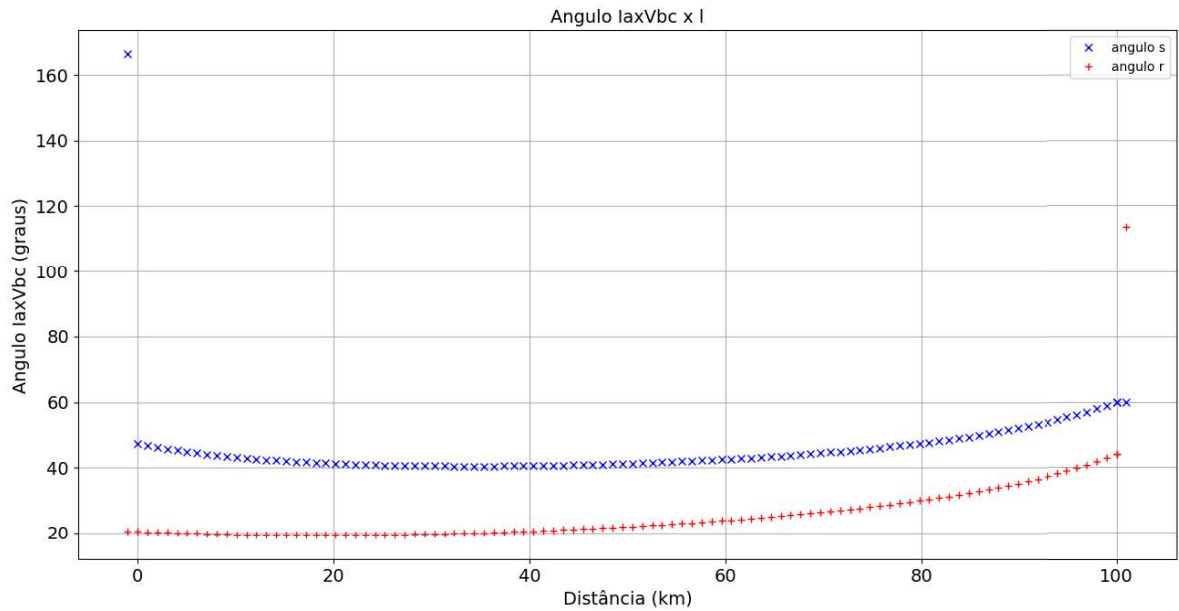
O gráfico da 49 apresenta justamente o ângulo formado entre a tensão de referência e a corrente de falta durante a falta. A corrente de falta deverá estar em fase ou a mais ou menos 90 graus com a tensão de polarização para que a falta seja considerada à frente, ou seja, o ajuste mais adequado será um valor o mais próximo possível da resposta dada para todos os pontos de faltas à frente considerando ainda que a falta reversa deverá se encontrar em um dos quadrantes opostos.

Figura 48: Gráfico da tensão Vbc por distância no relé GE D90Plus.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 49: Gráfico do ângulo entre Ia e Vbc por distância no relé GE D90Plus.

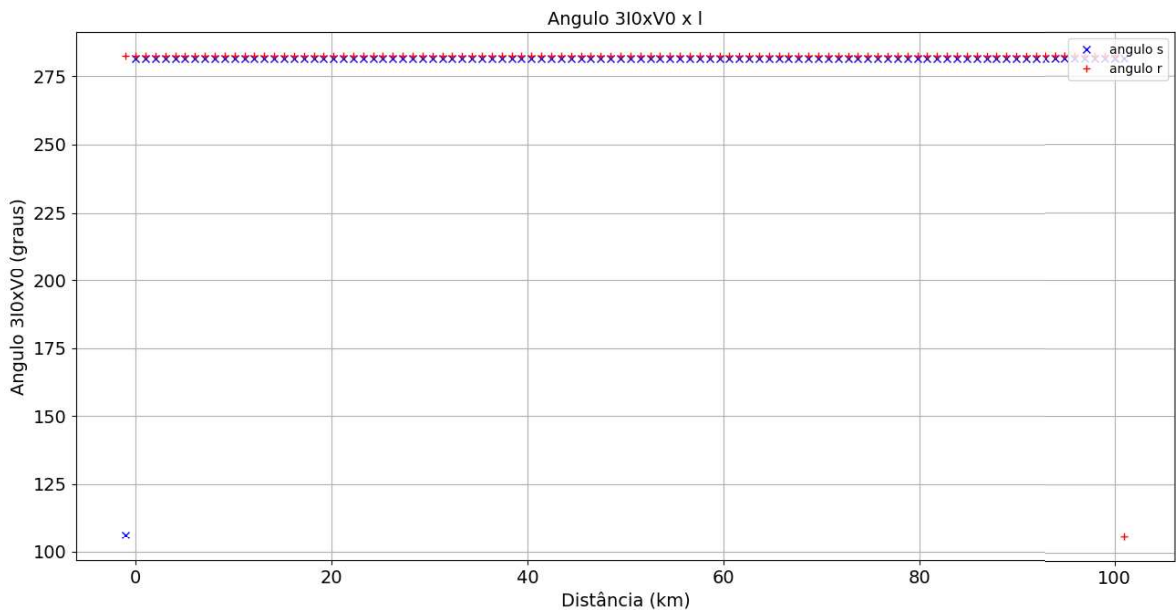


Fonte: Autoria Própria.

Nas Figuras 50 e 51 são apresentados os gráficos da corrente de sequência zero em relação à tensão de sequência zero e da corrente de sequência negativa em relação à tensão de sequência negativa para cada falta aplicada ao longo da linha. Observa-se nos dois casos que

não há variação no ângulo para faltas à frente dos dois relés, sendo a única mudança de ângulo quando a falta ocorre atrás dos relés. Isso ocorre porque a tensão de referência mantém-se aproximadamente fixa e a corrente segue o ângulo da impedância da linha. Outra observação quanto à magnitude dos ângulos apresentados é que os ângulos para faltas à frente encontram-se no quarto quadrante e as faltas reversas encontram-se no segundo quadrante. Desta forma, como os quadrantes são opostos, verifica-se que é possível realizar um ajuste que atenda o caso apresentado.

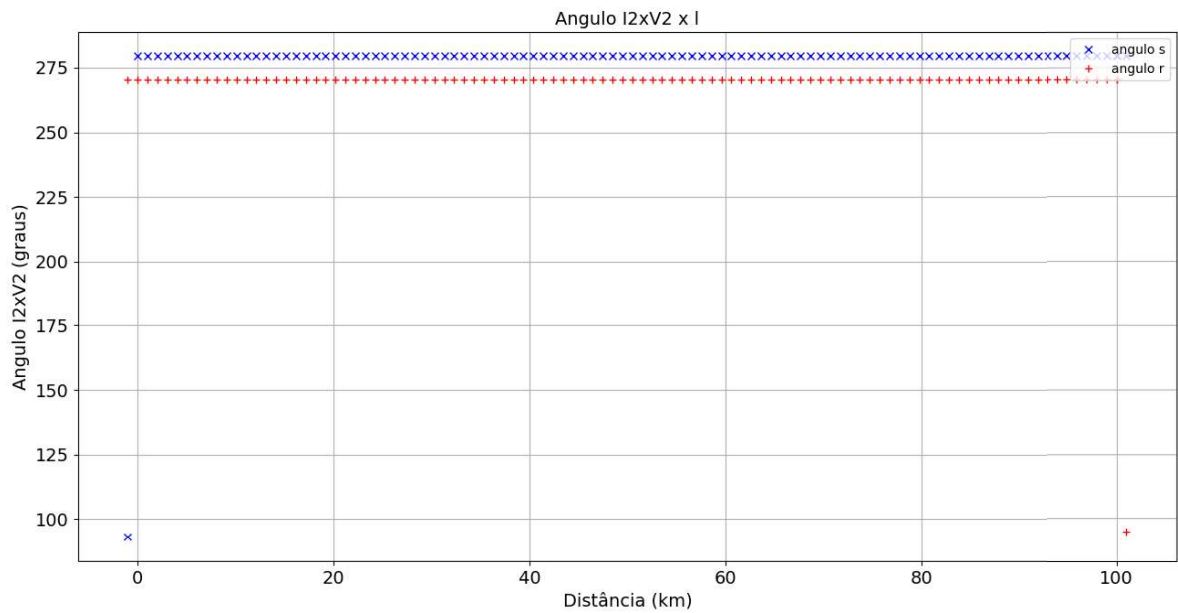
Figura 50: Gráfico do ângulo entre $3I_0$ e $-3V_0$ por distância no relé GE D90Plus.



Fonte: Autoria Própria.

Assim, com estes resultados e de forma semelhante ao elemento de sobrecorrente de fase, é possível determinar os parâmetros ECA (ângulos característicos) para os elementos de sequência zero e de sequência negativa.

Figura 51: Gráfico do ângulo entre I_2 e $-V_2$ por distância no relé GE D90Plus.

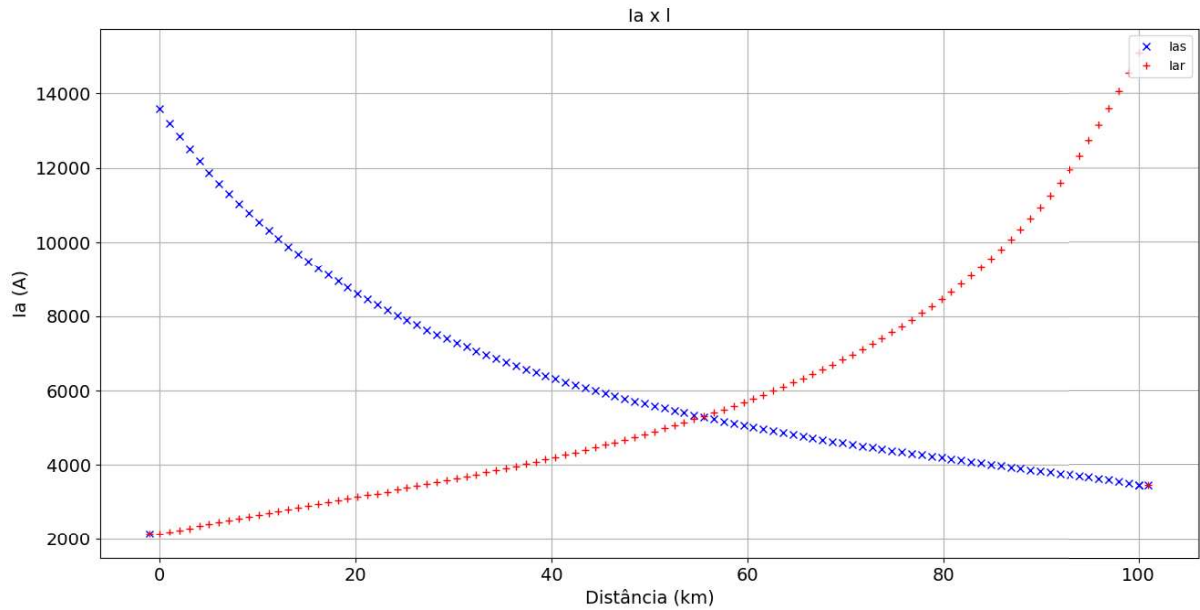


Fonte: Autoria Própria.

4.2.3 ESTUDO DE CASO PARA O RELÉ SIEMENS 7SJ62

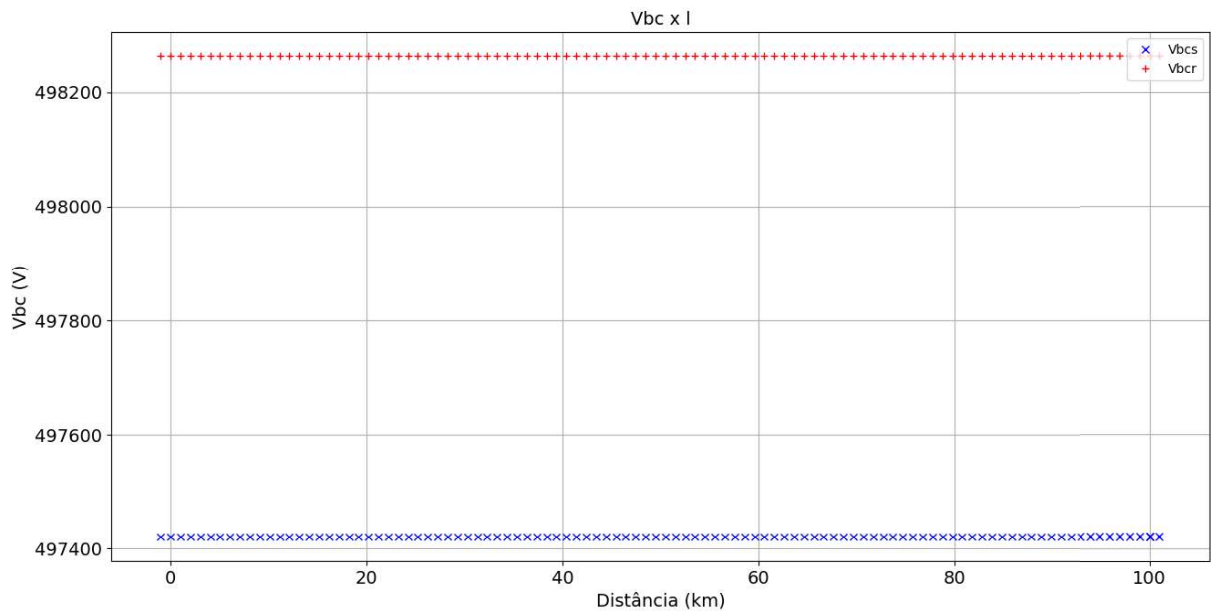
O relé da SIEMENS, 7SJ62, ao acaso da ordem em que foi descrito neste trabalho, tem uma interpretação semelhante ao relé da GE, D90Plus, devido às suas similaridades de funcionamento para as funções de proteção direcional de sobrecorrente de fase, de sequência negativa e de sequência zero, conforme descritos no Capítulo 2. Assim, as Figuras 52, 53 e 54 têm os mesmos aspectos e interpretações que as Figuras 47, 48 e 49 do relé da GE, D90Plus. No caso do relé da SIEMENS, 7SJ62, utilizando o resultado apresentado na Figura 54, observamos o ângulo formado entre a tensão de referência e a corrente de falta para realizar o ajuste do parâmetro 1519A, *Rotantion Angle of Reference Voltage*.

Figura 52: Gráfico da corrente I_a por distância no relé SIEMENS 7SJ62.



Fonte: Autoria Própria.

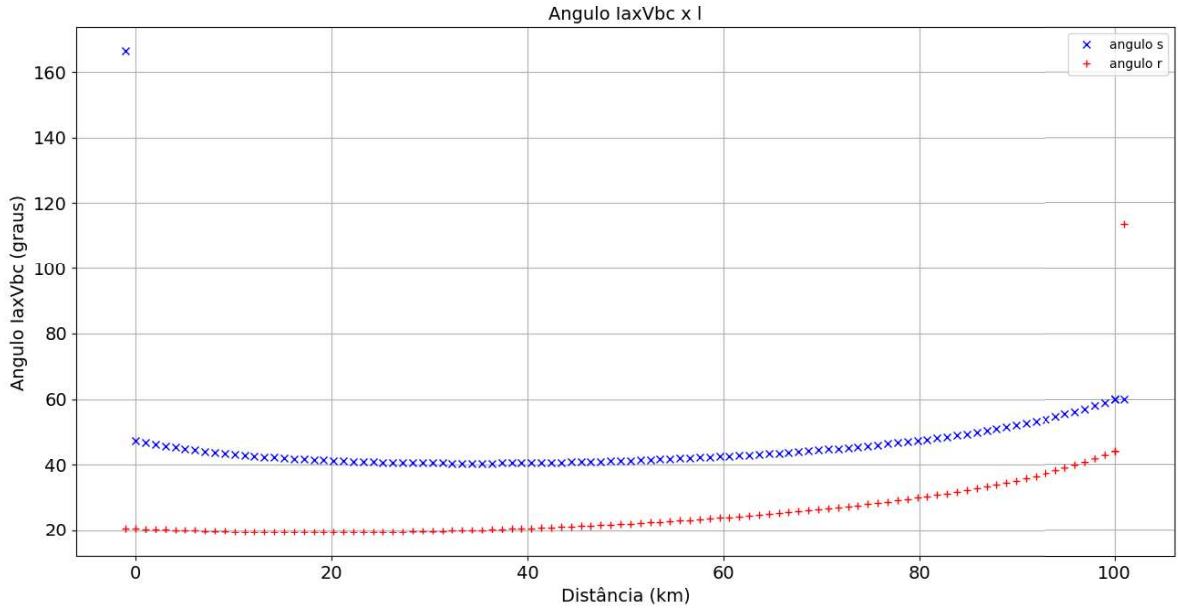
Figura 53: Gráfico da tensão V_{bc} por distância no relé SIEMENS 7SJ62.



Fonte: Autoria Própria.

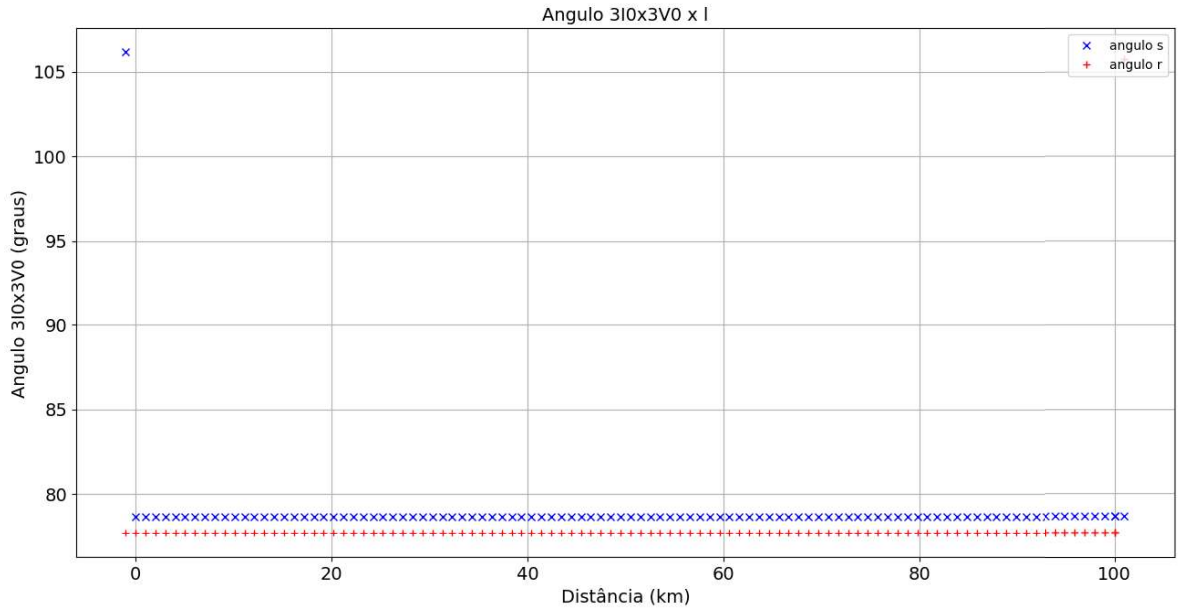
Já os resultados apresentados nas Figuras 55 e 56, são os ângulos formados entre as correntes de sequência negativa e zero relativamente às tensões de sequência negativa e zero respectivamente. Com estes valores, é possível ajustar-se o parâmetro 1619A, *Rotation Angle of Reference Voltage*.

Figura 54: Gráfico do ângulo entre Ia e Vbc por distância no relé SIEMENS 7SJ62.

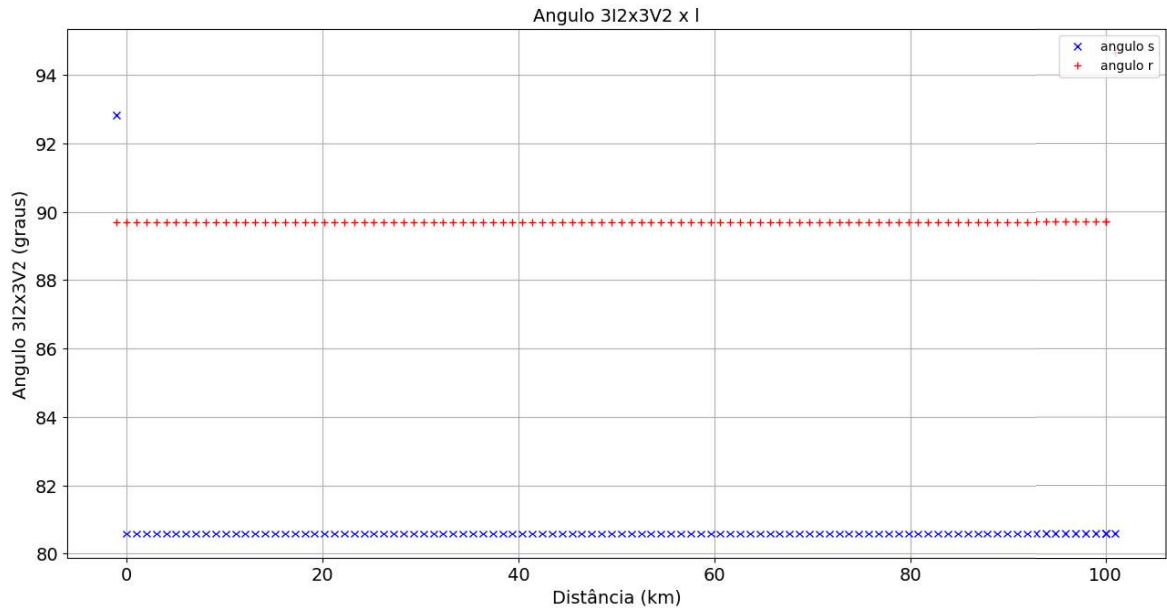


Fonte: Autoria Própria.

Figura 55: Gráfico do ângulo entre $-3I_0$ e $3V_0$ por distância no relé SIEMENS 7SJ62.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 56: Gráfico do ângulo entre $-3I_2$ e $3V_2$ por distância no relé SIEMENS 7SJ62.

Fonte: Aatoria Própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação para a realização deste trabalho surgiu pela observação das dificuldades de profissionais e estudantes da área de proteção em entender como configurar os diversos modelos de relés de proteção existentes no mercado. Assim surgiu a ideia de iniciar o desenvolvimento de uma ferramenta que busca auxiliar profissionais e estudantes na configuração da função direcional de sobrecorrente de três modelos de relés de proteção, de fabricantes distintos.

O trabalho iniciou pelo estudo das bibliografias relacionadas ao assunto. Buscamos analisar as publicações mais recentes em relação a proteção de sistemas e também a bibliografia clássica para entendimento da função direcional de sobrecorrente. Neste estudo verificamos que existem muitos trabalhos sobre o funcionamento de funções específicas, entre elas a função direcional de sobrecorrente, outros tantos trabalhos cobrem os estudos de novas funções de proteção, também sobre a coordenação de relés de proteção e expressivas simulações de funções. Com isso pudemos constatar que não existe ainda nenhuma ferramenta como a que desenvolvemos neste trabalho, tornando o trabalho inédito neste sentido.

Com o estudo dos relés escolhidos pudemos ter uma ideia da complexidade que o ajuste de uma única função pode ter quando precisamos configurar essa função em relés de diferentes fabricantes. Esta complexidade se traduziu em dificuldades para o desenvolvimento deste trabalho, como: interpretação dos manuais dos fabricantes, pois possuem linguagem apropriada para profissionais experientes e em geral não são em nossa língua, contendo palavras técnicas que não são usadas frequentemente e às vezes encontram-se traduções duvidosas. Dada tamanha dificuldade, percebeu-se a importância deste trabalho, visto que muitas horas de engenharia em leitura e interpretação podem ser suprimidas com o auxílio do aplicativo desenvolvido, ou, pelo menos, podem ser consultadas nos casos de dúvidas pontuais. Em alguns casos ainda, as dúvidas podem ser equacionadas no próprio aplicativo.

Baseado na ideia do aplicativo e nas dificuldades mencionadas em relação a complexidade e diferenças entre os fabricantes, foi necessário escolher uma linguagem de programação para o desenvolvimento do software. A linguagem de programação *Python* foi escolhida por ser de código aberto, orientada a objetos, com grande participação no mercado e uma linguagem com grande aceitação no meio acadêmico. Um programa deve conter todas as informações que resolvem um problema específico. Assim, o aplicativo desenvolvido em

código aberto, além de auxiliar com o resultado gerado em sua rotina, também trás em seus *scripts* as informações lidas, traduzidas e interpretadas nas leituras dos manuais dos relés de proteção. Neste caso ainda, de acordo com a capacitação do usuário, o código pode ser alterado para uma melhor apresentação da solução.

Como a ideia do aplicativo já surgiu com a possibilidade de expansão e melhoria contínua em trabalho colaborativo, a aplicação desenvolvida foi dividida em três módulos que se conectam, garantindo organização e facilidade de entendimento. Apesar da metodologia de rotina funcional ter sido escolhida (ao invés da orientação a objetos), devido ao pouco conhecimento adquirido sobre a linguagem *Python* limitado ao período disponível para este trabalho, ainda assim essa escolha proporcionará futuras ampliações do aplicativo sem que seja necessário sua completa remodelação.

Após o desenvolvimento do aplicativo, neste trabalho e com este aplicativo, simulamos faltas em regime permanente ao longo de uma linha e pudemos verificar como se comportam as grandezas traduzidas em ajustes utilizados em cada relé em cada ponto de falta. Como no exemplo dado, o profissional ou estudante de proteção poderá ter maior segurança na escolha de cada ajuste devida aos resultados obtidos graficamente. Além disso, como o aplicativo é aberto à entrada de dados tanto em primário quanto secundário dos TCs e TPs, com cálculos adequados para linhas curtas ou longas e possibilidade de alteração de número de pontos de análise, o engenheiro de proteção pode simular o comportamento dos ajustes dos relés em formas diferentes e pode interpretar situações diversas. Cabe ressaltar porém, que, devido a limitações do TCC, o aplicativo, neste momento está limitado a faltas monofásicas na fase A e não possui reatores de compensação para as extremidades de linhas longas no sistema simples deste trabalho.

Por fim, os objetivos deste trabalho foram atingidos, quando conseguimos dar início a uma série de outros trabalhos que poderão resultar deste, como por exemplo a adequação de reatores de compensação, a inclusão de transformadores, linhas paralelas, expansão do sistema, inclusão de outras funções de proteção e outros fabricantes e modelos de relés, tudo isso e mais fica a cargo de outros trabalhos de conclusão de curso como este ou por outros tipos de trabalhos. A possibilidade de inserção do aplicativo na *internet* também dá maior aplicabilidade e com o trabalho colaborativo em código aberto, a interpretação dos mais diversos manuais de relés de proteção e expansões necessárias podem ser feitas por diversos usuários em qualquer lugar em que a *internet* esteja acessível. O objetivo deste trabalho não foi esgotar o assunto e sim, colaborar para o desenvolvimento de uma ferramenta que, a cada pequena melhoria, pode se tornar um grande instrumento de aprendizado e/ou utilização pelos profissionais de proteção

do sistema elétrico.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho verificamos que muitos assuntos poderiam derivar-se deste, de forma a complementá-lo. Assim, seguem algumas sugestões de trabalhos que poderão ser desenvolvidos a partir dos estudos realizados até aqui:

- Inclusão de outros modelos de relés dos mesmos fabricantes, com ajustes diferentes;
- Inclusão de outros modelos de relés e de outros fabricantes;
- Inclusão de novas funções de proteção;
- Inclusão de outros arranjos de sistemas como linhas paralelas, transformadores, reatores de compensação;
- Desenvolvimento de Interface *WEB*;
- Desenvolvimento de aplicativo para celular.

REFERÊNCIAS

- ALCAHUAMAN, M. E. Z. **Otimização de linhas de transmissão para manobra de abertura monopolar – análise da influência dos parâmetros transversais do sistema de compensação reativa**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 2013.
- ALMEIDA, A. L. V. **Ajuste e Coordenação de Relés de Sobrecorrente**. 2006. Disponível em: <file:///E:/TCC/Referência%20utilizadas/Andre%20vitorino.pdf>. Acesso em: 28 de novembro de 2018.
- BERROCAL, J. D. V. **Estudo do elemento direcional de proteção em uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda**. UNICAMPI, 2017.
- BORDINI, F. M.; MIRANDA, J. F. P.; ANDREATA, R. L. **Projeto e construção de módulo didático para estudo de proteção em instalações elétricas industriais com grupo motor-generador**. Curitiba, PR: Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.
- CHELLIAH, T. R.; ALLAMSETTY, S. **Coordination of Directional Over-Current Relays Using MATLAB/Simulink and Their Integration into Undergraduate Power System Protection Courses**. Hong Kong, China: 10th International Conference on Advances in Power System Control, Operation Management - APSCOM, 2015.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. São Carlos-SP: LTC, 2007.
- DOCENA, A. P. P.; PEREIRA, J. E. G.; VIOLATO, J. O. **Software para cálculo de curto-circuito e suas aplicações para proteção de sistemas industriais**. Curitiba, PR: Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2003.
- FLEMING, B. **Elemento Direcional de Impedância de Sequência Negativa**. Pasadena, California: Apresentado na 10th Annual ProTest User Group Meeting, 1998.
- GE, G. E. **D90PLUS LINE DISTANCE PROTECTION SYSTEM Instruction Manual. Product version: 1.9x**. USA: GE publication code: 1601-9019-F4 (GEK-113468D), 2016.
- ITAIPU. **Jornal de Itaipu Eletrônico**. 2009. Disponível em: <<http://jie.itaipu.gov.br/node/41724>>. Acesso em: 09 de outubro de 2017.
- JOHNSON JONH L. HILBURN, J. R. J. D. E. **FUNDAMENTOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS**. Rio de Janeiro, RJ: 4ªEd. Ed. LTC, 1994.
- KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis, SC: Edição do Autor, V.1, 2012.

KLOCK JR, O. S. **Programa computacional para verificação da coordenação e auxílio na determinação dos ajustes de relés direcionais de sobrecorrente de neutro de linhas de transmissão**. Florianópolis, SC: Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

LAUBE, K. P. **10 motivos para você aprender a programar em python**. 2009. Disponível em: <<https://www.profissionaisti.com.br/2009/01/10-motivos-para-voce-aprender-a-programar-em-python/>>. Acesso em: 18 de setembro de 2018, 20h50.

MAMEDE, J. F. **Manual de Equipamentos Elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MANDAVA, P.; KARADY, D. G. G. **Pilot Directional Protection Using Negative Sequence Directional Element**. Tempe, USA: School of Electrical, Computer and Energy Engineering - Arizona State University, 2014.

MISIAK, F.; TAVARES, L. V.; DANIEL, R. E. **Ensaio para relés de proteção através de mala de testes trifásica**. Curitiba, PR: Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.

NEGRÃO, D. L. A. **Ferramenta computacional para a determinação dos ajustes da proteção direcional de sobrecorrente de linhas de transmissão através do método do melhor ajuste local**. Brasília, Brasil: XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNTPEE. Brasília, Brasil, 2015, 2015.

ONS. **O Sistema em Números**. 2016. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 09 de outubro de 2017.

PYTHON. **História da Linguagem Python**. 2018. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/license.html>>. Acesso em: 18 de setembro de 2018, 20h50.

PYTHONBR. **História da Linguagem Python**. 2018. Disponível em: <<https://python.org.br/empresas/>>. Acesso em: 22 de setembro de 2018, 10h38.

ROBERTS, J.; GUZMÁN, A. **Directional Element Design and Evaluation**. 2006. Disponível em: <<https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6009>>. Acesso em: 28 de novembro de 2018.

SEL, S. E. L. I. **SEL-311L-1, -7 Relay Protection and Automation System Instruction Manual**. USA: SEL Date Code 20111031, 2011.

SIEMENS, L. I. **SIPROTEC Relé de Proteção Multifunção com Controle Local 7SJ62/63/64 V4.6 Manual**. ALEMANHA: SIEMENS C53000-G1179-C147-1, 2007.

WANG Y. K. AND LI, M. J. T. W. Q. **A Directional Protection Scheme Based on Non-periodic Current for Transmission lines**. Guangzhou, China: School of Electrical Power Engineering - South China University of Technology, 2017.