

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LEONARDO DE ANDRADE CRUZ**

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA CONFIGURAÇÃO DE RELÉS DE  
DISTÂNCIA COMERCIAIS**

**CURITIBA**

**2023**

**LEONARDO DE ANDRADE CRUZ**

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA CONFIGURAÇÃO DE RELÉS DE  
DISTÂNCIA COMERCIAIS**

**Application development for configuring commercial distance relays**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Dr. Fabiano Gustavo Silveira Magrin.

**CURITIBA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LEONARDO DE ANDRADE CRUZ**

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA CONFIGURAÇÃO DE RELÉS DE  
DISTÂNCIA COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de  
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/agosto/2023

---

Fabiano Gustavo Silveira Magrin  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Paulo Cícero Fritzen  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Victor Baptista Frencl  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiro a Deus, pela oportunidade de viver, aprender, conceder saúde e perseverança durante esta trajetória;

Agradeço à minha esposa, Gabriele, por estar ao meu lado em todos os momentos, me apoiando, tendo paciência e me fornecendo todo amor;

Agradeço à minha família, que sempre me incentivaram, prestaram apoio e compreensão principalmente pelos momentos de ausência;

Agradeço aos meus amigos, que sempre torceram por mim;

Agradeço ao meu orientador Dr. Fabiano Magrin, por me apoiar durante a graduação me dando subsídios nas disciplinas, elaboração do trabalho de conclusão de curso e principalmente me auxiliando a ser um profissional melhor.

## RESUMO

As linhas de transmissão são os componentes do sistema elétrico com maior índice de ocorrência de faltas. Isso se deve à sua exposição as condições climáticas em amplas extensões de território. Várias funções de proteção são utilizadas para a proteção destas linhas de transmissão, mas a função que mais se destaca é a função proteção de distância desempenhada pelos relés, que é uma proteção designada especialmente designada para linhas de transmissão. Esta função é formada por zonas de proteção, que são definidas por ajustes, que especificam o tamanho da zona e o tempo de atuação. Os relés de proteção possuem modelos de curvas para esta função e cada fabricante de relé tem seu padrão e parâmetros para realizar os ajustes. Os relés utilizados neste trabalho foram GE L90, SEL 311L e SIEMENS 7SL86. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada apenas a curva MHO. O aplicativo desenvolvido utiliza a linguagem de programação Python para executar todo o algoritmo. O usuário insere os parâmetros do sistema desejado e com essas informações, ele pode executar o algoritmo, que gera gráficos com informações, como correntes, tensões e curvas MHO, de acordo com a falta e com o fabricante do relé desejado. O aplicativo é uma importante ferramenta que pode auxiliar na análise, tomada de decisões, aprendizado e testes para estudantes e profissionais da área de proteção.

**Palavras chaves:** Proteção, distância, linhas de transmissão, relés, aplicativo.

## **ABSTRACT**

Transmission lines are the components of the electrical system with the highest rate of occurrence of faults. This is due to its exposure to climatic conditions in large extensions of territory. Several protection functions are used for the protection of these transmission lines, but the most outstanding function is the distance protection function performed by the relays, which is a protection designed especially for transmission lines. This function is formed by protection zones, which are defined by adjustments, which specify the zone size and the actuation time. Protection relays have curve models for this function and each relay manufacturer has its standard and parameters to perform the adjustments. The relays used in this work were GE L90, SEL 311L and SIEMENS 7SL86. For the development of this work, only the MHO curve was used. The developed application uses the Python programming language to run the entire algorithm. The user enters the desired system parameters and with this information, he can run the algorithm, which generates graphs with information, such as currents, voltages and MHO curves, according to the fault and the manufacturer of the desired relay. The application is an important tool that can assist in analysis, decision-making, learning and testing for students and professionals in the field of protection.

**Keywords:** Protection, distance, transmission lines, relays, application.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha de transmissão .....	19
Figura 2 – Circuito de linha de transmissão.....	19
Figura 3 – Disposição de condutores em torre de transmissão.....	20
Figura 4 – Transposição de fases .....	21
Figura 5 – Circuito equivalente de linha de transmissão .....	22
Figura 6 – Seleção de tensão e corrente no relé de proteção .....	27
Figura 7 – Impedâncias visto pelo relé de proteção .....	28
Figura 8 – Unifilar com curto-circuito .....	29
Figura 9 – Circuito equivalente curto-circuito monofásico.....	30
Figura 10 – Circuito equivalente curto-circuito bifásico .....	33
Figura 11 – Circuito equivalente curto-circuito bifásico-terra.....	36
Figura 12 – Circuito equivalente curto-circuito trifásico.....	38
Figura 13 – Característica de distância de fase MHO direcional .....	42
Figura 14 – Exemplo de formas com características de distância MHO.....	43
Figura 15 – Características MHO .....	44
Figura 16 – Diagrama lógico de tensão polarização.....	45
Figura 17 – Diagrama lógico MHO zona 1 e 2 de fase .....	46
Figura 18 – Diagrama lógico MHO zona 3 e 4 de fase .....	47
Figura 19 – Diagrama lógico MHO zona 1 e 2 de terra .....	48
Figura 20 – Diagrama lógico MHO zona 3 e 4 de terra .....	49
Figura 21 – MHO polarização operação SEL .....	50
Figura 22 – MHO polarização restrição SEL.....	50
Figura 23 – Diagrama lógico com curva MHO - Siemens .....	53
Figura 24 – Diagrama vetorial MHO - Siemens.....	54
Figura 25 – Sistema completo existente no aplicativo .....	55
Figura 26 – Sistema LT simples sem shunt.....	56
Figura 27 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal S – 400 km – GE.....	61
Figura 28 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal R – 300 km – GE.....	62
Figura 29 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal S – 400 km – GE.....	63
Figura 30 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal R – 300 km – GE.....	63
Figura 31 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 400 km – GE.....	64
Figura 32 – Gráfico MHO – Não atuação falta AG – LT 400 km – GE.....	65
Figura 33 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 400 km – GE.....	65
Figura 34 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – 400 km – GE.....	66
Figura 35 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 300 km – GE.....	66
Figura 36 – Gráfico MHO – Não atuação falta AG – LT 300 km – GE.....	67
Figura 37 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 300 km – GE.....	67
Figura 38 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal S – 400 km – GE .....	68
Figura 39 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal R – 300 km – GE .....	69
Figura 40 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal S – 400 km – GE.....	69
Figura 41 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal R – 300 km – GE.....	70
Figura 42 – Gráfico MHO – Atuação falta BC – LT 400 km – GE.....	71
Figura 43 – Gráfico MHO – Não atuação falta BC – LT 300 km – GE.....	71
Figura 44 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal S – 200 km – SEL .....	72
Figura 45 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal R – 500 km – SEL.....	73
Figura 46 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal S – 200 km – SEL.....	74
Figura 47 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal R – 500 km – SEL.....	74

<b>Figura 48 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 200 km – SEL.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 49 – Gráfico MHO – Não atuação falta AG – LT 500 km – SEL.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 50 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal S – 200 km – SEL .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 51 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal R – 500 km – SEL .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 52 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal S – 200 km – SEL .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 53 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal R – 500 km – SEL .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 54 – Gráfico MHO – Não atuação falta BC – LT 200 km – SEL .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 55 – Gráfico MHO – Atuação falta BC – LT 500 km – SEL .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 56 – Gráfico correntes – Falta AG – Terminal S – 100 km – Siemens</b>	<b>80</b>
<b>Figura 57 – Gráfico correntes – Falta AG – Terminal R – 425 km – Siemens</b>	<b>81</b>
<b>Figura 58 – Gráfico tensões – Falta AG – Terminal S – 100 km – Siemens ..</b>	<b>82</b>
<b>Figura 59 – Gráfico tensões – Falta AG – Terminal R – 425 km – Siemens ..</b>	<b>82</b>
<b>Figura 60 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal S – 100 km – Siemens .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 61 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal S – 100 km – Siemens .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 62 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal R – 425 km – Siemens .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 63 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal R – 425 km – Siemens .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 64 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens</b>	<b>86</b>
<b>Figura 65 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens</b>	<b>86</b>
<b>Figura 66 – Gráfico tensões – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens ..</b>	<b>87</b>
<b>Figura 67 – Gráfico tensões – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens ..</b>	<b>87</b>
<b>Figura 68 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 69 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 70 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 71 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens .....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
LD	Linha de Distribuição
LT	Linha de Transmissão
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
SE	Subestação de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TP	Transformador de Potencial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Tema</b>	<b>10</b>
1.1.1	Delimitação do Tema	12
<b>1.2</b>	<b>Problema e premissas</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
<b>1.4</b>	<b>Justificativa</b>	<b>14</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO TEÓRICO</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Proteção de linhas de transmissão</b>	<b>16</b>
2.1.1	Proteção de distância (21/21N)	18
2.1.2	Medições	28
<b>3</b>	<b>RELÉS COMERCIAIS</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>General Electric – L90</b>	<b>39</b>
3.1.1	Características MHO L90	41
3.1.2	Características de polarização L90	44
<b>3.2</b>	<b>Schweitzer Engineering Laboratories – 311L</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>Siemens – 7SL86</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>APLICATIVO E SIMULAÇÕES</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>SISTEMA</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>PARÂMETROS</b>	<b>56</b>
<b>4.3</b>	<b>EXECUÇÃO DO PROGRAMA</b>	<b>60</b>
<b>4.4</b>	<b>GRÁFICOS</b>	<b>60</b>
4.4.1	Relé GE – L90	61
4.4.2	Relé SEL – 311L	72
4.4.3	Relé SIEMENS – 7SL86	80
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>91</b>
<b>5.2</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO A – DESCRIÇÃO FUNÇÕES E DISPOSITIVOS</b>	<b>95</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema

A crescente utilização de energia elétrica, desde que começou a ser utilizada para iluminação, levou à construção de estações geradoras de grande capacidade, comumente distantes dos grandes centros consumidores. Para atender as cargas, é necessário a utilização de grandes Linhas de Transmissão (LT) e construção de Subestações de Energia (SE) elétrica, formando, assim, grandes sistemas elétricos interligados que cobrem todo o território nacional.

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é um conjunto abundante de sistemas elétricos, usinas geradoras de energia, SEs, LTs e receptores. Esse sistema é composto por geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

No caso da geração de energia elétrica, esta ocorre nas usinas através de sistemas mecânicos girantes, através do movimento, ou sistemas termodinâmicos, através do calor, que resultam na conversão para energia elétrica. Alguns exemplos de usinas de energia elétrica: hidrelétricas, de carvão mineral, nucleares, solares, eólicas, de biomassa etc.

Já a transmissão de energia elétrica baseia-se em LTs e SEs elevadoras/abaixadoras que transformam a energia elétrica em um nível de tensão adequado, dependendo da potência a ser transportada e da distância percorrida. Ou seja, é responsável pela transposição da energia elétrica pelo sistema.

As distribuições de energia elétrica são feitas através de Linhas de Distribuições (LDs) nas quais as tensões possuem níveis menores do que as tensões de transmissão, em que a tensão primária, geralmente entre 13,8 kV ou 34,5 kV, é entregue a um grande número de consumidores maiores como indústrias, *shopping centers*, grandes hospitais, etc. Há muitos transformadores nas LDs que abaixam as tensões para o nível usual para atender pequenos consumidores, portanto, as tensões secundárias, os níveis de tensão usuais normalmente são 380/220 V ou 220/127 V, atendem consumidores menores como residências e pequenos comércios.

Para garantir a geração, transmissão e distribuição citados acima, o SEP abrange diversos equipamentos como estruturas elétricas, condutores,

transformadores, torres, isoladores, disjuntores, seccionadores e diversos componentes envolvidos no controle, proteção e medição de energia elétrica.

Dada a tamanha importância do SEP, quando ocorre uma falha no sistema, o desligamento forçado de uma LT é indesejado, o que pode ocasionar a desconexão de um bloco de carga, no caso de não haver alternativas de recomposição.

Os desligamentos podem ser forçados ou programados. De acordo com o item 139, Submódulo 1.2, do documento denominado Procedimentos de Rede que apresenta um glossário de termos técnicos, um desligamento forçado é definido como desligamento de um componente de serviço, em condições não programadas (ONS, 2020.12).

O item 140 do mesmo documento, define ainda as características dos desligamentos programados, como sendo a indisponibilidade de uma função de transmissão ou parte dela, programada antecipadamente em conformidade com o estabelecido nos Procedimentos de Rede (ONS, 2020.12).

O item 138 do mesmo documento, também define as características dos desligamentos de emergência, como sendo o desligamento intempestivo, automático ou manual, ocasionado por uma falha no equipamento ou instalação (ONS, 2020.12).

O SEP é de grande importância para a sociedade, pois mantém ligada toda a estrutura elétrica, desde pequenos consumidores, como residências, até indústrias de grande porte. Apesar das melhorias de eficiência energética que vêm ocorrendo nos equipamentos (EPE, 2022), cada vez mais há um aumento no consumo de energia elétrica. Sendo assim, existe a necessidade da ampliação e reestruturação do SEP. Toda essa demanda remete à exigência de uma maior confiabilidade para o sistema, aplicando-se novas técnicas e metodologias.

As maneiras pelas quais as falhas de LTs ocorrem são classificadas em dois grupos, sendo exigido em ambos detecção, identificação e localização das falhas. O primeiro grupo trata do aparecimento de curtos-circuitos, chamado de falha elétrica decorrente de alguma falha. Sabe-se que curtos-circuitos podem ocorrer devido a um incêndio próximo da LT, a descargas atmosféricas, ao rompimento e queda de cabos e/ou torres etc. O segundo grupo inclui vários tipos de problemas que também podem levar ao aparecimento de curtos-circuitos com a possibilidade de interrupções da LT, como, uma trinca em isoladores (CGTI, 2022).

O SEP possui diversas malhas, em que é necessário a utilização de relés microprocessados para utilização de funções avançadas de proteção, em que realiza a detecção do tipo de falta e aplicações corretas de acordo com sua seletividade.

Para a obtenção da seletividade e proteção mencionadas anteriormente, são utilizados relés de proteção que possuem as finalidades de monitorar as condições do sistema elétrico onde está instalado e, quando identificadas condições anormais de operação, realizar um comando de abertura por proteção (disparo) para um ou mais disjuntores associados ao equipamento com falha.

Para o relé realizar todo monitoramento, controle, proteção e demais funções é necessário configurar cada ponto; esta configuração é denominada parametrização. A finalidade da parametrização do relé é inserir corretamente os parâmetros de proteção determinados por estudos, inseridos os valores e implementando lógicas.

Neste aspecto de estudos avançados e parametrização, é comum diferentes fabricantes de relés de proteção possuírem formas de parametrização distintas. Com isso há uma gama enorme de mecanismos e formas para utilização de relés de proteção. Com essa diversificação, os profissionais que trabalham na área de parametrização de relés de proteção encontram grandes desafios para configurar a mesma função de proteção em relés de diferentes fabricantes.

Na atual conjuntura, este trabalho propõe a colaboração para o desenvolvimento de um aplicativo para configuração de relés de distância comerciais, o qual poderá ser utilizado como ferramenta para configuração de relés de proteção.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) dá continuidade a uma linha de pesquisa com o intuito de aprimorar um aplicativo desenvolvido por Mendes e Silva (2019) e aprimorado por Oliveira, Lima e Santos (2020), acrescentando uma nova função de proteção. Este aplicativo possui atualmente a função de sobrecorrente direcional (67)<sup>1</sup>, aplicado em faltas fase-terra ( $\phi g$ ), fase-fase ( $\phi\phi$ ), fase-fase-terra ( $\phi\phi g$ ) e trifásicas ( $3\phi$ ). Através do *software* é possível simular diversas faltas ao longo

---

<sup>1</sup> As funções, dispositivos do sistema e seus respectivos códigos estão descritos no Anexo A.

da LT, gerando gráficos que serão disponibilizados ao profissional que os utilizará como ferramenta de análise.

Para este trabalho, será inserido no *software* a função de distância (21), aplicando a relés de diferentes fabricantes, com diferentes formas e metodologia, dando sequência no desenvolvimento e aprimoramento do aplicativo. O *software* utiliza a linguagem Python versão 3.

## 1.2 Problema e premissas

Com as faltas e os eventos de desligamentos que podem ocorrer em uma LT, é necessário ter um relé de proteção com ajustes e parametrização realizados de forma correta para não ocorrer um desligamento não programado sem condições de falta, ou seja, um desligamento indesejado, e para atuar corretamente quando ocorrer os eventos de faltas ao longo da LT. Conforme visto na Seção 1.1, o sistema elétrico está em constante expansão, e, principalmente, inserindo novas formas de geração, as quais requerem muita atenção e novos estudos para garantir o melhor ajuste para proteção dessas LTs.

Aproximadamente 70% das ocorrências que acontecem na rede básica são nas LTs. Isso se explica, devido às LTs possuírem maior exposição as condições climáticas e extensão territorial comparadas aos outros equipamentos do SEP. Os motivos de desligamentos são diversos, mas as condições meteorológicas adversas, como vento forte, chuva/temporal, descarga atmosférica etc., são as que compõem a maior parcela, o que corresponde cerca de 30%; na sequência, com 25%, são os desligamentos ocasionados por causa das queimadas e 8% são decorrentes de vegetações próximas as LTs (ONS, 2022).

Com os dados supracitados, é possível observar que a LT precisa de uma atenção especial, visto a porcentagem de desligamento que ocorre, principalmente por ficar exposta a fatores naturais e, geralmente, por sua grande extensão territorial.

O modo de configurar diferentes relés de proteção, no que tange à função de distância para proteção de LTs, torna-se uma dificuldade, pois há diversos fabricantes que possuem metodologias e técnicas distintas entre si. Há desafios em entender como se dá a função de distância, pois é necessário estudar as lógicas, os parâmetros de entrada para configuração do relé e o teste da função.

Visto a dificuldade que se encontra para fazer a análise dos relés de diferentes fabricantes, em que demanda tempo para coletar todas as informações, além disso é necessário adaptar-se a cada fabricante e requer custos de *software* e *hardwares*. Para usar de uma forma mais eficiente o tempo, será implementada a função de distância MHO dentro do *software*.

Para tal análise é necessário o usuário inserir dados no *software* referentes aos circuitos que será analisado, ou seja, informações sobre a linha, se há reator *shunt*, escolher o tipo de falta e fabricante do relé.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Aprimorar o aplicativo de auxílio à configuração dos relés de proteção pelo acréscimo da função de distância para três fabricantes de relés de proteção.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Estudar documentações referentes a relés de proteção com função de distância;
- Estudar cada especificidade da função de distância de três fabricantes de relés;
- Estudar a linguagem de programação Python;
- Desenvolver algoritmo para através dos parâmetros inseridos, calcular faltas e retornar valores e gráficos, conforme cada ajuste.

### **1.4 Justificativa**

Há metodologias distintas da função de distância para diferentes fabricantes de relé de proteção. Sendo assim, os profissionais da área de proteção dedicam muito tempo para entender metodologias adotadas pelo fabricante para parametrizar corretamente o relé. Com base nessa premissa, é necessário concentrar todas as informações em uma única plataforma, para auxiliar os profissionais buscarem informações facilmente e simular cada situação. Portanto foi escolhido aprimorar um *software* existente, acrescentando a função de distância.

A ferramenta irá facilitar análises porque direcionará os profissionais a inserir os parâmetros necessários para cada relé de proteção e verificar a melhor atuação

da proteção e contribui para o desenvolvimento do sistema elétrico de potência com maior confiabilidade, qualidade, segurança e com menor tempo. Neste trabalho foram utilizados os relés de proteção dos fabricantes mais utilizados no mercado.

O *software* existente já foi desenvolvido em linguagem Python, portanto, a implementação da função de distância seguirá a mesma linguagem de programação. A linguagem Python é de alto nível, aberta e que funciona no lado do servidor, em que compila, interpreta e executa a estruturação da lógica de alguma aplicação. Além disso, no Python, há abundantes plataformas diferentes em que o *software* pode ser utilizado e que pode empregar fragmentos de códigos em outros tipos de linguagem por exemplo, Java.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

Capítulo 1 – Introdução, objetivos, justificativa e estruturação do trabalho.

Capítulo 2 – Desenvolvimento teórico referente às LTs, relés de proteção, proteções de LTs e enfatizar os relés de proteção com a função de distância e cálculos para detecção de diferentes faltas para esta função.

Capítulo 3 – Descrição de metodologia de três principais fabricantes de relés de proteção que serão utilizados nesse trabalho, sendo necessário buscar manuais e estudar como ocorrem suas atuações, descobrindo as especificidades de cada fabricante. Descrição das variáveis de entrada necessárias para *software* de acordo com fabricante, para então o algoritmo gerar os gráficos de saída.

Capítulo 4 – Desenvolvimento da função de distância em linguagem Python, pois o algoritmo desenvolvido na ferramenta para a função direcional de sobrecorrente já está desenvolvido nesta linguagem, sendo necessário somente a inserção da nova função proposta com a mesma linguagem. Aplicação da função e realizar simulações através de faltas em LTs, apresentar resultados e verificando as alternativas de ajustes para cada fabricante.

Capítulo 5 – Conclusão sobre o trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Este capítulo visa desenvolver conhecimento sobre a função principal estudada neste TCC que é a função de distância, contendo bases teóricas e conceitos sobre modelos de faltas denominados *loops* de faltas.

### 2.1 Proteção de linhas de transmissão

Para uma operação segura de LT são dispostos relés de proteção, os quais ficam em painéis nas SEs, geralmente nas casas de comando ou em uma área externa, como no pátio das SEs. Existem diversas funções de proteções que podem ser aplicadas em uma LT, dependendo da complexidade do sistema e dos níveis de tensão. Dentre várias funções que pode-se encontrar em proteção de LT, número referente a função e equipamentos é descrito no anexo A e as principais são descritas abaixo:

- Proteção Sobrecorrente Instantânea (50/50N);
- Proteção Sobrecorrente Temporizada (51/51N);
- Proteção Sobrecorrente de Emergência (50E)
- Proteção de Sobretensão (59);
- Proteção de Subtensão (27);
- Teleproteção (85);
- Proteção Diferencial de Linha (87L);
- Proteção Sobrecorrente Direcional (67/67N);
- Proteção de Distância (21/21N).

As proteções serão descritas abaixo, como operam nas LTs, porém será dado maior ênfase à função de proteção de distância, a qual será foco deste trabalho.

As funções de sobrecorrente instantânea (50), sobrecorrente instantânea de neutro (50N), sobrecorrente temporizada (51) e sobrecorrente temporizada de neutro (51N) geralmente não são utilizadas como proteções principais em LTs, pois existem diversas dificuldades para realizar ajustes, visto a complexidade do sistema elétrico. A função de sobrecorrente de emergência (50E) é ativada automaticamente quando

há perdas dos sinais provenientes dos transformadores de potencial, portanto, esta função basicamente está atuando como retaguarda da função de distância (21). Essa função atua para uma corrente com valor superior ao especificado no ajuste. A função monitora as correntes das três fases  $\hat{I}_a$ ,  $\hat{I}_b$  e  $\hat{I}_c$ . Caso ocorra uma anomalia no sistema, em que a corrente do sistema exceda o valor do ajuste, o relé envia instantaneamente um sinal de abertura ao disjuntor.

A funções de subtensão (27) e sobretensão (59) em LTs não atuam diretamente para abertura do disjuntor, mas sinalizam através de alarmes no relé e enviam para o supervisor, quando o valor de tensão ultrapassa o limite especificado no ajuste. As funções de subtensão e sobretensão monitoram as tensões das três fases  $\hat{V}_a$ ,  $\hat{V}_b$  e  $\hat{V}_c$ . Acontecendo uma anomalia no sistema, em que a tensão do sistema exceda o valor do ajuste, o relé envia alarmes ou ao identificar a perda dos sinais de tensão provenientes do transformador de potencial, ativará através de lógicas a função de sobrecorrente de emergência (50E).

A função da teleproteção (85), que está sempre presente nas LTs, é a função de comunicação entre os relés de diferentes SEs de uma LT. A teleproteção foi desenvolvida para atender à exigência de seletividade total e desligamento rápido de uma LT. Para realizar a comunicação é obrigatório um meio de transmissão, denominado canal piloto. Esses mecanismos são formados basicamente fio piloto, onda portadora (*Carrier*), microondas, fibras ópticas (cabo dielétrico de fibra óptica ou cabo *Optical Ground Wire* (OPGW)). A principal função é enviar e receber comandos elétricos, sendo assim sendo mais seletivo para abertura em momentos de falhas, além de transportar diversas informações importantes para o sistema.

Quando a LT possui teleproteção de alta tecnologia, pode ser empregada na proteção a função de diferencial de linha (87L), que é uma função de proteção da LT que se embasa na comparação entre correntes elétricas dos dois terminais, ou seja, entre as duas SEs da LT. Essencialmente trata-se da utilização da 1ª lei de Kirchhoff, isto é, o somatório das correntes que entram em um nó é igual ao somatório das correntes que saem de um nó. Para aplicação no relé é realizado um ajuste da corrente diferencial, em que, é feita uma comparação entre os terminais remotos e comparando com a corrente de ajuste. Por isso é necessário ter a comunicação entre as duas SEs em que é utilizada a teleproteção. Quando ocorrer uma anomalia no sistema, na qual a corrente diferencial da LT exceda o valor do ajuste, os relés enviam instantaneamente um sinal de abertura dos dois disjuntores

da LT. As proteções diferenciais de LTs são viáveis somente porque as correntes entre as duas SEs são enviadas através do sistema de comunicação.

A função de sobrecorrente direcional (67) e sobrecorrente direcional de neutro (67N) atuam se a corrente estiver com valor superior ao especificado e a diferença do ângulo de grandezas (direcionalidade), que normalmente são tensão e corrente, estiver dentro dos valores pré-ajustados. A função de sobrecorrente direcional (67), de acordo com as filosofias das Proteções das LTs de Alta e Extra-Alta Tensão da Rede de Operação do ONS, esta função não deve ser utilizada nos esquemas de proteção das LTs de alta e extra-alta tensão, que possuem proteções de distância para a mesma finalidade. Além disso, sua utilização pode impor limitação ao carregamento da LT.

A função de sobrecorrente direcional de neutro (67N) geralmente monitora a somatória das três fases  $\hat{I}_a^2$ ,  $\hat{I}_b$  e  $\hat{I}_c$  e tensões das três fases  $\hat{V}_a$ ,  $\hat{V}_b$  e  $\hat{V}_c$ . Esta função é habilitada para identificar faltas relacionadas a altas impedâncias, por exemplo, galhos de árvores. A atuação da função de sobrecorrente direcional é realizada conforme a referência de polarização. Desse modo, a função exige uma grandeza de polarização e uma grandeza de operação.

### 2.1.1 Proteção de distância (21/21N)

Para tratar especificamente dessa função, será necessária a explanação da disposição física e do comportamento do circuito elétrico da LT.

Uma LT utiliza normalmente um sistema trifásico, em corrente alternada. Estas linhas são compostas de torres metálicas, as quais fazem a sustentação dos componentes. As LTs possuem três fases denominadas a, b e c, que dispõem de um ou mais condutores por fase. Esses condutores são os responsáveis por conduzir toda a corrente até o local pretendido.

Há diversas características para condutores, que são estabelecidos conforme pré-determinado em estudos e projetos. Essas características podem ser, por exemplo, material, nível de tensão, temperatura, ampacidade e resistência à tração mecânica.

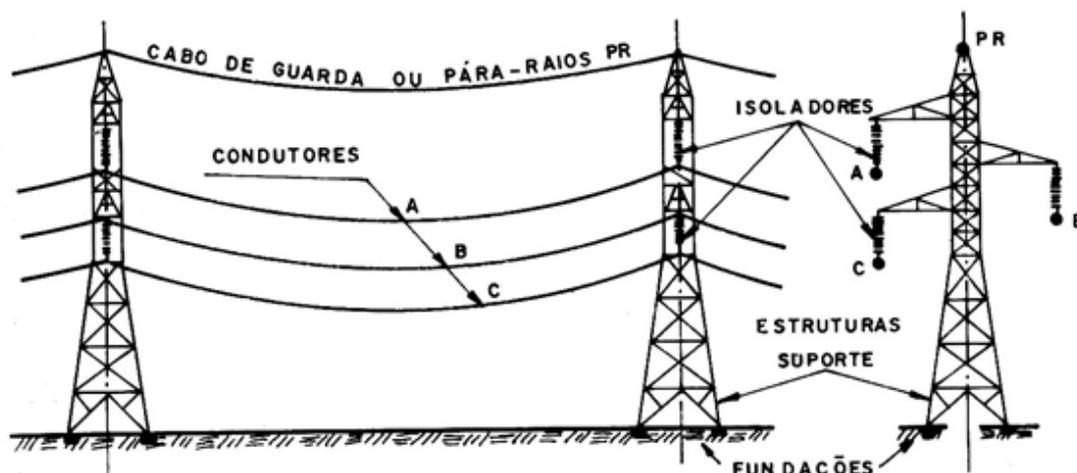
Além dos condutores das fases, toda a linha tem um cabo denominado guarda. O cabo guarda tem a função de blindar os condutores de força das

---

<sup>2</sup> A simbologia “^” denota um fasor.

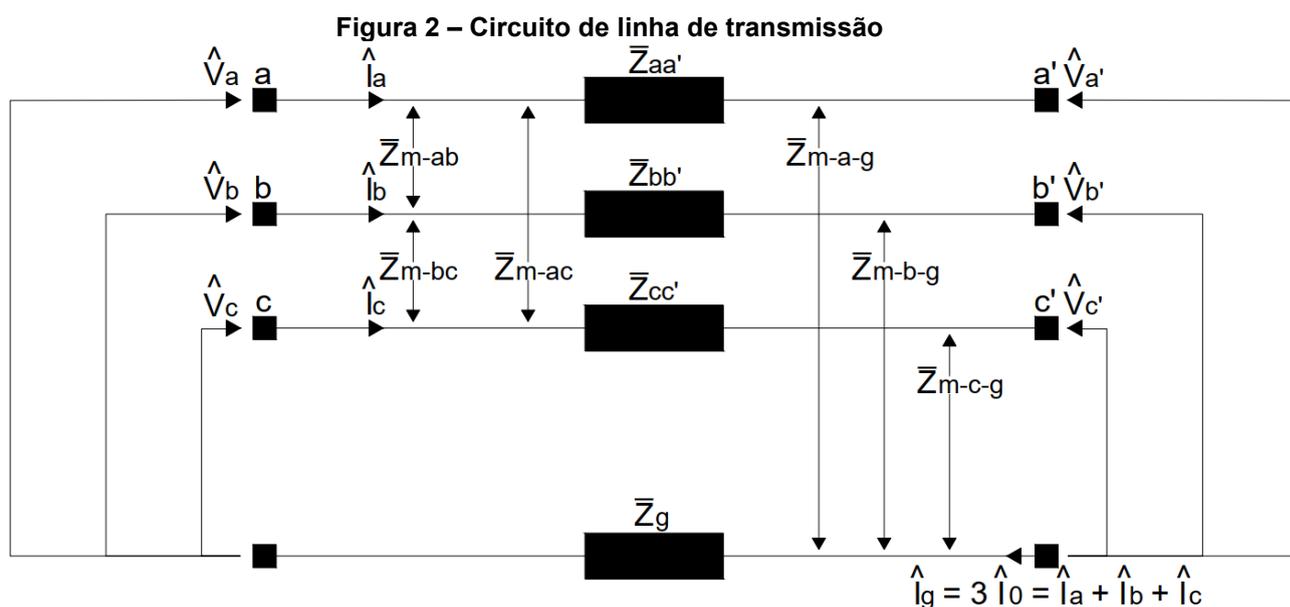
descargas atmosféricas e conectar os pontos de aterramento ao longo da LT com as malhas de aterramento das SEs das extremidades, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Linha de transmissão



Fonte: Labegalini, P. R.; Labegalini, J. A.; Fuchs, R. D.; Almeida, M. T. (1992).

Uma LT, em geral, é composta conforme o circuito elétrico na Figura 2.



Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

$\bar{Z}_{aa'}$ <sup>3</sup>,  $\bar{Z}_{bb'}$  e  $\bar{Z}_{cc'}$  são impedâncias série de fase da LT;  $\bar{Z}_{m-ab'}$ ,  $\bar{Z}_{m-ac'}$  e  $\bar{Z}_{m-bc'}$  são impedâncias mútuas entre as respectivas fases e  $\bar{Z}_g$  é a impedância do

<sup>3</sup> A simbologia “-” denota um número complexo.

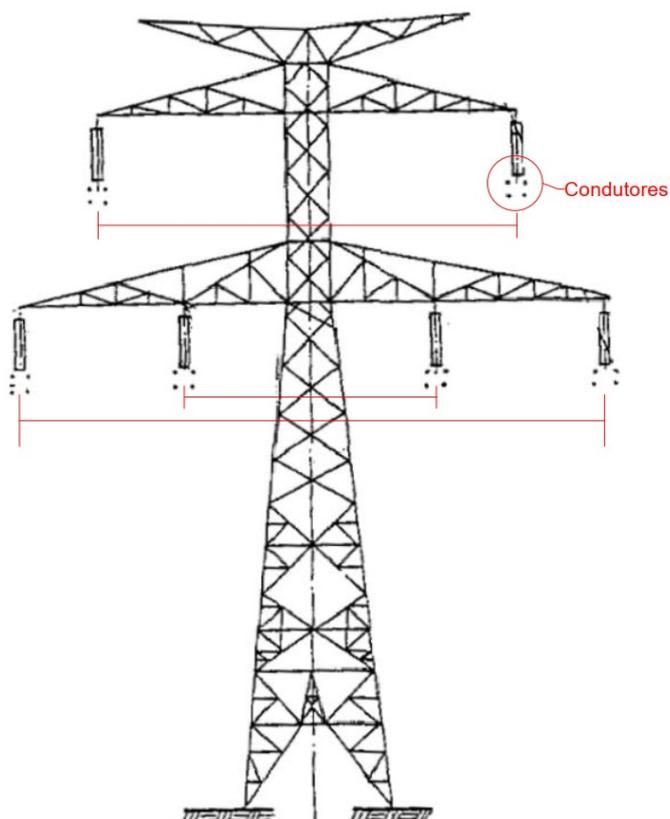
aterramento, sendo relativo à malha de aterramento das SEs associado à impedância no ponto onde houve a eventual falta. Para esta impedância de aterramento, é necessário também associar a impedância do aterramento com a impedância do cabo de guarda de uma LT.

Os condutores de uma LT possuem o mesmo comprimento entre as fases e são feitos do mesmo material. Portanto, é possível considerar a impedância da linha igual à impedância de uma das fases, conforme equação (1):

	$\bar{Z}_{lt} = \bar{Z}_{aa'} = \bar{Z}_{bb'} = \bar{Z}_{cc'}$	(1)
--	--	-----

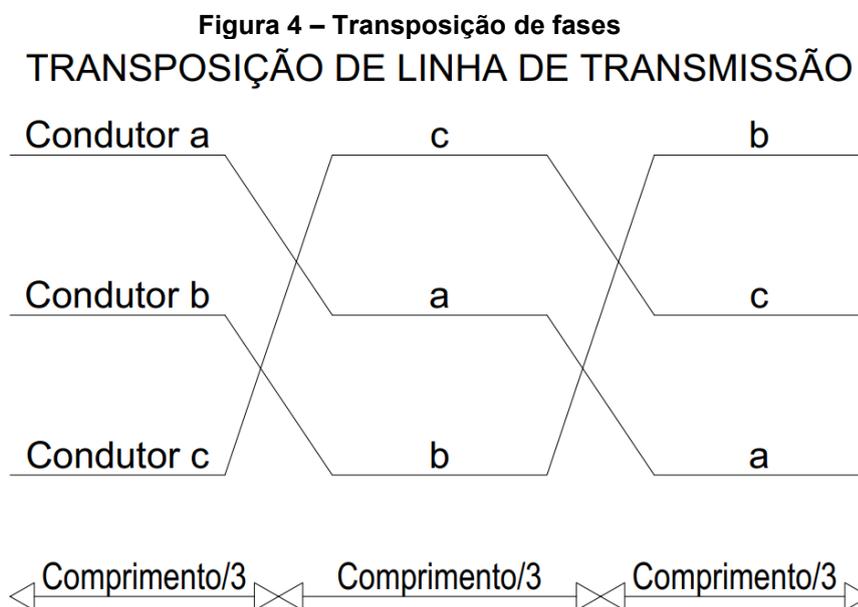
Os condutores devem ser dispostos de uma forma que haja uma equidistância entre os condutores para igualar as impedâncias mútuas entre os condutores, conforme exemplo da Figura 3.

**Figura 3 – Disposição de condutores em torre de transmissão**



Fonte: Modificado de Fuchs (1992).

Se não for possível uma disposição equidistante entre os condutores, deve ser utilizada a metodologia de transposição no decorrer da LT conforme figura 4, a fim de distribuir uniformemente os campos magnéticos. Caso não ocorra a transposição da LT, o sistema ficará desequilibrado e, assim, gerando perdas para a LT. Além disso, as proteções nos circuitos desequilibrados devem ser compensadas por fatores avançados.



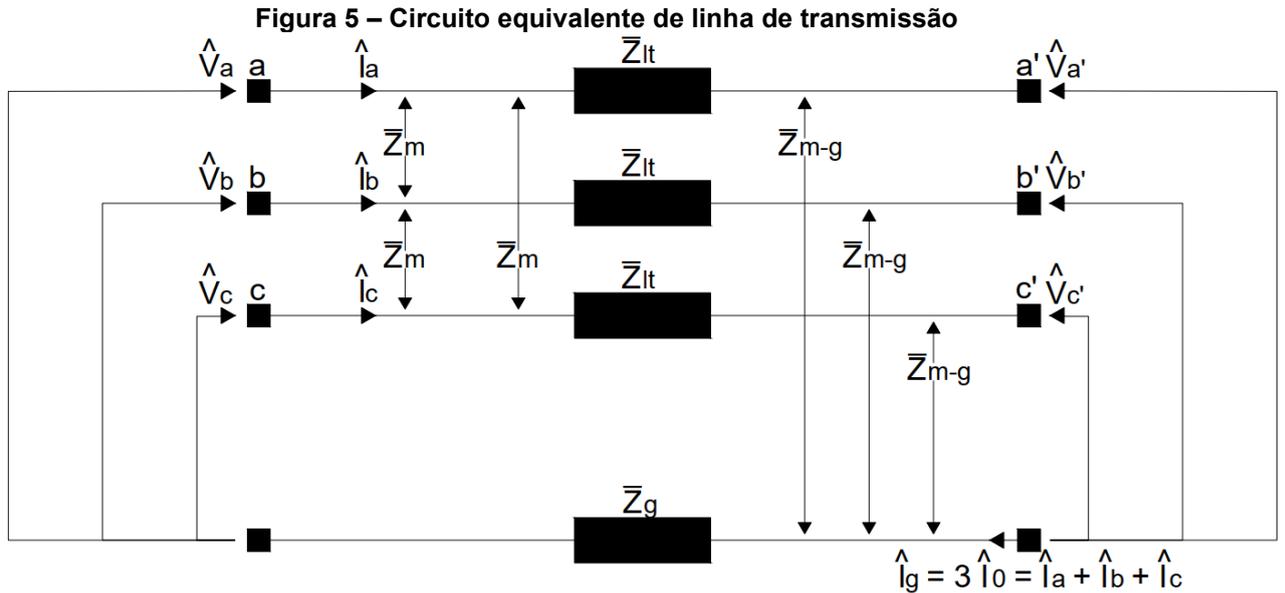
Fonte: Autoria própria (2023).

Se a disposição dos condutores for simétrica ou se for utilizada a metodologia de transposição, pode-se considerar iguais à indutância mútua entre os condutores das fases,  $\bar{Z}_m$ .

Os condutores das fases da LT em relação à terra também possuem impedância mútua, em razão da disposição espacial, além de não serem iguais. Porém, devido à grande distância entre o condutor e a terra, as impedâncias mútuas tornam-se pequenas e não são expressivas para alcançar a corrente de curto-circuito. Sendo assim, considera-se a seguinte igualdade na equação (2):

$$\bar{Z}_{m-g} = \bar{Z}_{m-a-g} = \bar{Z}_{m-b-g} = \bar{Z}_{m-c-g} \quad (2)$$

Redesenhando o circuito da Figura 3, obtém-se a nova estrutura ilustrada na Figura 5:



Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

Com o novo circuito equivalente da figura 5, é possível obter a tensão  $\hat{V}_a$ , conforme a equação (3):

$$\begin{aligned} \hat{V}_a = & \bar{Z}_{lt} \hat{I}_a + \bar{Z}_g (\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c) + \bar{Z}_m \hat{I}_b + \bar{Z}_m \hat{I}_c - \bar{Z}_{m-g} (\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c) \\ & - \bar{Z}_{m-g} \hat{I}_a - \bar{Z}_{m-g} \hat{I}_b - \bar{Z}_{m-g} \hat{I}_c + \hat{V}_{a'} \end{aligned} \quad (3)$$

Manipulando matematicamente os elementos da equação (3), obtém-se a equação (4):

$$\begin{aligned} \hat{V}_a - \hat{V}_{a'} = & (\bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_a + (\bar{Z}_m + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_b + (\bar{Z}_m + \\ & \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_c. \end{aligned} \quad (4)$$

Desta mesma forma, pode-se obter as três equações separadas por fase, refazendo a equação analogamente, apresentados nas equações (5) e (6).

$$\begin{aligned} \hat{V}_b - \hat{V}_{b'} = & (\bar{Z}_m + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_a + (\bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_b + (\bar{Z}_m + \bar{Z}_g \\ & - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_c \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_c - \hat{V}_{c'} = & (\bar{Z}_m + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_a + (\bar{Z}_m + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_b + (\bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g \\ & - 2\bar{Z}_{m-g}) \hat{I}_c \end{aligned} \quad (6)$$

Desta forma, as equações (4), (5) e (6) podem ser apresentadas na forma matricial, mostrado na equação (7):

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'} \\ \hat{V}_{b'} \\ \hat{V}_{c'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

A utilização dessas equações pode apresentar dificuldades matemáticas, pois há um acoplamento significativo entre as fases da LT.

Para facilitar a análise e os cálculos, o mais adequado é desacoplar as fases da LT. Isso é possível através da definição de componentes de sequência positiva, negativa e zero.

A forma mais compacta da mais é expressa nas equações (8) a (12).

$$[\hat{V}_{abc}] = \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[\hat{V}_{a'b'c'}] = \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'} \\ \hat{V}_{b'} \\ \hat{V}_{c'} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[\hat{I}_{abc}] = \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[\bar{Z}_{abc}] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'} \\ \hat{V}_{b'} \\ \hat{V}_{c'} \end{bmatrix} = [\bar{Z}_{abc}] \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

Os fasores de correntes e tensões quando colocadas em relação as componentes simétricas, definindo os fasores  $\bar{a} = 1\angle 120^\circ$  e  $\bar{a}^2 = 1\angle 240^\circ$  que representam a defasagem angular, obtém-se a equação (13):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'0} \\ \hat{V}_{a'1} \\ \hat{V}_{a'2} \end{bmatrix} = [\bar{Z}_{abc}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Manipulando a equação (13), obtém-se a equação (14):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'0} \\ \hat{V}_{a'1} \\ \hat{V}_{a'2} \end{bmatrix} \right) = [\bar{Z}_{abc}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para realizar uma manobra matemática de simplificação, será incluído a mesma matriz nos dois lados da equação (14), obtém-se a equação (15).

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'0} \\ \hat{V}_{a'1} \\ \hat{V}_{a'2} \end{bmatrix} \right) \\ = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} [\bar{Z}_{abc}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

Simplificando a equação (15), encontra-se a equação (16).

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'0} \\ \hat{V}_{a'1} \\ \hat{V}_{a'2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} [\bar{Z}_{abc}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Seguindo a equação (11) e substituindo na equação (16), obtém-se:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_m + \bar{Z}_g - \bar{Z}_{m-g} & \bar{Z}_{lt} + \bar{Z}_g - 2\bar{Z}_{m-g} \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{lt} + 2\bar{Z}_m - 6\bar{Z}_{m-g} + 3\bar{Z}_g & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{lt} - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{lt} - \bar{Z}_m \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{17}$$

Realizando a substituição da equação (16) na equação (15), o resultado é expresso da seguinte forma na equação 18:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'0} \\ \hat{V}_{a'1} \\ \hat{V}_{a'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{lt} + 2\bar{Z}_m - 6\bar{Z}_{m-g} + 3\bar{Z}_g & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{lt} - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{lt} - \bar{Z}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \tag{18}$$

Portanto, obtém-se que a impedância de sequência positiva é igual a sequência negativa e elas são iguais a impedância própria da linha subtraindo a impedância mútua, conforme equação (19):

$$\bar{Z}_{lt1} = \bar{Z}_{lt2} = \bar{Z}_{lt} - \bar{Z}_m \tag{19}$$

Obtém-se que a impedância de sequência zero é igual ao dado na equação (20).

$$\bar{Z}_{lt0} = \bar{Z}_{lt} + 2\bar{Z}_m - 6\bar{Z}_{m-g} + 3\bar{Z}_g \tag{20}$$

As componentes simétricas de seqüências positiva, negativa e zero obtém-se a equação (21):

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{a'0} \\ \hat{V}_{a'1} \\ \hat{V}_{a'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{lt0} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{lt1} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{lt2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \tag{21}$$

Com este modelo atinge-se o desacoplamento entre as fases e o grande ganho desse teorema de Fortescue, particularizado para um sistema trifásico, são as componentes de sequência positiva, negativa e zero serem independentes, ou seja, não há acoplamentos mútuos.

A função de distância (21) e distância de neutro (21N) atuam de acordo com as grandezas da LT que são correntes e tensões. Porém, como há diversas formas de ocorrer curto-circuito, ou seja, há diferentes *loops* para cálculo da impedância aparente vista pelo relé, por este motivo são representados os parâmetros dos elementos através de componentes simétricas.

As grandezas que o relé exige para esta função são as correntes das três fases  $\hat{I}_a$ ,  $\hat{I}_b$  e  $\hat{I}_c$  e tensões das três fases  $\hat{V}_a$ ,  $\hat{V}_b$  e  $\hat{V}_c$ . Desta forma, o relé utiliza essas grandezas para fazer o processamento e determinar a impedância refletida durante a falta.

Os transformadores de instrumentação, que são os Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs), são equipamentos destinados para redução de níveis de corrente e tensão, respectivamente, para condições em que possam ser lidas nos relés de proteção refletindo aquilo o que está conectado em seus primários. Os TPs são conectados normalmente na configuração estrela-estrela (Y-Y). Com isso, as leituras de  $\hat{V}_a$ ,  $\hat{V}_b$  e  $\hat{V}_c$  serão as tensões de fase em relação ao neutro. Os TCs são conectados normalmente em estrela, com isso as leituras de  $\hat{I}_a$ ,  $\hat{I}_b$  e  $\hat{I}_c$  são correntes de linha. Há duas formas para obter a corrente de sequência zero  $\hat{I}_0$ , sendo por medição direta através do neutro da conexão Y dos TCs ou pelo cálculo interno ao relé sendo definido na equação (22):

$$\hat{I}_0 = \frac{1}{3} (\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c) \quad (22)$$

A corrente de neutro, também conhecida como corrente residual, é a corrente de sequência zero multiplicada por fator de 3. Para a falta monofásica fase-terra, é necessário fazer a correção da corrente para identificar o ponto da falta, pois com a indutância mútua entre as fases contribui para uma leitura identificando outra corrente e, conseqüentemente, identificando outro ponto de falta.

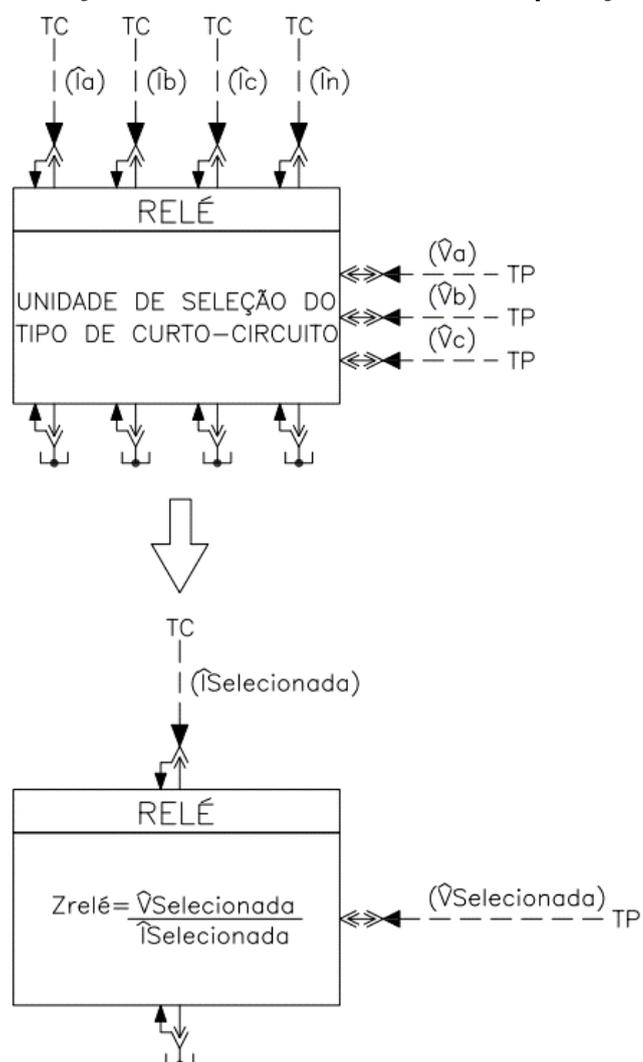
O fator de correção é denominado  $\bar{k}_0$ , representa a compensação de sequência zero, e é expresso pela equação (23):

$$\bar{k}_0 = \frac{\bar{Z}_{lt0} - \bar{Z}_{lt1}}{\bar{Z}_{lt1}} = \frac{\bar{Z}_{lt0}}{\bar{Z}_{lt1}} - 1 \quad (23)$$

Com isso são obtidas seis impedâncias aparentes, sendo comparadas com os parâmetros ajustados no relé, em que o menor valor será a impedância do curto-circuito do momento da falta, identificando o tipo de falta.

Para determinar o tipo de falta de uma LT, o relé faz o processamento das grandezas tensão e corrente, seleciona as fases corretas e realiza o cálculo da impedância. A seleção é feita conforme ilustra a Figura 6:

**Figura 6 – Seleção de tensão e corrente no relé de proteção**

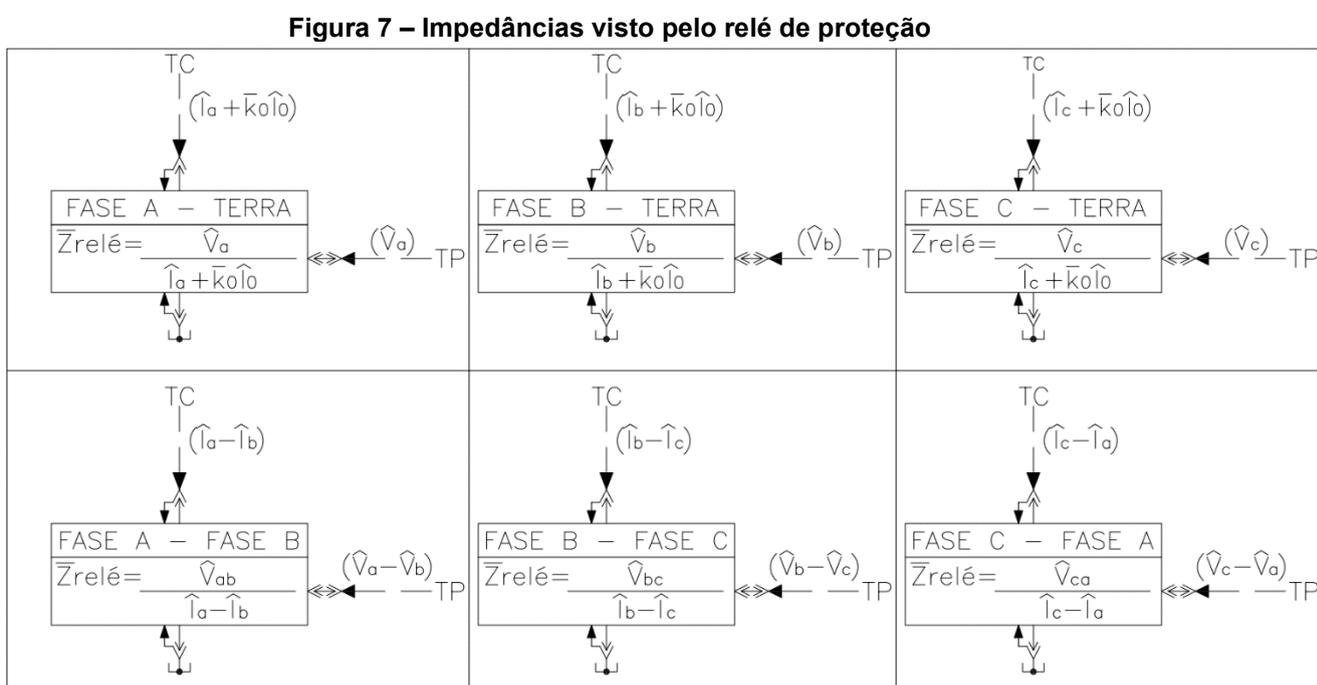


Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

Depois de identificado o tipo de curto-circuito, são realizados os cálculos da impedância vista pelo relé através da corrente e tensão selecionadas.

Para reconhecer os tipos de curto-circuito existem diversas técnicas, usando componentes de sequência positiva, negativa e zero. Isso resulta em diversos fabricantes de relés utilizando, para a mesma função de proteção técnicas, diferentes entre si.

O processamento que ocorre internamente no relé é apresentado na Figura 7:



Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

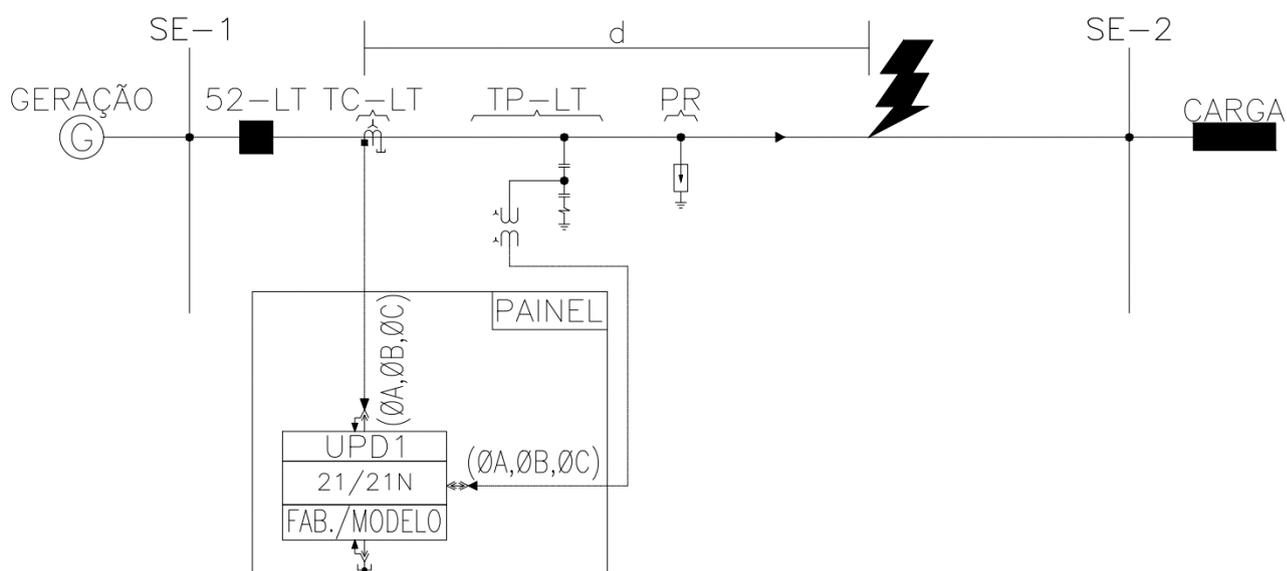
### 2.1.2 Medições

As medições e cálculos em relés de função distância (21) serão apresentadas nas Seções 2.1.2.1 a 2.1.2.4.

#### 2.1.2.1 Curto-circuito $1\emptyset$

Considerando-se para realização de análise, um curto monofásico da fase A com terra (AG), onde ocorrerá em uma distância  $d$  da LT que interliga as subestações SE-1 a SE-2. Isso pode ser representado conforme a Figura 8:

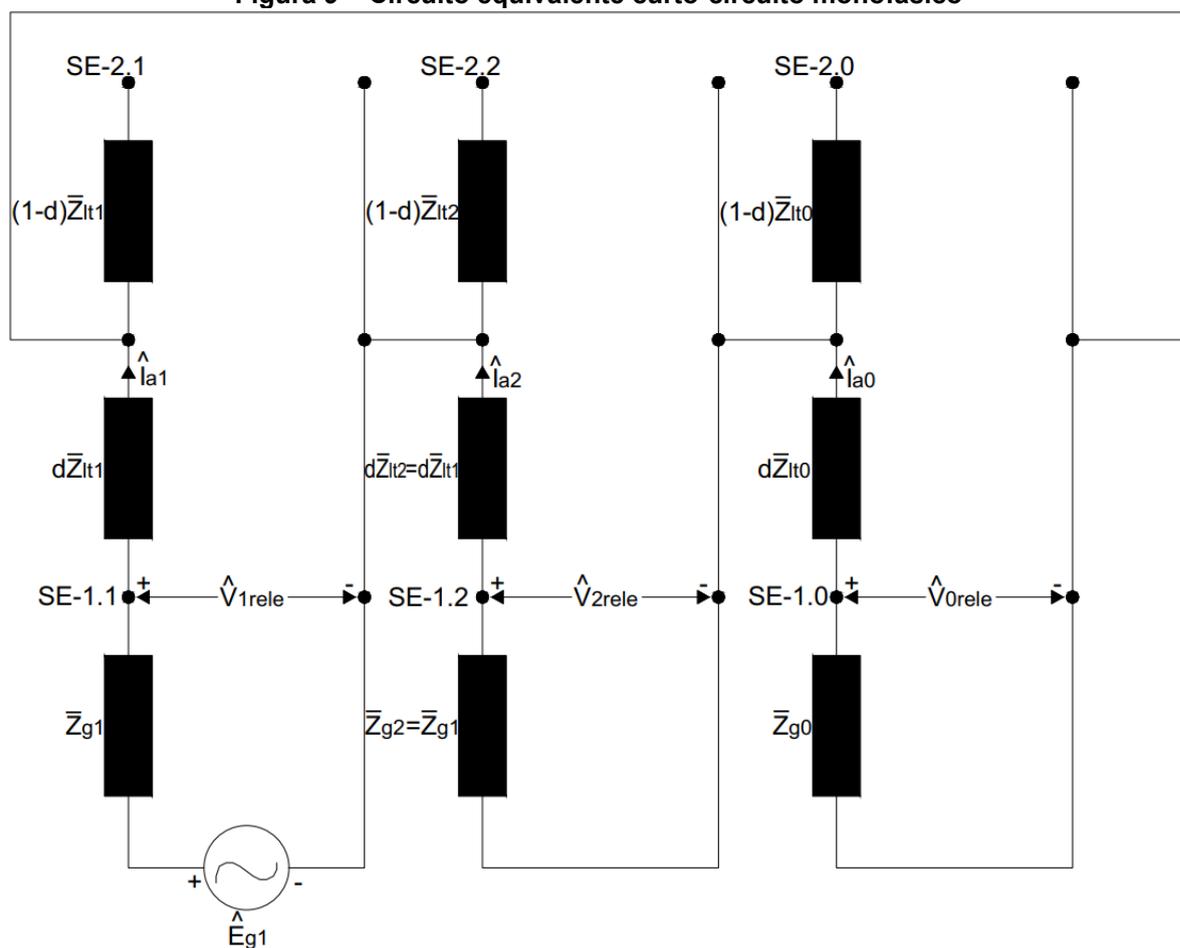
**Figura 8 – Unifilar com curto-circuito**



Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

Nas faltas 1Ø-terra são conectados, em série, os circuitos equivalentes de sequência positiva, negativa e zero, considerando uma fonte  $\hat{E}_{G1}$ , conforme a Figura 9:

Figura 9 – Circuito equivalente curto-circuito monofásico



Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

Na falta monofásica AG, a impedância vista pelo relé é obtida através da relação entre a grandeza corrente  $\hat{I}_a$  e tensão  $\hat{V}_a$  conforme equação (24):

$$\bar{Z}_{rele} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a} \quad (24)$$

Abrindo a equação (24) referente as componentes simétricas, chega-se à equação (25):

$$\frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a} = \frac{\hat{V}_{1rele} + \hat{V}_{2rele} + \hat{V}_{0rele}}{\hat{I}_{a1} + \hat{I}_{a2} + \hat{I}_{a0}} \quad (25)$$

A corrente é a mesma para todo o circuito da Figura 9. Portanto, na equação (25) pode-se substituir as tensões pelo produto do somatório de impedâncias por  $\hat{I}_a$ , encontrando-se a equação (26)

$$\frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a} = \frac{(d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt0}) \hat{I}_{a1}}{3\hat{I}_{a1}} \quad (26)$$

Simplificando a equação (26), obtém-se equação (27):

$$\frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a} = \frac{(2d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt0})}{3} \quad (27)$$

Porém, no curto-circuito 1Ø-terra no ponto  $d$ , o valor da impedância vista pelo relé será maior do que a impedância da LT associada até o ponto de falha. Isso ocorre, pois há contribuição mútua entre as fases; portanto, a fim de obter uma leitura de impedância precisa, é necessário seguir os procedimentos descritos abaixo:

Insere-se a relação de impedância até o ponto da falta, sendo a resultante dessa relação igual a 1, conforme equação (28):

$$\frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a} = \frac{(2d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt0})}{3} \frac{d\bar{Z}_{lt1}}{d\bar{Z}_{lt1}} \quad (28)$$

Realizando a mudança na equação (28), a fim de isolar a incógnita impedância ponto da falta, ou seja, impedância aparente vista pelo relé, obtém-se a equação (29):

$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a \left( \frac{2d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt0}}{3d\bar{Z}_{lt1}} \right)} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (29)$$

Insere-se o somatório  $\hat{I}_a$  com  $-\hat{I}_a$ , que o resultante é zero, para manipulação matemática, conforme equação (30):

$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a - \hat{I}_a + \hat{I}_a \left( \frac{2d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt0}}{3d\bar{Z}_{lt1}} \right)} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (30)$$

Após a resolução da equação (30), encontra-se a equação (31):

$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a + \left(\frac{\bar{Z}_{lt0} - \bar{Z}_{lt1}}{3\bar{Z}_{lt1}}\right) \hat{I}_a} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (31)$$

Substituindo o último  $\hat{I}_a$  do denominador, por  $3\hat{I}_{a0}$  na equação (31), para manipulação matemática, encontra-se a equação (32):

$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a + \left(\frac{\bar{Z}_{lt0} - \bar{Z}_{lt1}}{3\bar{Z}_{lt1}}\right) 3\hat{I}_{a0}} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (32)$$

Simplificando a equação (32), obtém-se a equação (33):

$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a + \left(\frac{\bar{Z}_{lt0} - \bar{Z}_{lt1}}{\bar{Z}_{lt1}}\right) \hat{I}_{a0}} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (33)$$

Substituindo na equação (33) o valor de  $\bar{k}_0$  da equação (23), obtém-se equação (34):

$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a + \bar{k}_0 \hat{I}_{a0}} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (34)$$

Portanto, a impedância correta para o relé até o ponto da falta, adotando  $\hat{I}_{a0}$  como  $\hat{I}_0$ , é expressa por:

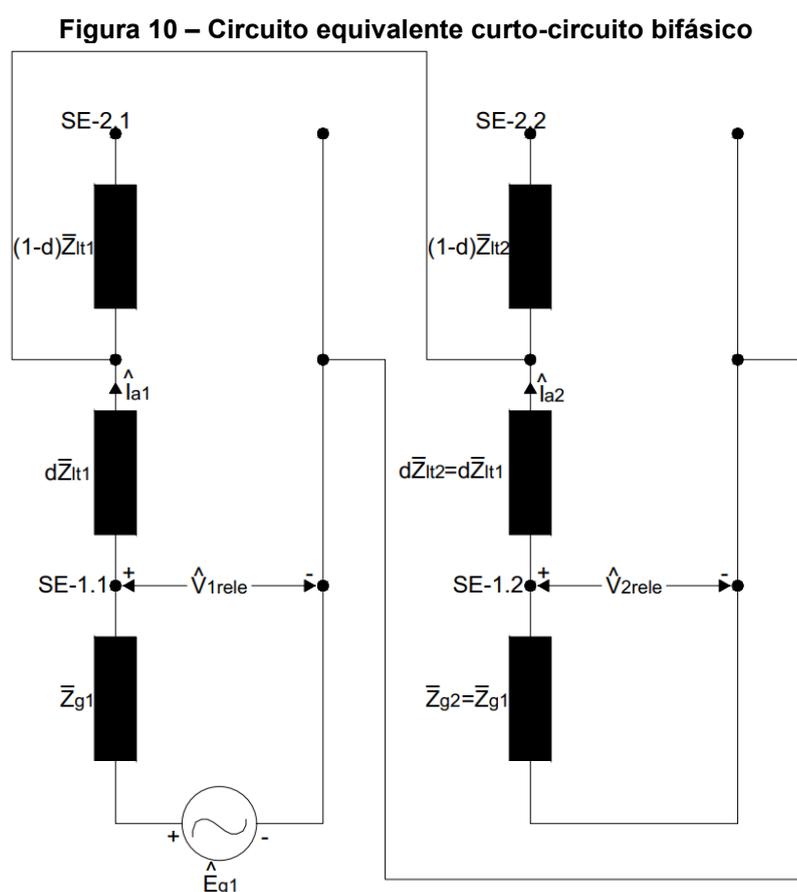
$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{\hat{V}_a}{\hat{I}_a + \bar{k}_0 \hat{I}_{a0}} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (35)$$

Para as LTs são necessárias dividir as impedâncias em trechos para detectar faltas e tendo como objetivo ser o mais seletivo possível. Sendo assim, as proteções de LT são dadas em zonas, geralmente utilizando os valores aproximados, conforme listado abaixo:

- $\bar{Z}_{relez1}$  (zona 1) → de 50 a 85 % do valor da impedância da LT;
- $\bar{Z}_{relez2}$  (zona 2) → 100% da impedância da LT + de 20 % a 50 % da próxima LT;
- $\bar{Z}_{relez3}$  (zona 3) → 100 % da impedância da LT + 100 % da próxima LT.

### 2.1.2.2 Curto-circuito 2Ø

Considerando um curto bifásico 2Ø entre as fases b e c, onde ocorrerá em uma distância  $d$  da LT que interliga as subestações SE-1 a SE-2. Nas faltas 2Ø não há sequência zero e os circuitos equivalentes de sequência positiva e negativa ficam em paralelo, conforme mostra a Figura 10:



Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

Para a falta bifásica, as medições serão conforme equações (36) – (43):

$$\bar{Z}_{rele} = \frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{\hat{V}_b - \hat{V}_c}{\hat{I}_b - \hat{I}_c} \quad (36)$$

Definindo as variáveis, encontra-se as equações (37) – (40):

$$\hat{V}_b = \bar{a}^2 \hat{V}_{1rele} + \bar{a} \hat{V}_{2rele} \quad (37)$$

$$\hat{V}_c = \bar{a} \hat{V}_{1rele} + \bar{a}^2 \hat{V}_{2rele} \quad (38)$$

$$\hat{I}_b = \bar{a}^2 \hat{I}_{a1} + \bar{a} \hat{I}_{a2} \quad (39)$$

$$\hat{I}_c = \bar{a} \hat{I}_{a1} + \bar{a}^2 \hat{I}_{a2} \quad (40)$$

Substituindo as equações (37) – (40) na equação (36), obtém-se a equação (41):

$$\bar{Z}_{rele} = \frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{(\bar{a}^2 \hat{V}_{1rele} + \bar{a} \hat{V}_{2rele}) - (\bar{a} \hat{V}_{1rele} + \bar{a}^2 \hat{V}_{2rele})}{(\bar{a}^2 \hat{I}_{a1} + \bar{a} \hat{I}_{a2}) - (\bar{a} \hat{I}_{a1} + \bar{a}^2 \hat{I}_{a2})} \quad (41)$$

Separando a equação (41), obtém-se equação (42):

$$\bar{Z}_{rele} = \frac{(\bar{a}^2 - \bar{a}) \hat{V}_{1rele} - (\bar{a}^2 - \bar{a}) \hat{V}_{2rele}}{(\bar{a}^2 - \bar{a}) \hat{I}_{a1} - (\bar{a}^2 - \bar{a}) \hat{I}_{a2}} \quad (42)$$

Simplificando a equação (42), obtém-se equação (43):

$$\bar{Z}_{rele} = \frac{\hat{V}_{1rele} - \hat{V}_{2rele}}{\hat{I}_{a1} - \hat{I}_{a2}} \quad (43)$$

Através do circuito da Figura 11, obtém-se equações (44) – (46):

$$\hat{I}_{a2} = -\hat{I}_{a1} \quad (44)$$

$$\hat{V}_{1rele} = (d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt1}) \hat{I}_{a1} + \hat{V}_{2rele} \quad (45)$$

$$\hat{V}_{1rele} - \hat{V}_{2rele} = (d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt2}) \hat{I}_{a1} \quad (46)$$

Realiza-se a substituição das equações (44) – (46) na equação (47):

$$\bar{Z}_{rele} = \frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{(d\bar{Z}_{lt1} + d\bar{Z}_{lt2}) \hat{I}_{a1}}{\hat{I}_{a1} - (-\hat{I}_{a1})} \quad (47)$$

Desta forma, encontra-se a impedância do ponto de falta, conforme equação (48):

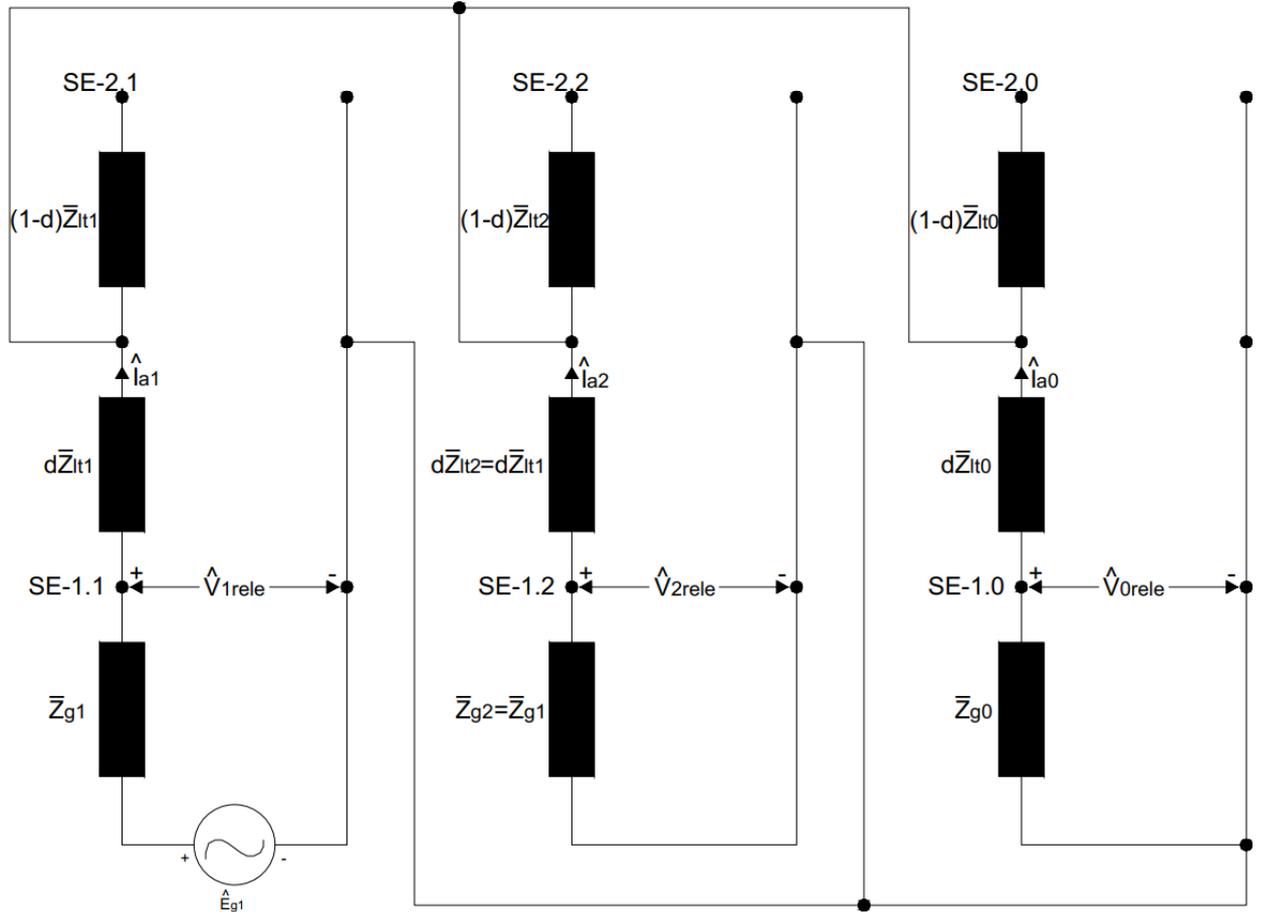
$$\bar{Z}_{rele} = \frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{\hat{V}_b - \hat{V}_c}{\hat{I}_b - \hat{I}_c} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (48)$$

Portanto, para o curto-circuito bifásico, não há necessidade de aplicação do fator de correção.

### 2.1.2.3 Curto-circuito 2Ø-terra

Para esta análise será utilizado o curto entre as fases “b”, “c” e terra, no mesmo ponto da falta, considerando o mesmo ponto da falta. Nas faltas 2Ø-terra os circuitos equivalentes de sequência positiva, negativa e zero ficam em paralelo, conforme mostra Figura 11:

Figura 11 – Circuito equivalente curto-circuito bifásico-terra



Fonte: Modificada de Kindermann (2020).

Usando a equação (36) encontrada para curto-circuito bifásico, temos:

$$\bar{Z}_{rele} = \frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{\hat{V}_b - \hat{V}_c}{\hat{I}_b - \hat{I}_c} \quad (49)$$

Definindo as variáveis, encontra-se as equações (50) – (54):

$$\hat{V}_b = \hat{V}_{0rele} + \bar{a}^2 \hat{V}_{1rele} + \bar{a} \hat{V}_{2rele} \quad (50)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_{0rele} + \bar{a} \hat{V}_{1rele} + \bar{a}^2 \hat{V}_{2rele} \quad (51)$$

$$\hat{I}_b = \hat{I}_{a0} + \bar{a}^2 \hat{I}_{a1} + \bar{a} \hat{I}_{a2} \quad (52)$$

$$\hat{I}_c = \hat{I}_{a0} + \bar{a}^2 \hat{I}_{a1} + \bar{a} \hat{I}_{a2} \quad (53)$$

$$\hat{I}_c = \hat{I}_{a0} + \bar{a} \hat{I}_{a1} + \bar{a}^2 \hat{I}_{a2} \quad (54)$$

Substituindo as equações (50) – (54) na equação (49), obtém-se equação (55):

$$\frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{\hat{V}_b - \hat{V}_c}{\hat{I}_b - \hat{I}_c} \frac{\hat{V}_{0rele} + \bar{a}^2 \hat{V}_{1rele} + \bar{a} \hat{V}_{2rele} - (\hat{V}_{0rele} + \bar{a} \hat{V}_{1rele} + \bar{a}^2 \hat{V}_{2rele})}{\hat{I}_{a0} + \bar{a}^2 \hat{I}_{a1} + \bar{a} \hat{I}_{a2} - (\hat{I}_{a0} + \bar{a} \hat{I}_{a1} + \bar{a}^2 \hat{I}_{a2})} \quad (55)$$

Separando a equação (55), obtém-se equação (56):

$$\frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{(\bar{a}^2 - \bar{a}) \cdot \hat{V}_{1rele} - (\bar{a}^2 - \bar{a}) \cdot \hat{V}_{2rele}}{(\bar{a}^2 - \bar{a}) \cdot \hat{I}_{a1} - (\bar{a}^2 - \bar{a}) \cdot \hat{I}_{a2}} \quad (56)$$

Simplificando a equação (56), obtém-se equação (57):

$$\frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{\hat{V}_{1rele} - \hat{V}_{2rele}}{\hat{I}_{a1} - \hat{I}_{a2}} \quad (57)$$

Através do circuito da Figura 12, obtém-se equações (58) e (59):

$$\hat{V}_{1rele} = d\bar{Z}_{lt1} \cdot \hat{I}_{a1} - d\bar{Z}_{lt1} \cdot \hat{I}_{a2} + \hat{V}_{2rele} \quad (58)$$

$$\hat{V}_{1rele} - \hat{V}_{2rele} = d\bar{Z}_{lt1} \cdot \hat{I}_{a1} - d\bar{Z}_{lt1} \cdot \hat{I}_{a2} = d\bar{Z}_{lt1} \cdot (\hat{I}_{a1} - \hat{I}_{a2}) \quad (59)$$

Realiza-se a substituição das equações (58) e (59) na equação (57):

$$\frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{d\bar{Z}_{lt1} \cdot (\hat{I}_{a1} - \hat{I}_{a2})}{\hat{I}_{a1} - \hat{I}_{a2}} \quad (60)$$

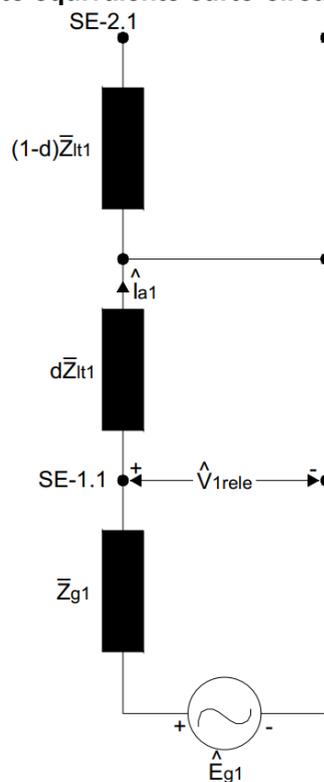
Desta forma, encontra-se a impedância do ponto de falta, conforme equação (61):

$$\bar{Z}_{aparente-rele} = \frac{\hat{V}_{rele}}{\hat{I}_{rele}} = \frac{\hat{V}_b - \hat{V}_c}{\hat{I}_b - \hat{I}_c} = d\bar{Z}_{lt1} \quad (61)$$

### 2.1.2.4 Curto-circuito 3Ø

No curto-circuito trifásico, a impedância de sequência positiva será a mesma para o segmento onde ocorreu a falta. Nas faltas 3Ø circuito equivalente fica apenas de sequência positiva, conforme mostra a Figura 12:

**Figura 12 – Circuito equivalente curto-circuito trifásico**



**Fonte: Modificada de Kindermann (2020).**

Portanto, todas as medições irão apresentar os mesmos resultados que o bifásico e fase-terra. A configuração de sequência positiva em LT atende às faltas sólidas e rede radial.

### 3 RELÉS COMERCIAIS

Este capítulo visa apresentar as principais características dos relés comerciais sobre a função de distância.

#### 3.1 General Electric – L90

Para o relé de proteção modelo L90 do fabricante General Electric (GE), é possível configurar a função de distância, sendo dividido em grupo de elementos. O grupo denominado “Distance” é onde se determina vários parâmetros, sendo os mais relevantes para este trabalho os seguintes itens:

- **MEMORY DURATION** – Define a quantidade de ciclos de duração de memória;
- **FORCE SELF-POLAR** – Define se será forçado a ser autopolarizado;
- **FORCE MEM-POLAR** – Define se será forçado a ser polarização por memória.

Dentro desse grupo há 12 itens sendo eles Phase Distance Z1 até Phase Distance Z6 e Ground Distance Z1 até Ground Distance Z6, portanto será tratado como dois subgrupos sendo eles Phase Distance Zx e Ground Distance Zx, para x o valor da zona de proteção.

O subgrupo denominado “**Phase Distance Zx**”, é onde determina vários parâmetros para função de proteção de fase, sendo os mais relevantes para este trabalho os seguintes itens:

- **PHS DIST Zx FUNCTION** – Define o estado da função da zona x de fase;
- **PHS DIST Zx DIR** – Define a direcionalidade da zona x de fase;
- **PHS DIST Zx REACH** – Define o alcance da zona x de fase;
- **PHS DIST Zx RCA** – Define o ângulo característico da zona x da característica de distância de fase;
- **PHS DIST Zx COMP LIMIT** – Especifica a forma da característica operacional para zona x de fase. Em particular, produz a característica do tipo de lente da função MHO;

- **PHS DIST Zx DIR RCA** – Permite selecionar o ângulo característico da função de supervisão direcional, também conhecido como ângulo de torque máximo para zona x de fase. Como a forma MHO é escolhida, a função direcional será uma função de supervisão adicional, já que a característica MHO dinâmica em si é direcional;
- **PHS DIST Zx DIR COMP LIMIT** – Define o ângulo limite do comparador para a função de supervisão direcional para zona x de fase.

O subgrupo denominado “**Ground Distance Zx**” é onde determina vários parâmetros para função de proteção de terra, sendo os mais relevantes para este trabalho os seguintes itens:

- **GND DIST Zx FUNCTION** – Define o estado da função da zona x de terra;
- **GND DIST Zx DIR** – Define a direcionalidade da zona x de terra;
- **GND DIST Zx Z0/Z1 MAG** – Define a proporção necessária entre as impedâncias de sequência zero e sequência positiva para realizar a compensação de sequência zero nos elementos de distância de terra;
- **GND DIST Zx Z0/Z1 ANG** – Define a variação angular necessária entre as impedâncias de sequência-zero e sequência-positiva para compensar a sequência-zero dos elementos de distância à terra. O valor inserido corresponde à diferença de ângulo entre a impedância de sequência-zero e a impedância de sequência-positiva;
- **GND DIST Zx REACH** – Define o alcance da zona x de terra;
- **GND DIST Zx RCA** – Define o ângulo característico da zona x da característica de distância de terra;
- **GND DIST Zx COMP LIMIT** – Especifica a forma da característica operacional para zona x de terra. Em particular, produz a característica do tipo de lente da função MHO;
- **GND DIST Zx DIR RCA** – Permite selecionar o ângulo característico da função de supervisão direcional, também conhecido como ângulo de torque máximo para zona x de terra. Como a forma MHO é escolhida, a

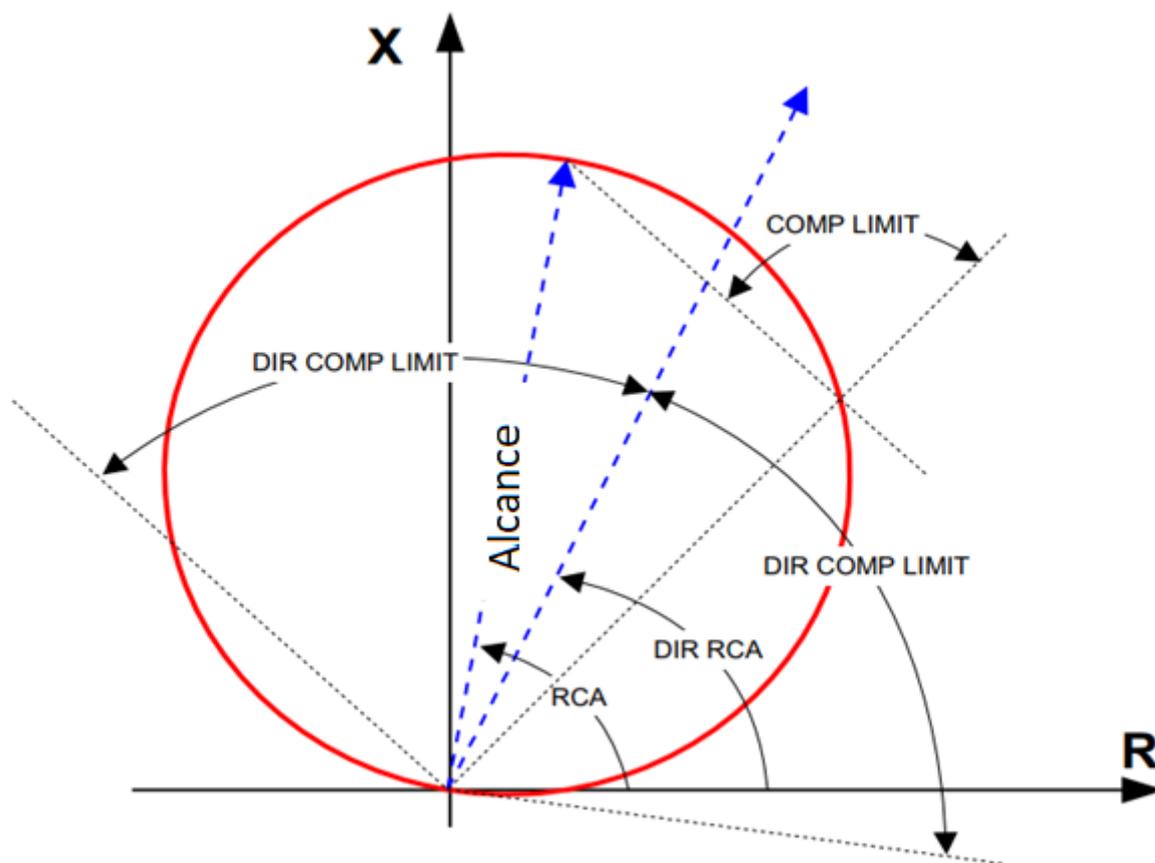
função direcional será uma função de supervisão adicional, já que a característica MHO dinâmica em si é direcional;

- **GND DIST Zx DIR COMP LIMIT** – Define o ângulo limite do comparador para a função de supervisão direcional para zona x de terra.

### 3.1.1 Características MHO L90

Para característica MHO as regiões da zona de proteção podem variar com base nos parâmetros dos grupos de ajustes. O ângulo linha de transmissão ( $RCA$ ) é inserido em relação ao eixo de resistência ( $R$ ), a magnitude da impedância da LT é o que determina o alcance ( $REACH$ ), para complementar a determinação das regiões de curvas MHO, é utilizado o ângulo característico de direcionalidade ( $DIR RCA$ ) em relação ao eixo  $R$  e aplicado comparador de limite de direcionalidade ( $DIR COMP LIMIT$ ) em relação ao  $DIR RCA$ . Para determinar a região das extremidades é empregado o comparador de ângulo limite ( $COMP LIMIT$ ). Com estas definições é formado a região de proteção, conforme mostram as Figuras 13 e 14.

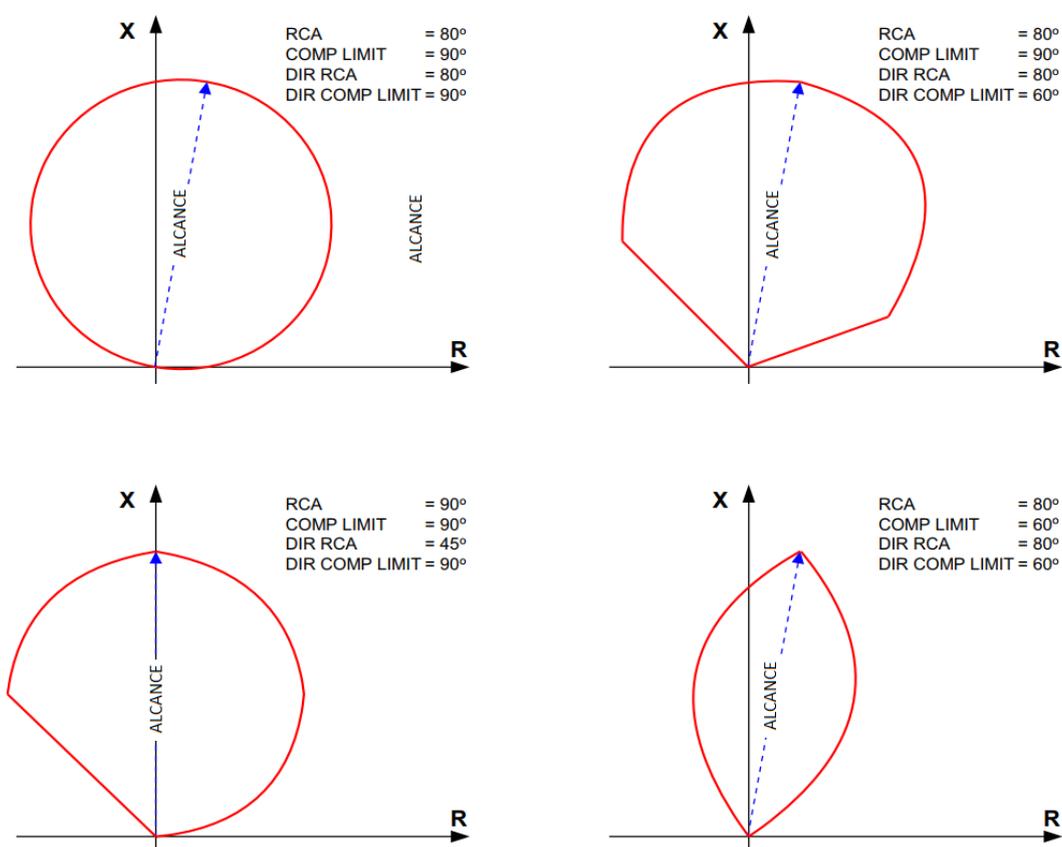
Figura 13 – Característica de distância de fase MHO direcional



Fonte: Modificado de manual de instrução GE L90 (2022).

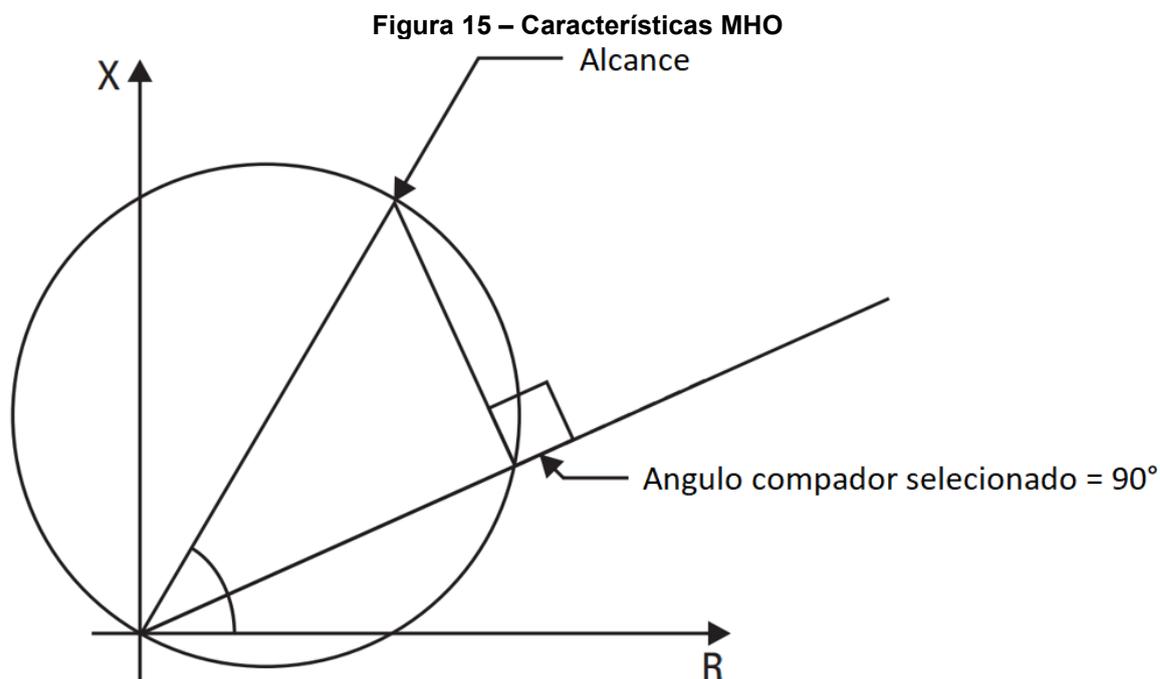
Várias regiões podem ser formadas, gerando alternativas de melhorar a zona de proteção. A Figura 15 ilustra alguns exemplos.

**Figura 14 – Exemplo de formas com características de distância MHO**



**Fonte: Modificado de manual de instrução GE L90 (2022).**

É possível observar diversas formas para a característica de distância MHO e que a atuação do relé ocorre se a comparação do ângulo denominado COMP LIMIT, formado entre a reta da origem até o ponto de falta e a reta do máximo alcance da zona de proteção até o ponto de falta, for menor que o especificado nos parâmetros, conforme mostra a Figura 15.



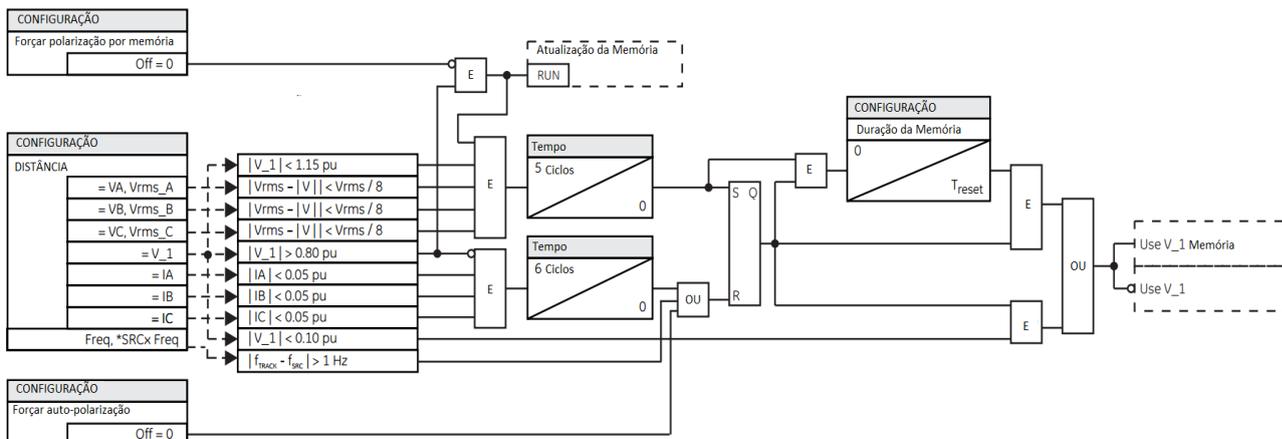
Fonte: Modificado de manual de instrução GE L90 (2022).

### 3.1.2 Características de polarização L90

A polarização no relé L90 tem dois sensores, sendo um de corrente e outro de tensão. Para o sensor de corrente, o mínimo necessário para polarizar é 5 % da corrente nominal nas correntes de fases. Para o sensor de tensão, o mínimo necessário para polarizar é 10 % da tensão nominal de sequência positiva.

Após o término do intervalo definido no parâmetro Memory Duration, o relé verifica a magnitude da tensão de sequência positiva real. Caso a magnitude seja maior do que 10 % da nominal, a tensão real é utilizada, mas se for menor, a tensão memorizada continua a ser empregada. A memória é ativada quando a tensão de sequência positiva ultrapassa 80 % de seu valor nominal por cinco ciclos do sistema de potência. É possível verificar através do diagrama lógico de tensão apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Diagrama lógico de tensão polarização



Fonte: Modificado de manual de instrução GE L90 (2022).

### 3.2 Schweitzer Engineering Laboratories – 311L

Para o relé de proteção modelo 311L do fabricante Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), há quatro zonas independentes de proteção de distância de fase MHO, sendo que estas zonas são parametrizadas de forma independente. As zonas 1 e 2 não são possíveis de alterar a direcionalidade, pois operam apenas para frente. Porém, as zonas 3 e 4 podem ser configuradas para operar tanto na direção para frente quanto na direção para trás.

Os elementos de distância de fase utilizam a polarização de tensão de sequência positiva, proporcionando maior segurança e criando uma característica de MHO expandida. A polarização por tensão de memória também utiliza a sequência positiva. Eles são projetados para atuar em faltas fase-fase, fase-fase-terra e trifásicas. O grupo denominado “Distance Elements” é onde determina vários parâmetros.

Dentro desse grupo há mais dois subgrupos sendo eles MHO Phase Distance Elements que possui a Zona 1 até Zona 4, e o outro subgrupo denominado Ground Distance Elements que possui Zona 1 de terra até Zona 4. Portanto, será tratado como dois subgrupos sendo eles  $Z_{xP}$  para fases e  $Z_{xG}$  para monofásico, sendo x o valor da zona de proteção. Os ajustes mais relevantes para este trabalho são os seguintes itens:

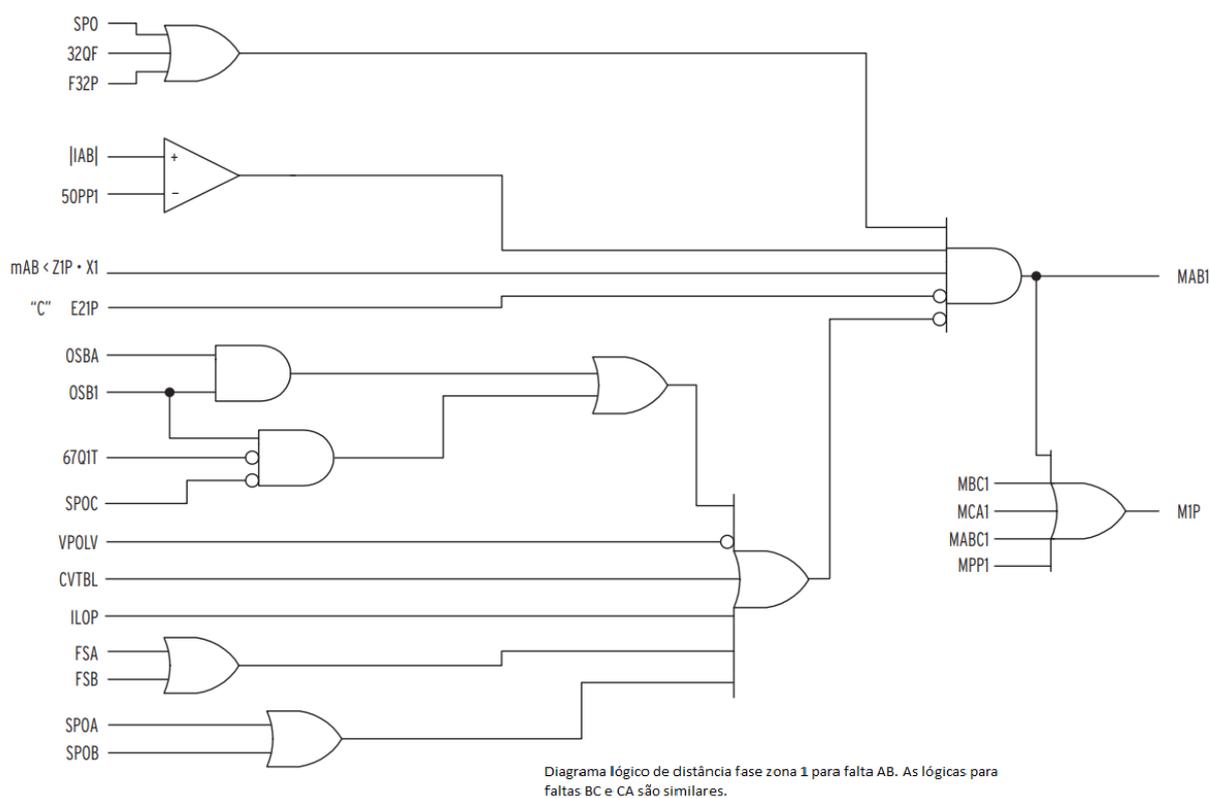
- **DISTANCE ELEMENTS ( $Z_{xP}$ )** - Define o alcance da zona x de fase;

- **FAULT DETECTORS (50PPX)** – Define o sensor de mínima corrente para atuar a proteção na zona x para faltas nas fases;
- **DISTANCE ELEMENTS (ZxMG)** - Define o alcance da zona x de fase;
- **FAULT DETECTORS (50GZX)** – Define o sensor de mínima corrente para atuar a proteção na zona x para faltas monofásicas.

A faixa de atuação para o sensor de corrente é diferente para cada tipo de relé: Para entradas analógicas de corrente de 5 A, o mínimo é de 0,5 A e, para entradas de 1 A, o mínimo é de 0,1 A.

Através do diagrama lógico como a Figura 17, aplicável para zona 1 e 2 de fases, é possível verificar que apresenta um comparador de corrente de falta  $|IAB|$  com sensor de mínima corrente parametrizada 50PP1 (Zona 1) e 50PP2 (Zona 2), direcionalidade fixa para frente.

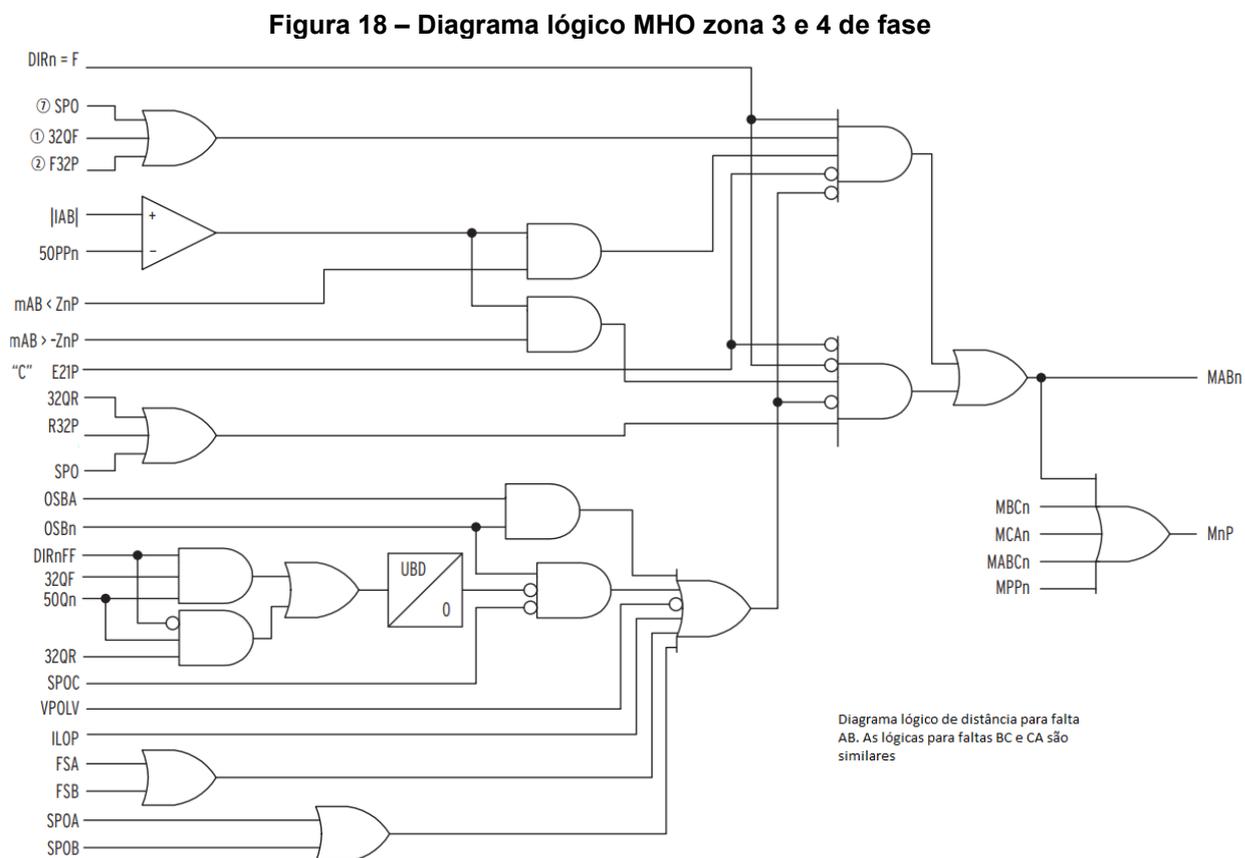
**Figura 17 – Diagrama lógico MHO zona 1 e 2 de fase**  
Elemento de distância de fase MHO



Fonte: Modificado de manual de instrução SEL 311L (2021).

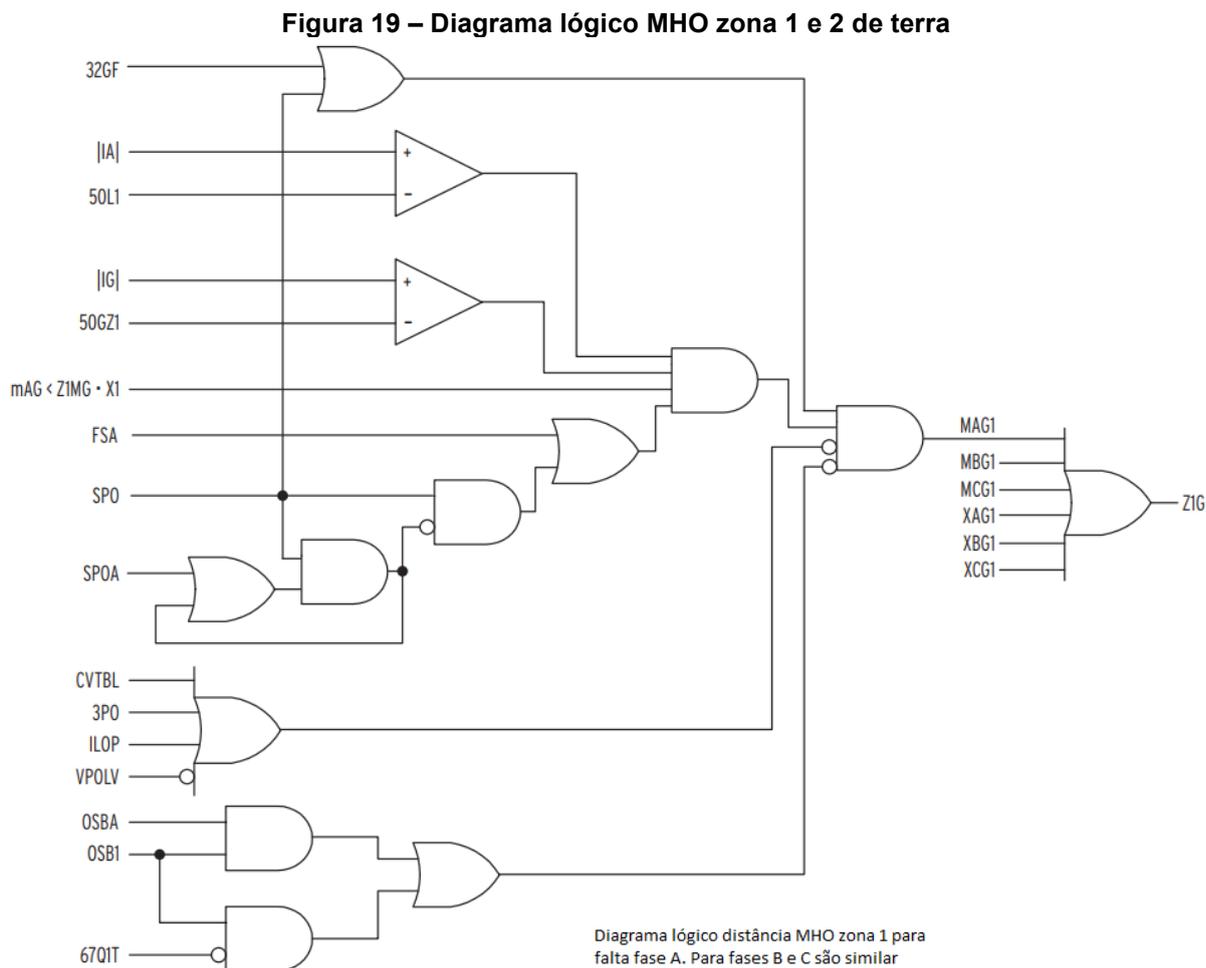
Para as zonas 3 e 4 de fases, seguem os mesmos princípios das zonas 1 e 2 de fases. No entanto, as direcionalidades podem ser ajustadas tanto para

frente quanto para trás no parâmetro  $DIRnFF$ , conforme o diagrama lógico da figura 18.



**Fonte: Modificado de manual de instrução SEL 311L (2021).**

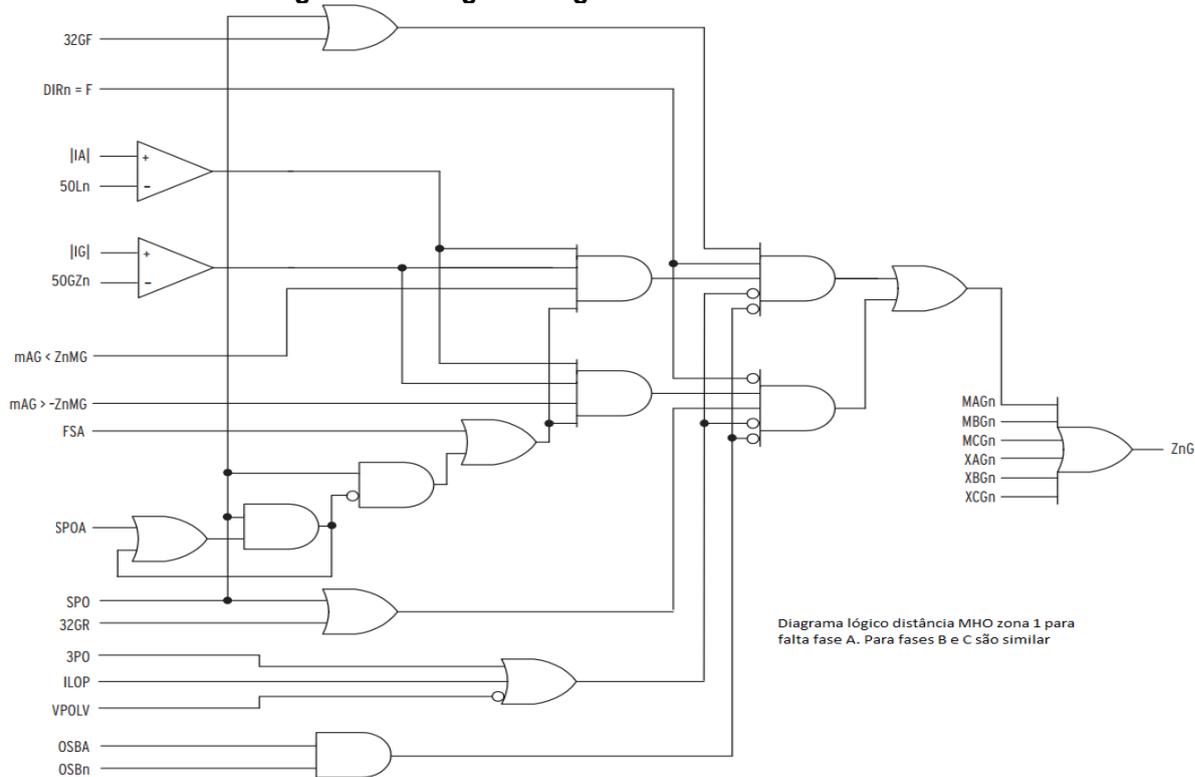
Para faltas monofásicas são similares as de fases, possui comparador de corrente de falta  $|IA|$  com sensor de mínima corrente parametrizada 50GZ1 (Zona 1), direcionalidade fixa para frente (Zonas 1 e 2), conforme mostra a Figura 19.



**Fonte: Modificado de manual de instrução SEL 311L (2021).**

As zonas 3 e 4 de terra são similares as fases. As direcionalidades podem ser ajustadas tanto para frente quanto para trás no parâmetro  $DIR_n$  e realiza a comparação do sensor de mínima corrente, conforme o diagrama lógico da Figura 20.

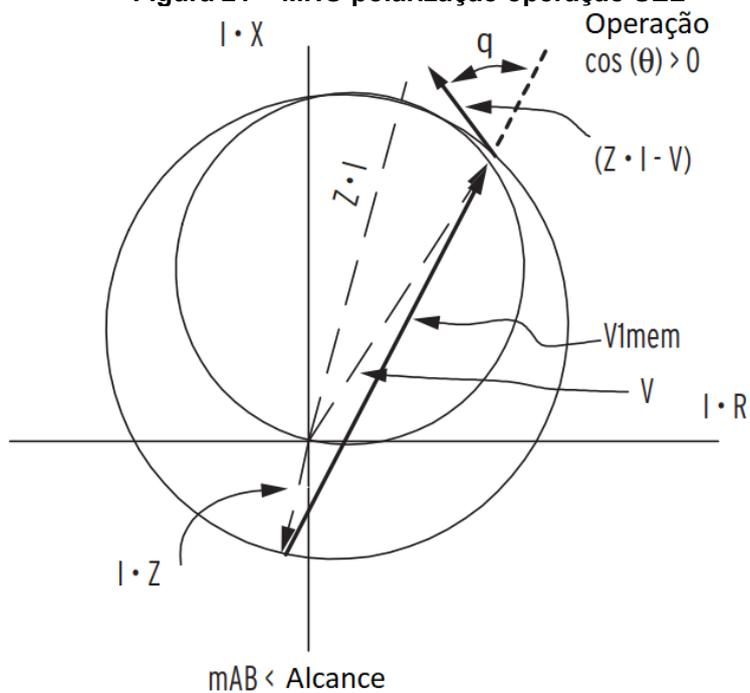
**Figura 20 – Diagrama lógico MHO zona 3 e 4 de terra**



**Fonte: Modificado de manual de instrução SEL 311L (2021).**

Para polarização de elementos MHO a SEL utiliza-se tensão de sequência positiva por segurança para criação da característica de expansão. O princípio de atuação é comparação do valor denominado  $\cos(\theta)$ , que é a diferença entre os vetores de polarização. Quando o valor  $\cos(\theta)$  é maior que zero ocorre a atuação, quando é menor que zero não há atuação, ou seja, o ângulo para comparação é  $90^\circ$ , conforme mostram as Figuras 21 e 22.

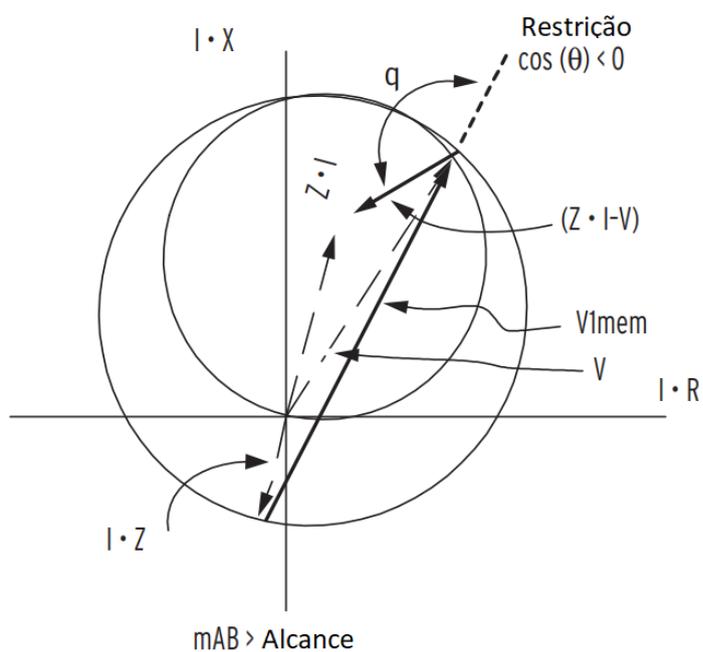
**Figura 21 – MHO polarização operação SEL**



Falta interna para frente

Fonte: Modificado de manual de instrução SEL 311L (2021).

**Figura 22 – MHO polarização restrição SEL**



Falta externa para frente

Fonte: Modificado de manual de instrução SEL 311L (2021).

### 3.3 Siemens – 7SL86

Para o relé de proteção modelo 7SL86 do fabricante Siemens existem quatro zonas independentes de proteção de distância de fase MHO, sendo que estas zonas são parametrizadas de forma independente.

Os elementos de distância utilizam duas formas para a polarização, sendo memorizada e cruzada para realizar a expansão da curva MHO.

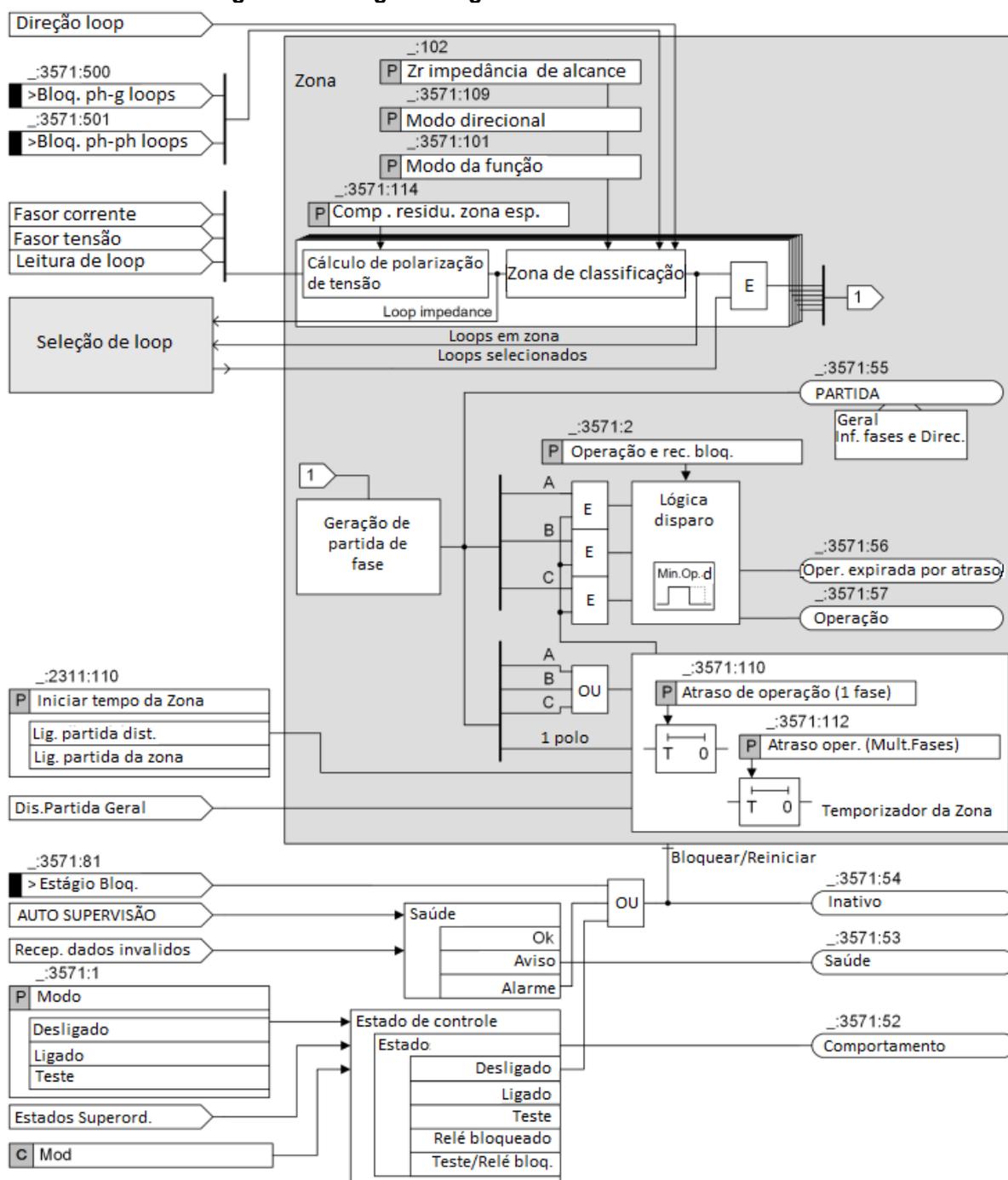
Dentro do grupo “Distance Protection” parâmetros Zona 1 até Zona 4, em que denomina  $Z_x$ , sendo  $x$  o valor da zona de proteção. Os ajustes mais relevantes para este trabalho são os seguintes itens:

- **MIN. PHASE-CURRENT THRESH** – Sensor de mínima corrente para ativar a função de distância, sendo recomendado 10 % da corrente nominal e, no mínimo, 0,1 A;
- **V0> THRESHOLD VALUE** – Este parâmetro é usado para definir o limite de tensão de sequência zero para falta à terra. A Siemens recomenda manter a configuração padrão de 1,667 V. Se os desequilíbrios do sistema de alimentação puderem causar tensões de sequência zero mais altas durante a operação, o usuário pode aumentar a configuração padrão;
- **3I0> THRESHOLD VALUE** – É usado para definir o limite de corrente de sequência zero para detecção de falta à terra. O valor limite do parâmetro 3I0> deve ser definido para um valor menor que a menor corrente de terra esperada em faltas à terra no alimentador protegido. Para que a proteção de distância atue para falhas remotas externas como proteção de *backup*, defina o parâmetro de valor limite 3I0> para um valor mais sensível do que o necessário para falhas internas. A Siemens recomenda manter o valor de ajuste de 0,10 A;
- **MEMORY POLARIZATION** – Este parâmetro especifica o grau de polarização com uma tensão de *buffer* para *loops* fase-terra e fase-fase. Este parâmetro influencia a extensão da curva característica MHO dependendo da impedância da fonte. Se deseja-se trabalhar com a curva característica básica sem extensão, define-se o Mem. polarização para 0,0 %;

- **CROSS POLARIZATION** – Este parâmetro, especifica o grau de polarização com uma tensão de falha externa. Este parâmetro influencia a extensão da curva característica MHO dependendo da impedância da fonte. Se deseja-se trabalhar com a curva característica básica sem extensão, define-se o parâmetro `Cross polarization` para 0,0 %;
- **Zx : X REACH** – Define o alcance da zona x no eixo da reatância;
- **Zx : R** – Define o alcance da zona x no eixo da resistência.

O diagrama lógico da Figura 23 exibe a atuação da proteção das zonas com curvas características MHO. Neste diagrama é possível verificar a aquisição das tensões e correntes, identificação da impedância de alcance (`Zr impedance mode reach`), direcionalidade (`directional mode`), cálculo de polarização e seleção de falta (`loop selection`).

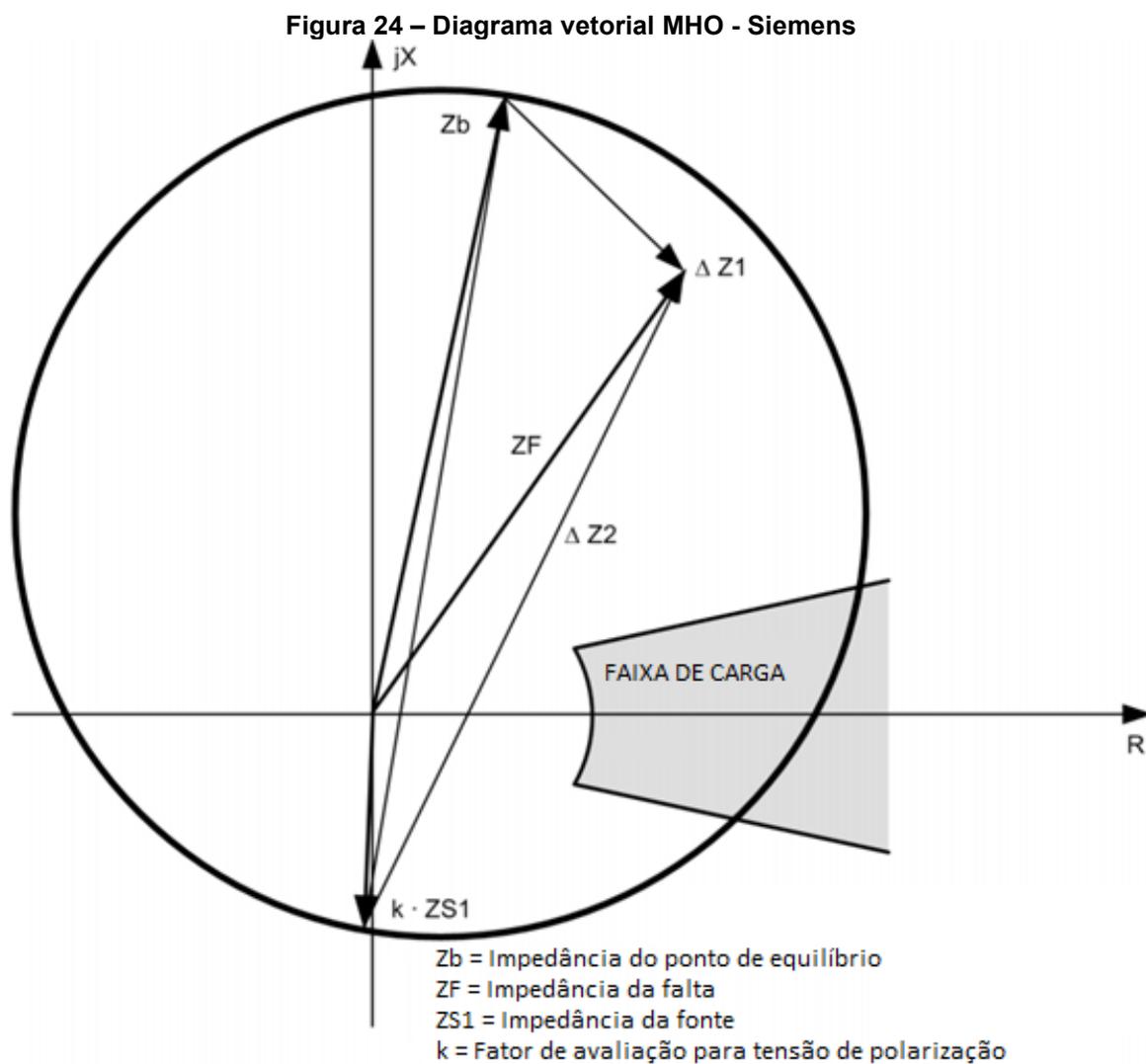
Figura 23 – Diagrama lógico com curva MHO - Siemens



Fonte: Modificado de manual de instrução 7SL86 (2023).

Após a leitura dos cálculos de polarização, o relé opera para a curva com característica MHO, comparando ângulos entre dois vetores denominados  $\Delta Z1$  e  $\Delta Z2$ . O valor de comparação entre esses dois casos é  $90^\circ$ : se for maior que este valor, está dentro da zona de proteção e, se for menor que  $90^\circ$  a falta está fora da zona. Esses vetores são calculados a partir da diferença entre os dois picos do diâmetro do círculo e a impedância da falta. O valor máximo de  $Z_r$  corresponde ao

valor de ajuste da zona ( $Z_r$  impedance mode reach) e o máximo valor  $k \cdot ZV$  é o valor de polarização. A Figura 24, apresenta este diagrama vetorial.



Fonte: Modificado de manual de instrução 7SL86 (2023).

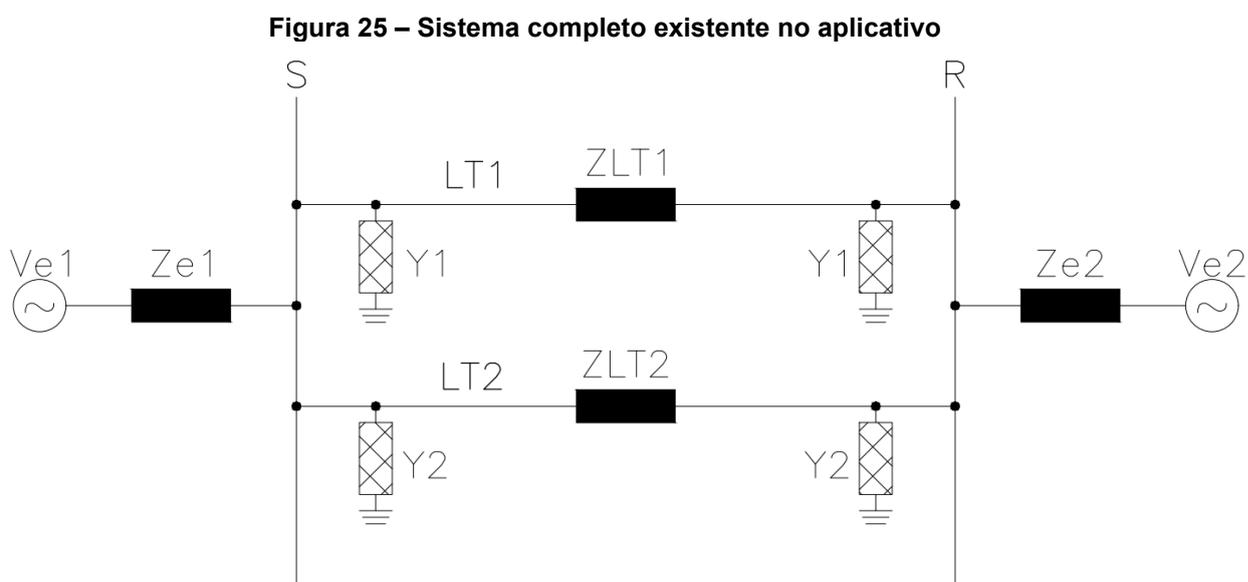
## 4 APLICATIVO E SIMULAÇÕES

Neste capítulo, será fornecida a documentação do aplicativo desenvolvido, parâmetros da execução e resultados das simulações.

### 4.1 SISTEMA

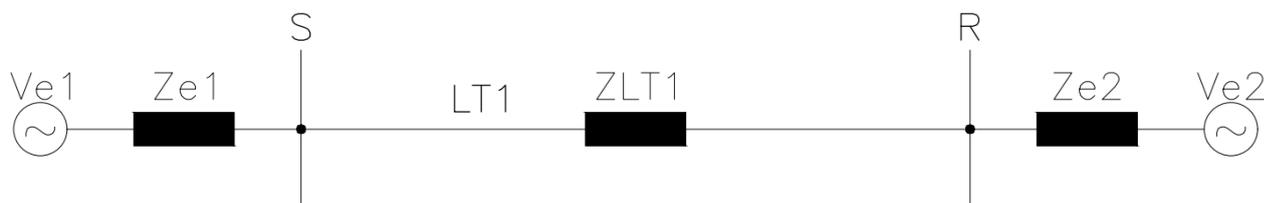
O sistema elétrico completo utilizado no aplicativo é ilustrado na Figura 25, atualmente é constituído por duas barras denominadas S e R, que são conectadas a um equivalente. Além disso é possível inserir até duas LTs e reatores *shunt*, sendo possível escolher na barra ou diretamente na LT. Os parâmetros do sistema serão descritos na Seção 4.2.

Foram realizadas diversas simulações de falta com o sistema completo conforme a Figura 25 e simulações com linha simples sem reator *shunt* conforme Figura 26. Cada simulação depende dos parâmetros de entrada inseridos pelo usuário.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 26 – Sistema LT simples sem *shunt*



Fonte: Autoria própria (2023).

## 4.2 PARÂMETROS

Nesta fase, o usuário preencherá no arquivo `main.py` os dados do sistema o qual se deseja simular. Os parâmetros são: Componentes equivalentes (tensão, ângulo e ligação), as impedâncias das linhas e dos reatores *shunt*, tipo de falta a ser simulada no sistema e o fabricante do relé. O sistema é dividido em dois lados, sendo os extremos da LT denominados S e R.

Os parâmetros de equivalentes devem ser inseridos da seguinte forma:

- $V_{e1}$ : Lado S da linha, sendo a tensão do equivalente, valor deverá ser fornecido em pu ou Volts [V];
- $\text{Ange1}$ : Lado S da linha, ângulo da tensão do equivalente, valor deverá ser fornecido em graus [°];
- $\text{Confe1}$ : Lado S da linha, ligação do equivalente, pode variar sendo possível estrela (Y) ou delta (D), valor deverá ser fornecido Y ou D;
- $Z_{0e1}$ : Lado S da linha, impedância de sequência zero do equivalente, dado em pu ou Ohms [ $\Omega$ ], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância;
- $Z_{1e1}$ : Lado S da linha, impedância de sequência positiva do equivalente, dado em pu ou Ohms [ $\Omega$ ], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância.

Trocando para o outro extremo da LT, tem-se:

- $V_{e2}$ : Lado R da linha, sendo a tensão do equivalente, valor deverá ser fornecido em pu ou Volts [V];

- $Ange2$ : Lado R da linha, ângulo da tensão do equivalente, valor deverá ser fornecido em graus [°];
- $Confe2$ : Lado R da linha, ligação do equivalente, pode variar sendo possível estrela (Y) ou delta (D), valor deverá ser fornecido Y ou D;
- $Z0e2$ : Lado R da linha, impedância de sequência zero do equivalente, dado em pu ou Ohms [ $\Omega$ ], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância;
- $Z1e2$ : Lado S da linha, impedância de sequência positiva do equivalente, dado em pu ou Ohms [ $\Omega$ ], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância.

Os parâmetros das LTs devem ser inseridos da seguinte forma:

- $Parallel$ : Se o usuário deseja inserir linhas paralelas, deverá escrever na opção como 'yes', caso contrário deverá inserir 'no';
- $Comprimento1$ : Extensão da LT 1, expressa em quilômetros [km];
- $Z01$ : Impedância de sequência zero da LT 1, em pu por quilômetro [pu/km] ou Ohms por quilômetro [ $\Omega$ /km], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância;
- $Z11$ : Impedância de sequência positiva da LT 1, em pu por quilômetro [pu/km] ou Ohms por quilômetro [ $\Omega$ /km], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância;
- $Y01$ : Admitância de sequência zero da LT 1, em pu por quilômetro [pu/km] ou Siemens por quilômetro [S/km], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância. Caso não tenha, o valor atribuído deverá ser zero;
- $Y11$ : Admitância de sequência positiva da LT 1, em pu por quilômetro [pu/km] ou Siemens por quilômetro [S/km], o valor deverá ser fornecido no

formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância. Caso não tenha, o valor atribuído deverá ser zero;

- Comprimento2: Extensão da LT 2, expressa em quilômetros [km];
- $Z_{02}$ : Impedância de sequência zero da LT 2, em pu por quilômetro [pu/km] ou Ohms por quilômetro [ $\Omega$ /km], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância;
- $Z_{12}$ : Impedância de sequência positiva da LT 2, em pu por quilômetro [pu/km] ou Ohms por quilômetro [ $\Omega$ /km], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância;
- $Y_{02}$ : Admitância de sequência zero da LT 2, em pu por quilômetro [pu/km] ou Siemens por quilômetro [S/km], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância. Caso não tenha, o valor atribuído deverá ser zero;
- $Y_{12}$ : Admitância de sequência positiva da LT 2, em pu por quilômetro [pu/km] ou Siemens por quilômetro [S/km], o valor deverá ser fornecido no formato complexo, isso é, uma parte real referente a resistência e uma parcela imaginária referente a reatância. Caso não tenha, o valor atribuído deverá ser zero.

Caso tenha reator *shunt*, o usuário deverá alterar os campos conforme a lista abaixo:

- *Shunt*: Se o usuário deseja que reatores *shunt*, deverá escrever na opção como 'yes', caso contrário deverá inserir 'no'.
- Local: É onde o usuário deseja inserir o reator *shunt*, pode-se escolher na LT inserindo o texto "linha" ou, se desejar, na barra deverá escrever "barra". Se não tiver reator, deverá ser ignorado esse campo.
- Ad1: Valor da admitância do reator *shunt* na linha 1, expresso em pu ou Siemens [S];

- Ad2: Valor da admitância do reator *shunt* na linha 2, expresso em pu ou Siemens [S].

Os parâmetros de tipo de falta devem ser inseridos da seguinte forma:

- Fault: Modalidade de curto-circuito a ser aplicada no sistema. A escolha é feita através de números inteiros ou escrito, conforme opções abaixo:
  - 1 ou mono: Falta monofásica ( $\emptyset g$ );
  - 2 ou bi: Falta bifásica ( $\emptyset \emptyset$ );
  - 3 ou bit: Falta bifásica-terra ( $\emptyset \emptyset g$ );
  - 4 ou tri: Falta trifásica ( $3 \emptyset$ );
  - Rf: Valor de resistência para faltas à terra, expresso em pu ou Ohms [ $\Omega$ ]. O preenchimento deste campo é opcional;
  - Rd: Valor de resistência para faltas entre fases, expresso em pu ou Ohms [ $\Omega$ ]. O preenchimento deste campo é opcional.

Os parâmetros de fabricantes de relés devem ser inseridos da seguinte forma:

- IED: Fabricante do relé de proteção. A escolha é realizada através de números inteiros ou escrito, conforme opções abaixo:
  - 1 ou SEL: Relé SEL – 311L;
  - 2 ou GE: Relé GE L90;
  - 3 OU SIEMENS: Relé SIEMENS 7SL86.
- Alcance: É a proporção da zona de proteção independente de qual seja, por exemplo, se a zona definida for 70% o valor atribuído deverá ser 0,7. Se a zona for definida for 150%, deverá ser inserido o valor de 1,5.

Caso seja escolhido o *Intelligent Electronic Devices* (IED) fabricante GE, o usuário deverá informar mais os seguintes ajustes:

- DIR\_RCA: Ângulo característico da função de supervisão direcional;
- DIR\_COMP\_LIMIT: Ângulo limite do comparador para a função de supervisão direcional;
- RCA: Ângulo característico da zona x da característica de distância;
- COMP\_LIMIT: Específica a forma da característica operacional, compara o ângulo limite.

Uma vez que o usuário entrar com parâmetros em pu, deverá seguir este padrão para todos os parâmetros. Para escolha de grandezas escritas em outras unidades, deverá ser definido se os valores serão primários ou secundários e seguir com esta definição para todos os parâmetros.

### **4.3 EXECUÇÃO DO PROGRAMA**

Após o preenchimento dos parâmetros do sistema, poderá ser executada a simulação. O programa executa todos os cálculos de matrizes equivalentes para encontrar as tensões e correntes dos relés. São realizadas 101 faltas, a primeira é na barra sentido reverso da linha e a última falta é feita na barra do terminal remoto, ou seja, na outra subestação. O intervalo é dividido a extensão da linha por 99, ou seja, são realizados curtos-circuitos ao longo da linha de transmissão em passos de 1 % da extensão da linha. Na execução é identificado o loop do tipo da falta escolhido, e inicia-se a resolução dos cálculos de polarização conforme cada fabricante. A saída do aplicativo são os gráficos com as informações congruentes a falta e o relé de proteção escolhidos, a partir deste ponto o usuário pode realizar suas análises.

### **4.4 GRÁFICOS**

O gráfico de saída da aplicação desenvolvida será mostrado a seguir. Os gráficos gerados nas saídas são conforme o fabricante do IED e tipo da falta, para proporcionar menor poluição visual e, portanto, facilitando a análise do usuário apresentando somente os dados pertinentes.

Para simulações serão utilizados valores primários, seguindo este padrão para todas as simulações.

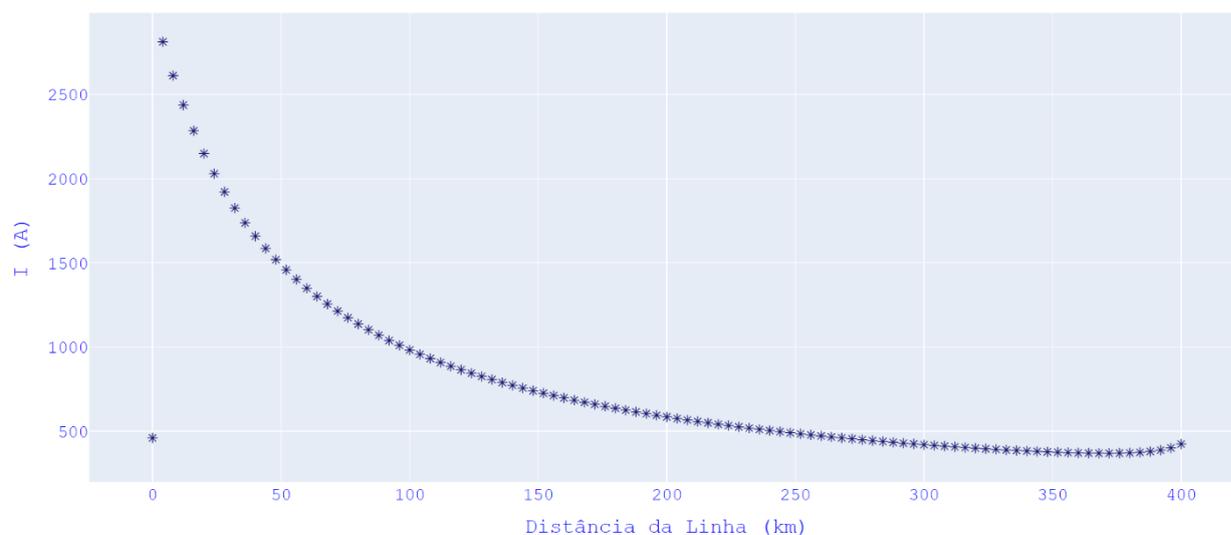
#### 4.4.1 Relé GE – L90

##### 4.4.1.1 Faltas monofásicas

De acordo com os ajustes detalhados no Capítulo 3, um item que não é um ajuste, mas pode interferir na atuação do relé é o sensor de mínimo valor de corrente de fase. O fabricante ajusta esse valor em 5 % do valor nominal do relé da entrada do relé (5 A ou 1 A).

A Figura 27 apresenta o gráfico de corrente da fase A visto pelo terminal S, para as fases de uma LT simples sem *shunt*, com 400 km de extensão.

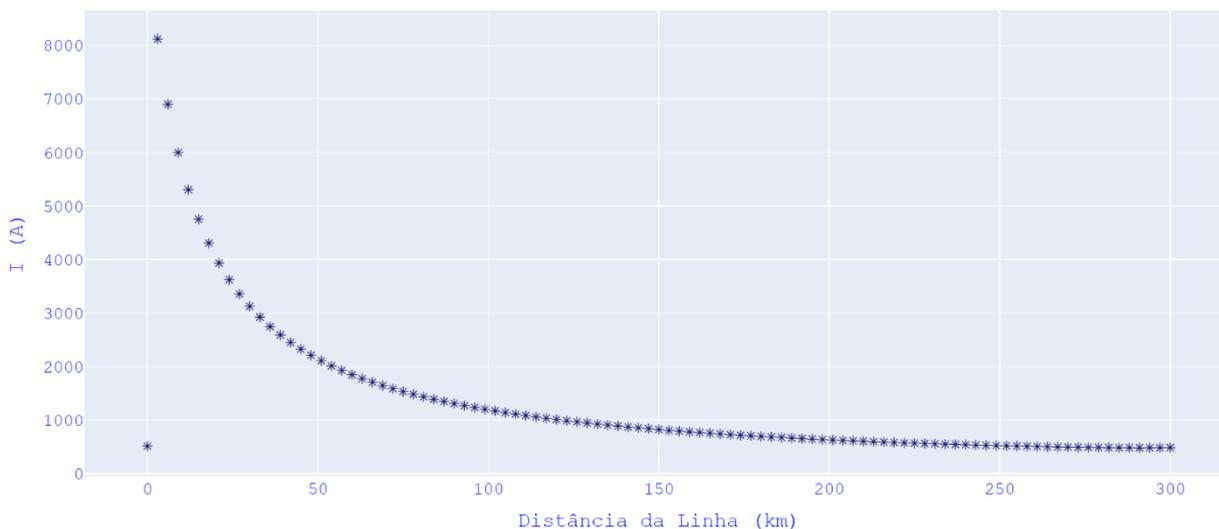
**Figura 27 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal S – 400 km – GE**  
Corrente ØA x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 28 exibe o gráfico de corrente da fase A visto pelo terminal R, para as fases de LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 300 km de extensão.

**Figura 28 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal R – 300 km – GE**  
Corrente  $\varnothing A$  x Distância da Falta - Terminal R



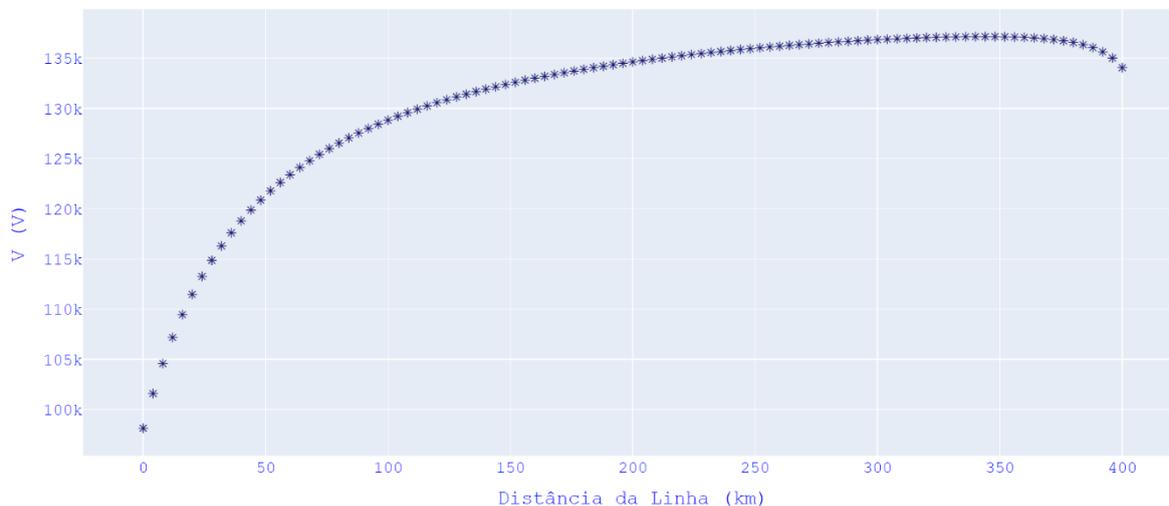
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Para falta monofásica AG, o usuário pode verificar se para esse tipo de falta haverá no relé o mínimo necessário de corrente. Nos exemplos das Figuras 27 e 28 foram utilizados valores primários. O usuário deverá verificar a relação de transformação do seu transformador de corrente para concluir se todas as faltas atenderam o requisito. Caso não atendam, uma solução para o usuário final seria alterar a relação de transformação, já que o sensor é fixo.

No Capítulo 3, foi apresentado também um requisito que pode interferir na polarização que é o sensor de mínima tensão, o qual faz a escolha de tensão para característica de expansão. A tensão de polarização utilizada pelo fabricante é a tensão de sequência positiva medida no momento da falta se a tensão estiver acima ou igual a 10 % do valor nominal, caso não atenda esse requisito será considerada a tensão de memória antes da falta.

A Figura 29 apresenta o gráfico de tensão sequência positiva visto pelo terminal S, de uma LT simples sem *shunt*, com 400 km de extensão.

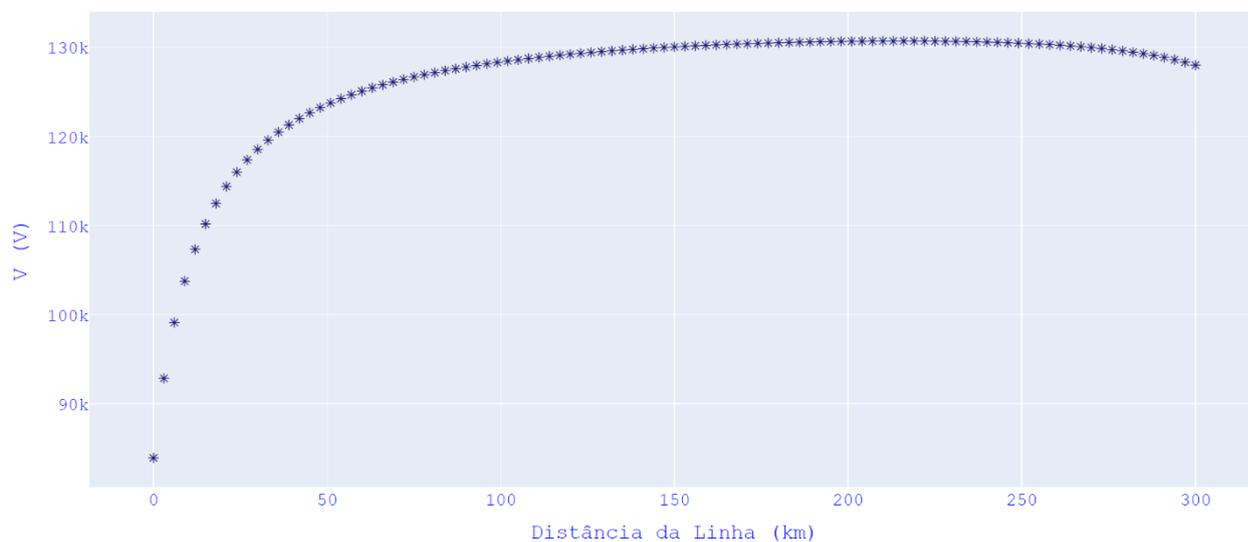
**Figura 29 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal S – 400 km – GE**  
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 30 apresenta o gráfico de tensão sequência positiva visto pelo terminal R, de LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 300 km de extensão.

**Figura 30 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal R – 300 km – GE**  
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal R



Fonte: Autoria própria (2023).

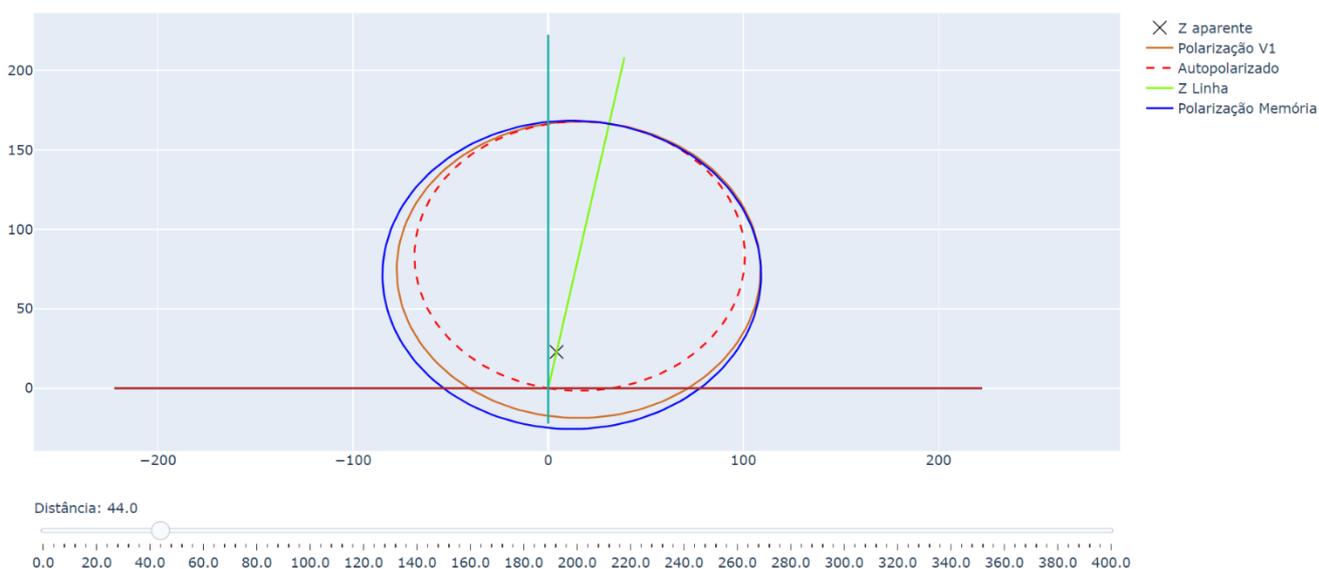
Embasado nas Figuras 29 e 30, em uma falha monofásica fase A, o usuário pode verificar qual tensão será utilizada para polarização. O usuário deverá verificar com a relação de transformação do seu transformador de potencial para concluir qual a tensão poderá ser utilizada.

Os ajustes que interferem na atuação do relé são o alcance, ângulo do direcional, comparador limite de direcionalidade, ângulo característico e comparador limite, consoante ao Capítulo 3. Estes são parâmetros da região da zona de proteção, através desses valores são formadas novas regiões e formatos da curva. O gráfico muda dependendo do ponto da falta, em que o usuário pode alterar a distância através da barra de seleção, sendo possível identificar o ponto de falta em relação à região de proteção, além da mudança da expansão ou contração.

Em uma LT simples sem *shunt*, observado pelo terminal S, com 400 km de extensão, com alcance de 80%, com os parâmetros  $DIR\_RCA = 79^\circ$ ,  $DIR\_COMP\_LIMIT = 90^\circ$ ,  $RCA = 79^\circ$  e  $COMP\_LIMIT = 90^\circ$ , no quilômetro 44 é obtido o gráfico da Figura 31, em uma falta monofásica fase A, o usuário pode verificar que a falta atendeu o requisito e está dentro da região. Caso não atendesse, uma solução para o usuário final seria alterar o alcance da região e analisar os parâmetros de  $DIR\_RCA$ ,  $DIR\_COMP\_LIMIT$ ,  $RCA$  e  $COMP\_LIMIT$ .

**Figura 31 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 400 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL S

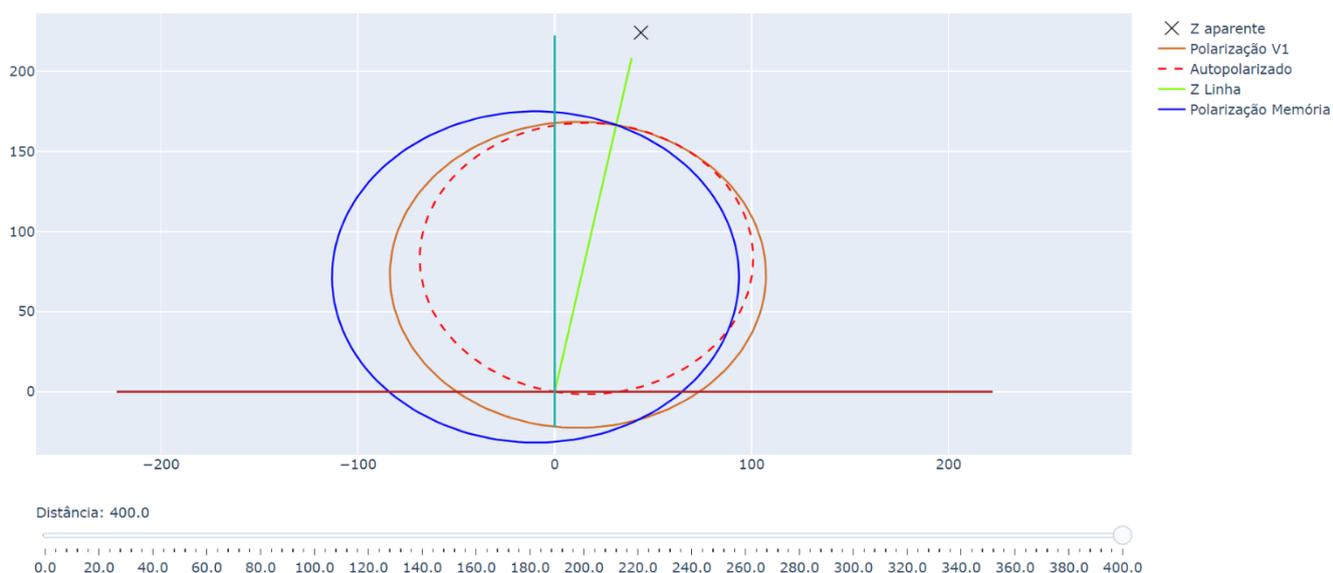


Fonte: Autoria própria (2023).

Para efeito de comparação, adotando os mesmos parâmetros da Figura 31, porém deslocando a distância para o quilômetro 400, é obtido o gráfico da Figura 32, o usuário pode verificar que a falta não atendeu o requisito e está fora da região.

**Figura 32 – Gráfico MHO – Não atuação falta AG – LT 400 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL S

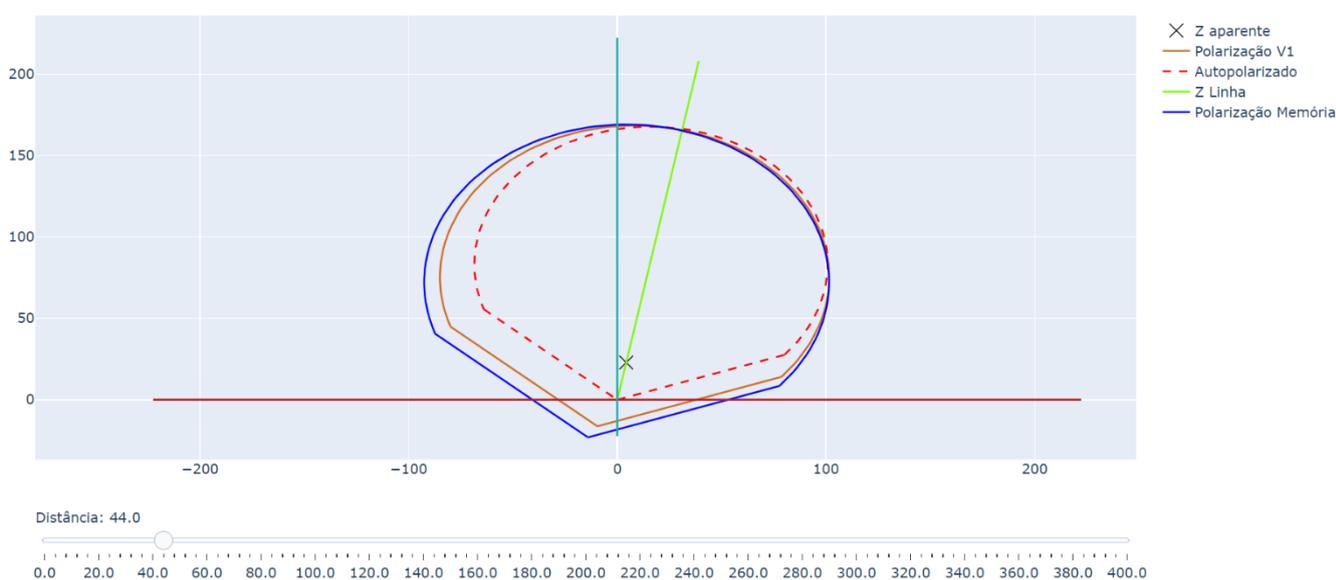


Fonte: Autoria própria (2023).

Alterando o parâmetro para  $DIR\_COMP\_LIMIT = 60^\circ$ , no quilômetro 44 é obtido o gráfico da Figura 33. É possível verificar que houve alteração da região de proteção.

**Figura 33 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 400 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL S



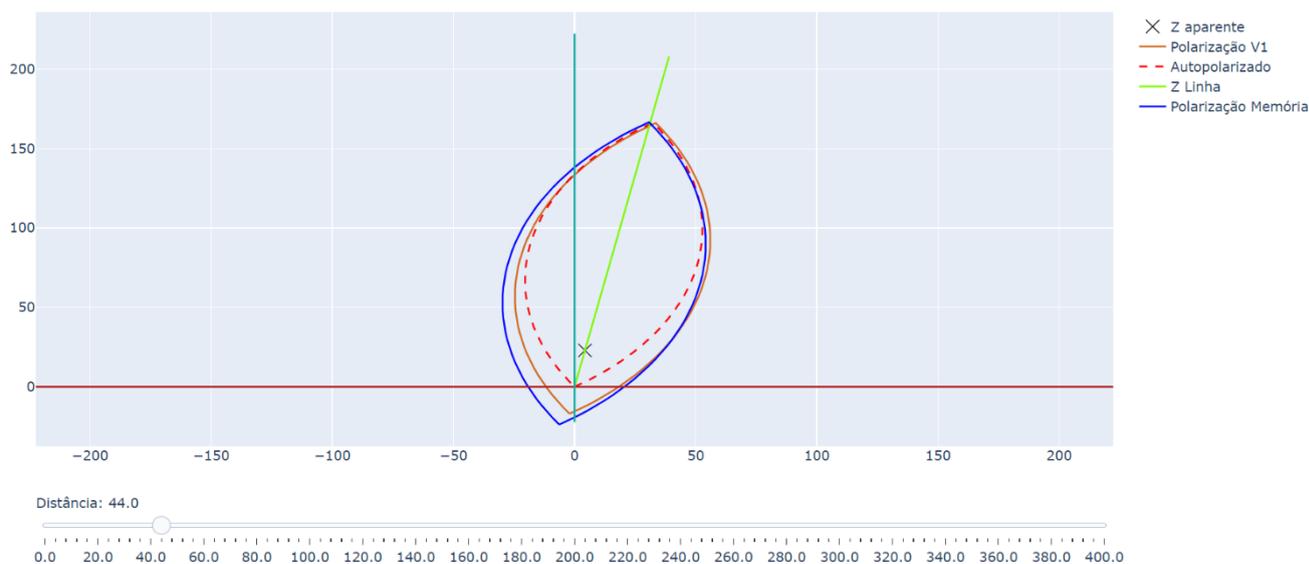
Fonte: Autoria própria (2023).

Alterando os parâmetros  $DIR\_COMP\_LIMIT = 45$  e  $COMP\_LIMIT = 45^\circ$ , no quilômetro 44 é obtido o gráfico da Figura 34 em uma falta monofásica fase A. É

possível verificar que houve alteração da região de proteção, formando a região conhecida como lenticular.

**Figura 34 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – 400 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL S

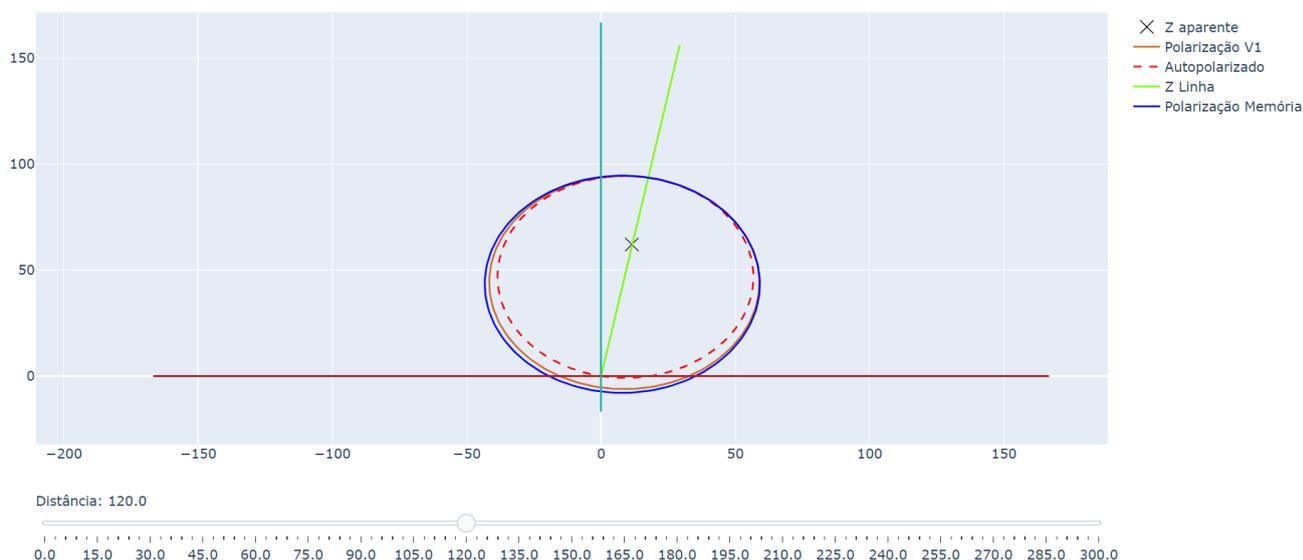


Fonte: Autoria própria (2023).

Realizando a alteração dos parâmetros de entrada, para realizar novas análises, utilizando LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 300 km de extensão, observado pelo terminal R, com alcance de 60%, com os parâmetros  $DIR\_RCA = 79^\circ$ ,  $DIR\_COMP\_LIMIT = 90^\circ$ ,  $RCA = 79^\circ$  e  $COMP\_LIMIT = 90^\circ$ , no quilômetro 120 é obtido o gráfico da Figura 35.

**Figura 35 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 300 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL R

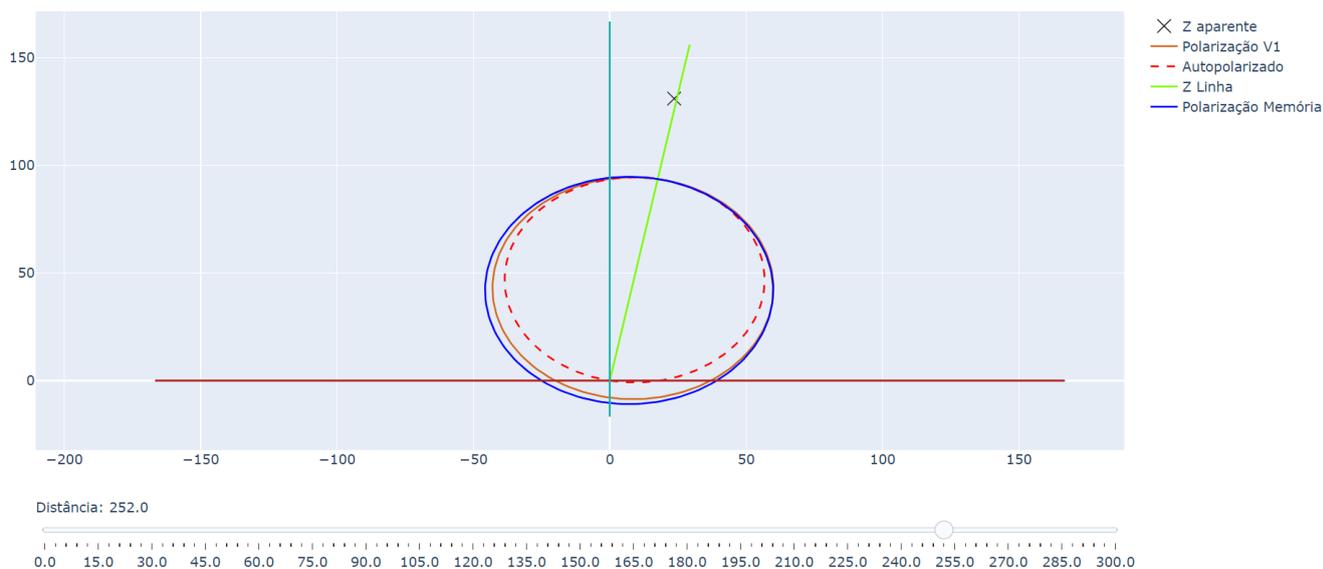


Fonte: Autoria própria (2023).

No quilometro 252, pode ser observado na Figura 36, que não atende aos requisitos, portanto, a proteção não irá atuar.

**Figura 36 – Gráfico MHO – Não atuação falta AG – LT 300 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL R

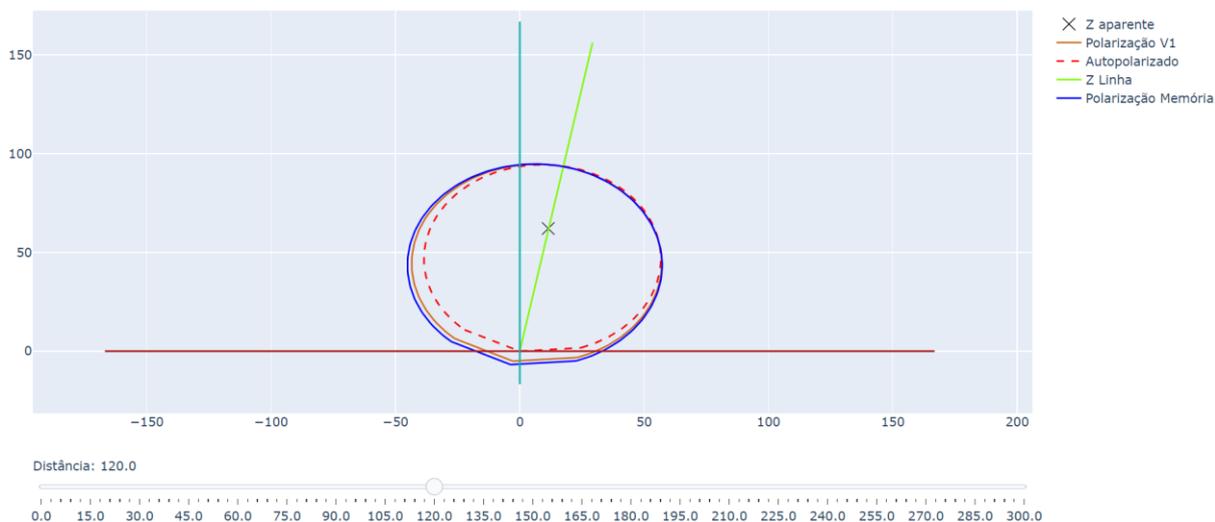


Fonte: Autoria própria (2023).

Alterando o parâmetro para  $DIR\_COMP\_LIMIT = 75^\circ$ , no quilômetro 120 é obtido o gráfico da Figura 37. É possível verificar que houve alteração da região de proteção.

**Figura 37 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 300 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL R



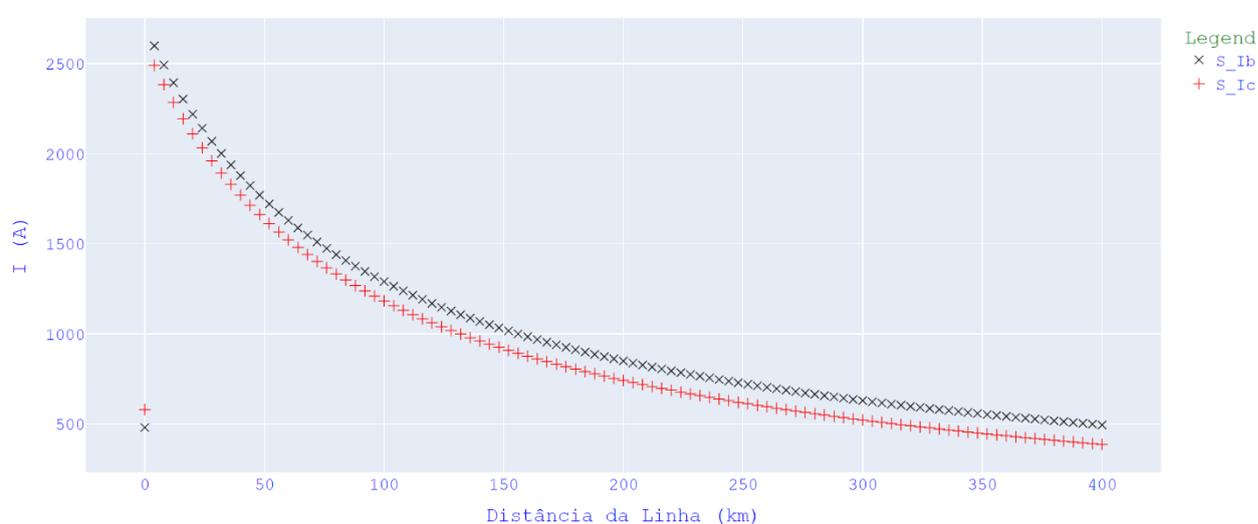
Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.4.1.2 Faltas Bifásicas

Para faltas bifásicas, segue o mesmo princípio utilizado nas faltas monofásicas, há um sensor de mínima corrente de fases no valor em 5 % do valor nominal do relé da entrada do relé.

A Figura 38 apresenta o gráfico de correntes das fases B e C visto pelo terminal S, de uma LT simples sem *shunt*, com 400 km de extensão.

**Figura 38 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal S – 400 km – GE**  
Correntes x Distância da Falta - Terminal S

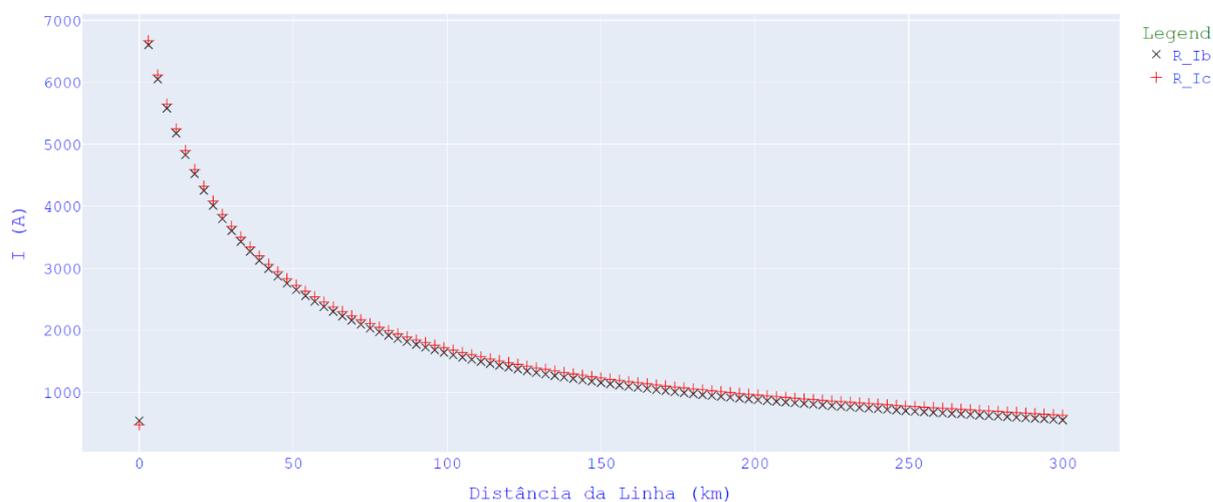


Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 39 exibe o gráfico de corrente das fases B e C visto pelo terminal R, para as fases de LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 300 km de extensão.

**Figura 39 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal R – 300 km – GE**

Correntes x Distância da Falta - Terminal R



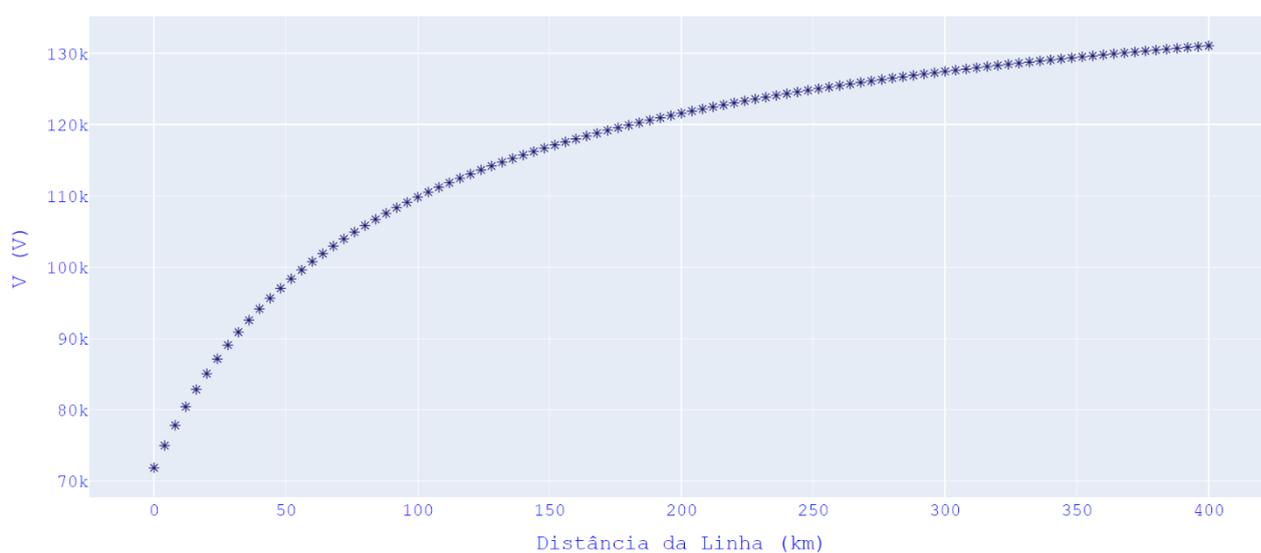
Fonte: Autoria própria (2023).

Da mesma forma que para faltas monofásicas, segue o princípio do sensor de mínima tensão. A tensão de polarização de sequência positiva será utilizada a medida no momento da falta somente se estiver acima ou igual a 10 % do valor nominal, senão será utilizado a tensão de memória.

A Figura 40 apresenta o gráfico de tensão sequência positiva visto pelo terminal S, de uma LT simples sem *shunt*, com 400 km de extensão.

**Figura 40 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal S – 400 km – GE**

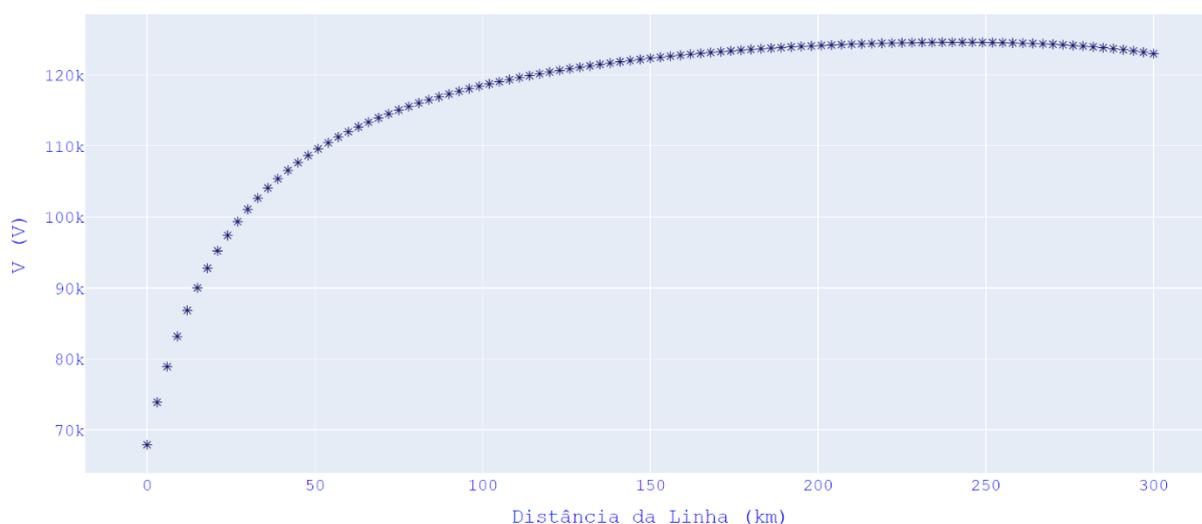
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 41 apresenta o gráfico de tensão sequência positiva visto pelo terminal R, de de LTs paralelas com shunt em ambas as linhas nos dois terminais, com 300 km de extensão.

**Figura 41 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal R – 300 km – GE**  
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal R



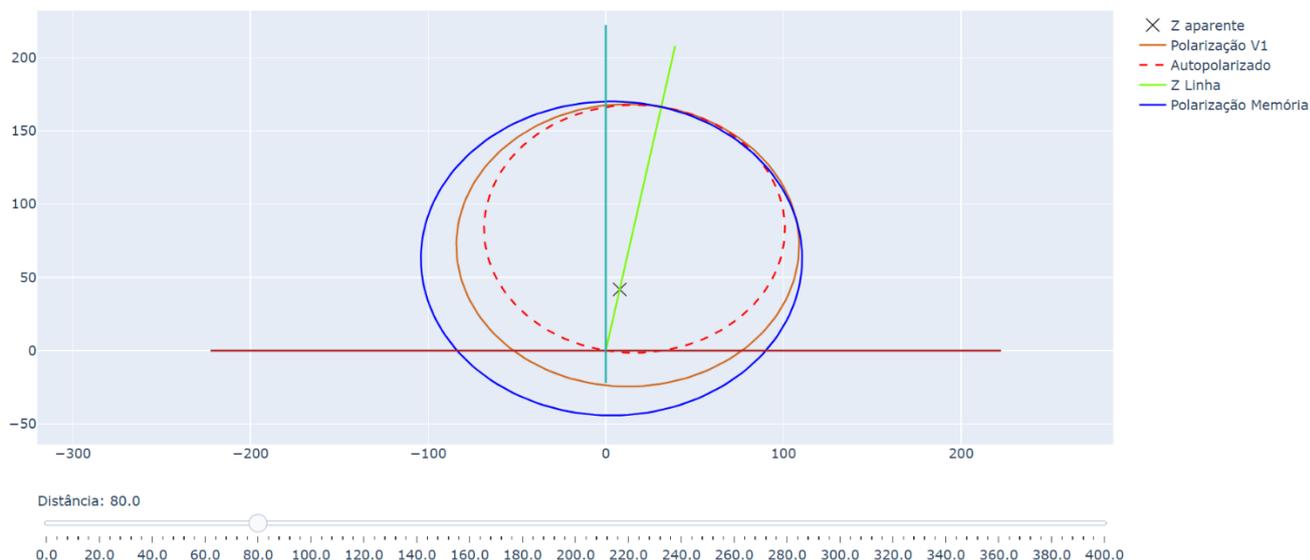
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Através das Figuras 40 e 41, em uma falha bifásica nas fases B e C, o usuário pode verificar qual tensão será utilizada para polarização.

A zona de proteção segue a mesma filosofia adotado na falha monofásica, através da simulação em uma LT simples sem *shunt*, observado pelo terminal S, com 400 km de extensão, com alcance de 80%, com os parâmetros  $DIR\_RCA = 79^\circ$ ,  $DIR\_COMP\_LIMIT = 90^\circ$ ,  $RCA = 79^\circ$  e  $COMP\_LIMIT = 90^\circ$ , no quilômetro 80 é obtido o gráfico da Figura 42, em uma falha bifásica fases B e C, o usuário pode verificar que a falta atendeu o requisito e está dentro da região.

**Figura 42 – Gráfico MHO – Atuação falta BC – LT 400 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL S

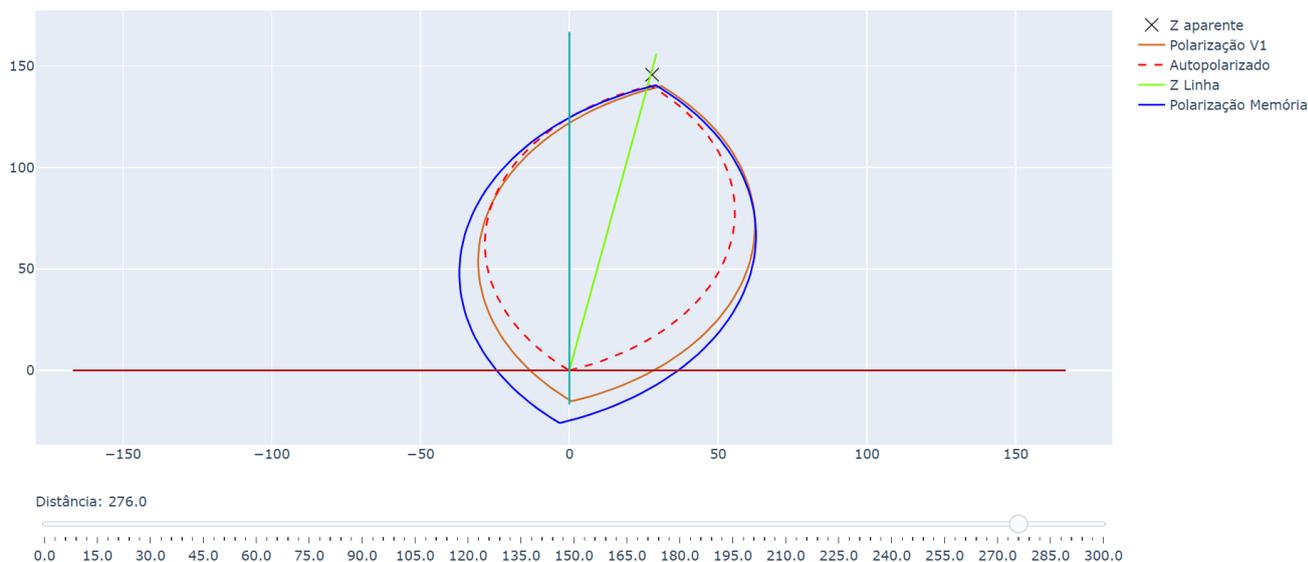


Fonte: Autoria própria (2023).

Efetuada alterações dos parâmetros de entrada para executar outra análise, utilizando LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 300 km de extensão, observado pelo terminal R, com alcance de 90%, com os parâmetros  $DIR\_RCA = 79^\circ$ ,  $DIR\_COMP\_LIMIT = 90^\circ$ ,  $RCA = 79^\circ$  e  $COMP\_LIMIT = 60^\circ$ , no quilômetro 120 é obtido o gráfico da Figura 43, o usuário pode verificar que a falta não atendeu o requisito e está fora da região.

**Figura 43 – Gráfico MHO – Não atuação falta BC – LT 300 km – GE**

Gráfico MHO L90 GE - TERMINAL R



Fonte: Autoria própria (2023).

Da mesma forma que para faltas monofásicas, podem ser obtidos outras formas de região de proteção no gráfico, de acordo com os parâmetros inseridos pelo usuário.

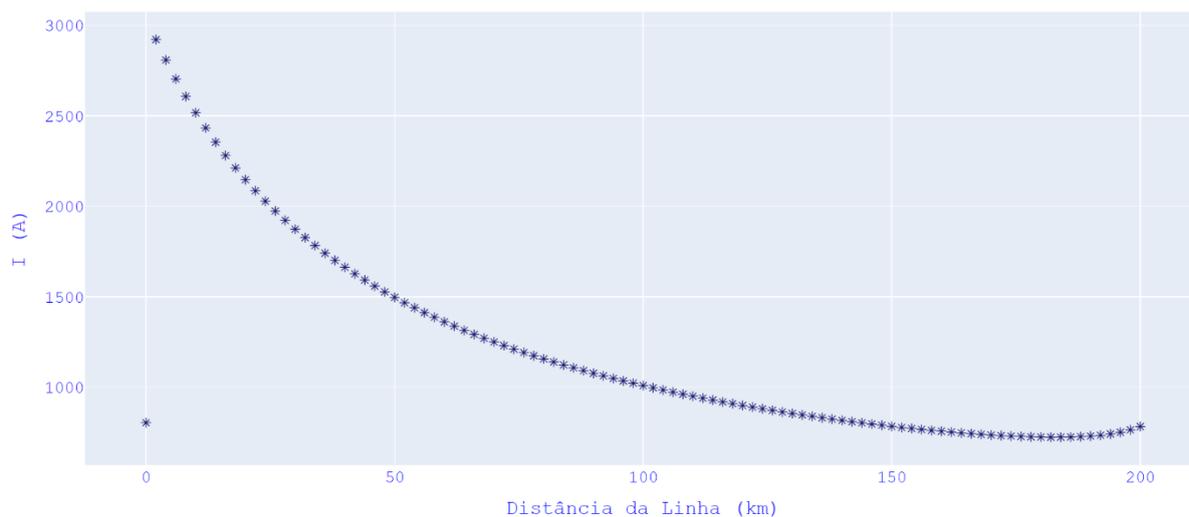
#### 4.4.2 Relé SEL – 311L

##### 4.4.2.1 Faltas monofásicas

Dentre os pontos levantados no Capítulo 3 para o fabricante SEL, um elemento para a atuação do relé é o sensor de mínima corrente de fase. O fabricante ajusta esse valor em 10 % do valor nominal do relé da entrada do relé (5 A ou 1 A).

Seguindo o mesmo modelo de simulações monofásicas, para uma LT simples sem *shunt*, porém com 200 km de extensão, visto pelo terminal S, apresenta o gráfico de corrente da fase A conforme Figura 44.

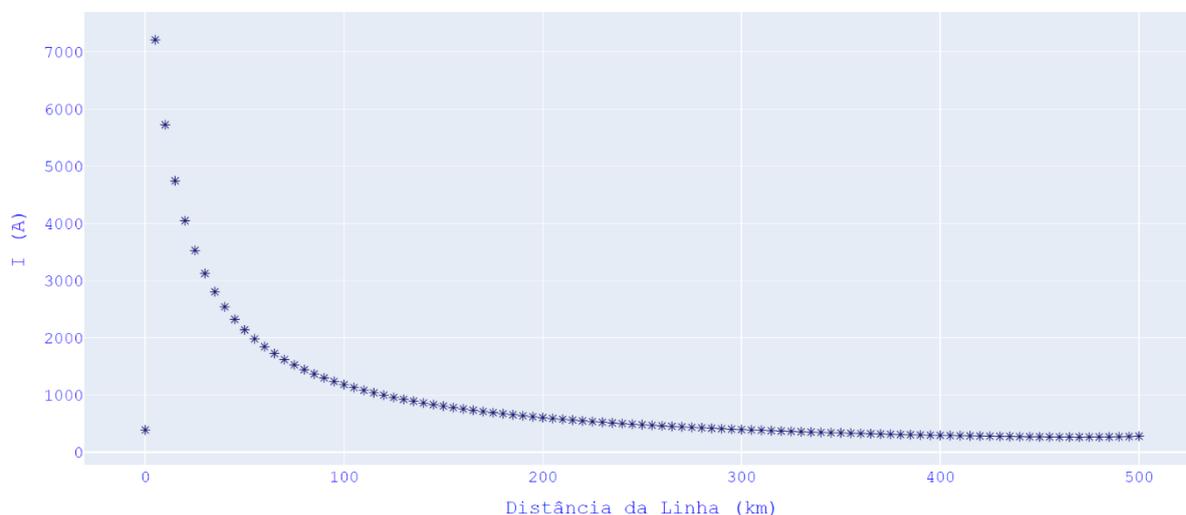
**Figura 44 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal S – 200 km – SEL**  
Corrente ØA x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

Outra simulação com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, porém com 500 km de extensão, visto pelo terminal R, pode ser verificado na Figura 45.

**Figura 45 – Gráfico corrente – Falta AG – Terminal R – 500 km – SEL**  
Corrente ØA x Distância da Falta - Terminal R

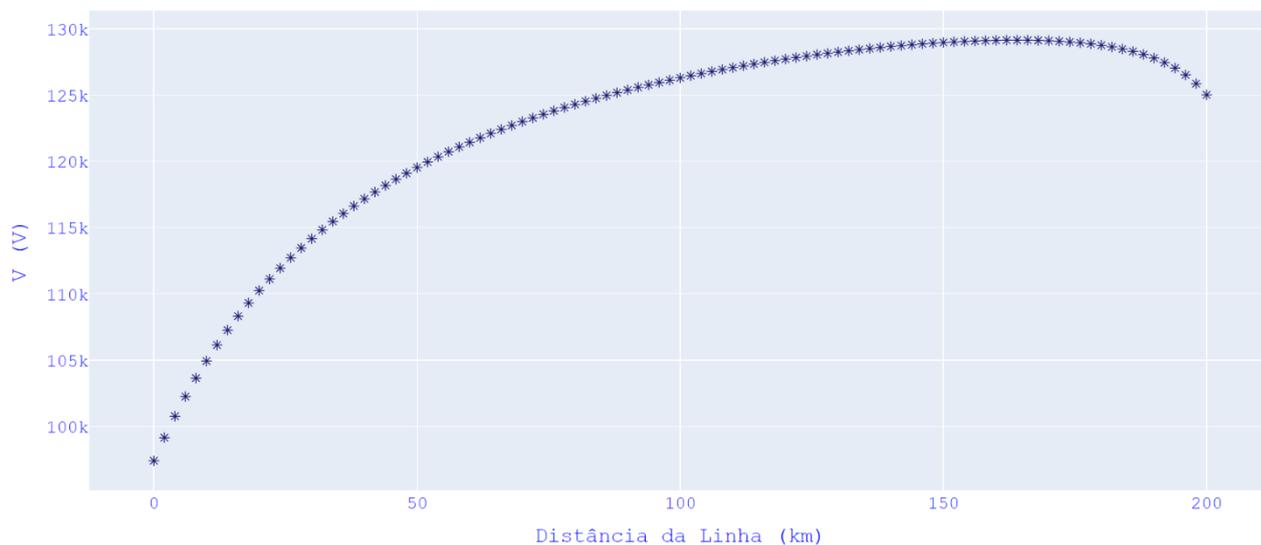


**Fonte: Autoria própria (2023).**

Nos gráficos das Figuras 44 e 45, o usuário deverá verificar a corrente primária e relação de transformação do TC utilizado, analisando se atende ao requisito, caso não atenda ao requisito uma alternativa é utilizar outra relação de transformação.

Outro item que é importante a ser observado é a tensão de polarização para característica de expansão. O relé do tipo 311L do fabricante SEL utiliza tensão de sequência positiva medida no momento da falta e a tensão de memória antes da falta para realizar a polarização. Os gráficos das Figuras 46 e 47 mostram os valores de tensão de sequência positiva.

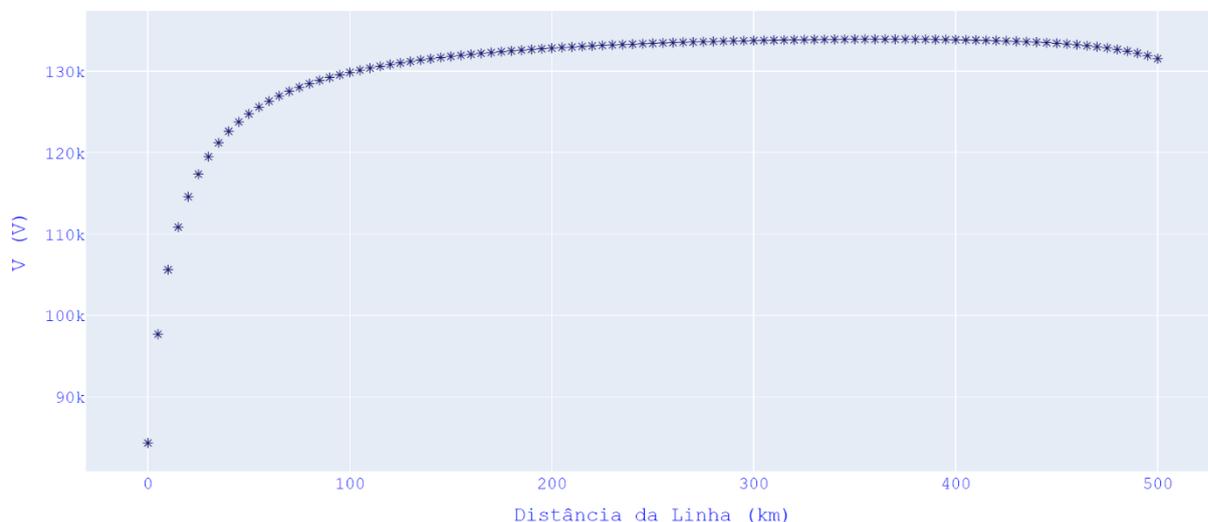
**Figura 46 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal S – 200 km – SEL**  
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

Outra simulação com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, porém com 500 km de extensão, visto pelo terminal R, pode ser verificada na Figura 47.

**Figura 47 – Gráfico V1 – Falta AG – Terminal R – 500 km – SEL**  
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal R



Fonte: Autoria própria (2023).

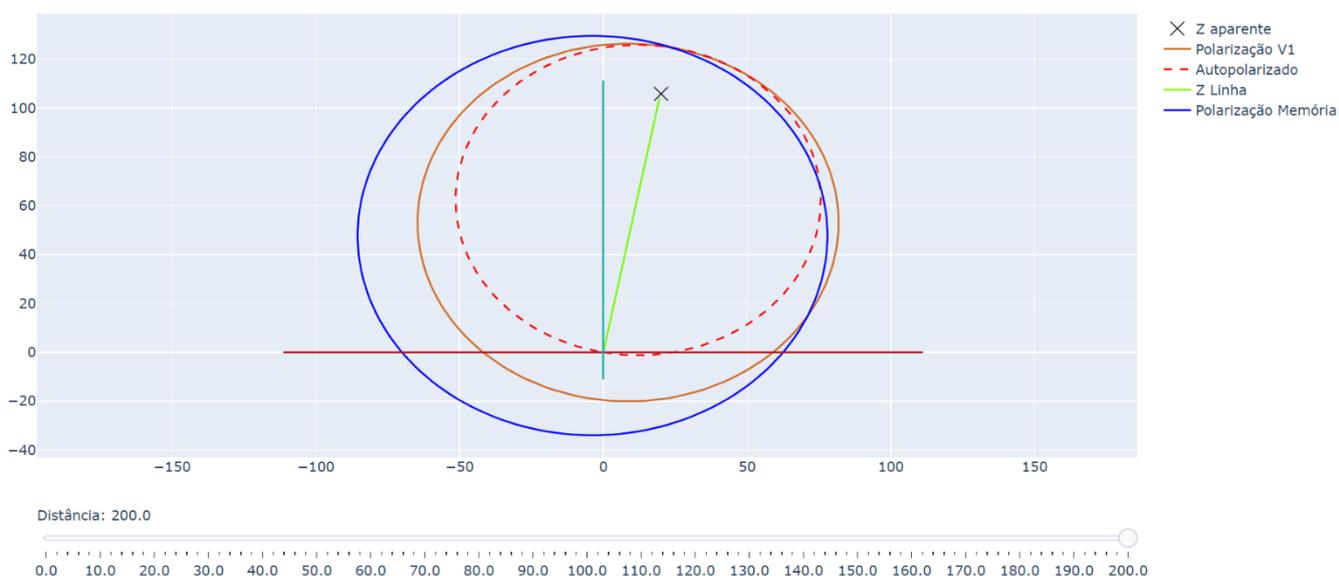
Consoante ao Capítulo 3, um ajuste importante para a funcionalidade do relé é o alcance. Para este fabricante o ângulo de comparação é fixo em 90°.

Utilizando uma LT simples sem *shunt*, porém, com 200 km de extensão, visto pelo terminal S, com alcance de 120% para realizar simulações, no quilômetro

200, o usuário pode constatar que a falta satisfaz a exigência e está dentro do alcance, conforme mostra a Figura 48.

**Figura 48 – Gráfico MHO – Atuação falta AG – LT 200 km – SEL**

Gráfico MHO 311L SEL - TERMINAL S

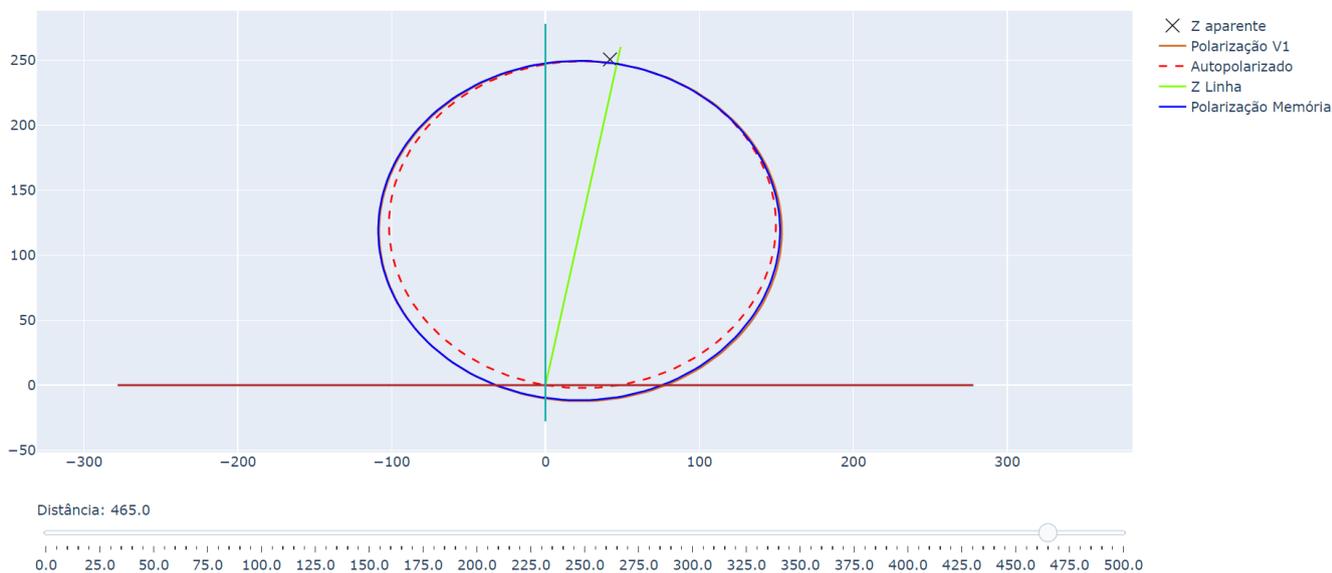


**Fonte: Autoria própria (2023).**

Alterando os parâmetros de entrada e gerando nos gráficos através dos parâmetros com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 500 km de extensão, observado pelo terminal R, com alcance de 95 %, no quilômetro 465 é obtido o gráfico da Figura 49, pode-se observar que a falta está fora da zona de alcance, portanto não satisfaz os requisitos.

**Figura 49 – Gráfico MHO – Não atuação falta AG – LT 500 km – SEL**

Gráfico MHO 311L SEL - TERMINAL R



Fonte: Autoria própria (2023).

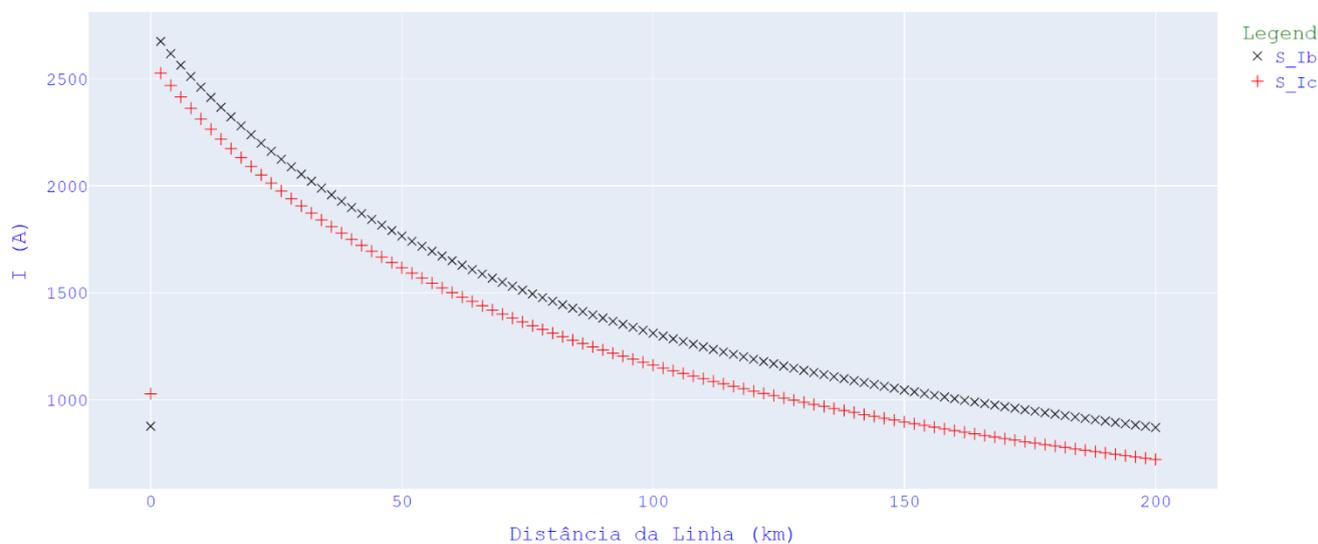
#### 4.4.2.2 Faltas bifásicas

As faltas bifásicas igualmente as faltas monofásicas requerem 10 % de corrente nominal para atender o sensor de mínima corrente.

Através de simulação com LT simples sem *shunt*, porém, com 200 km de extensão, visto pelo terminal S, apresenta o gráfico de corrente da fase A conforme Figura 50.

**Figura 50 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal S – 200 km – SEL**

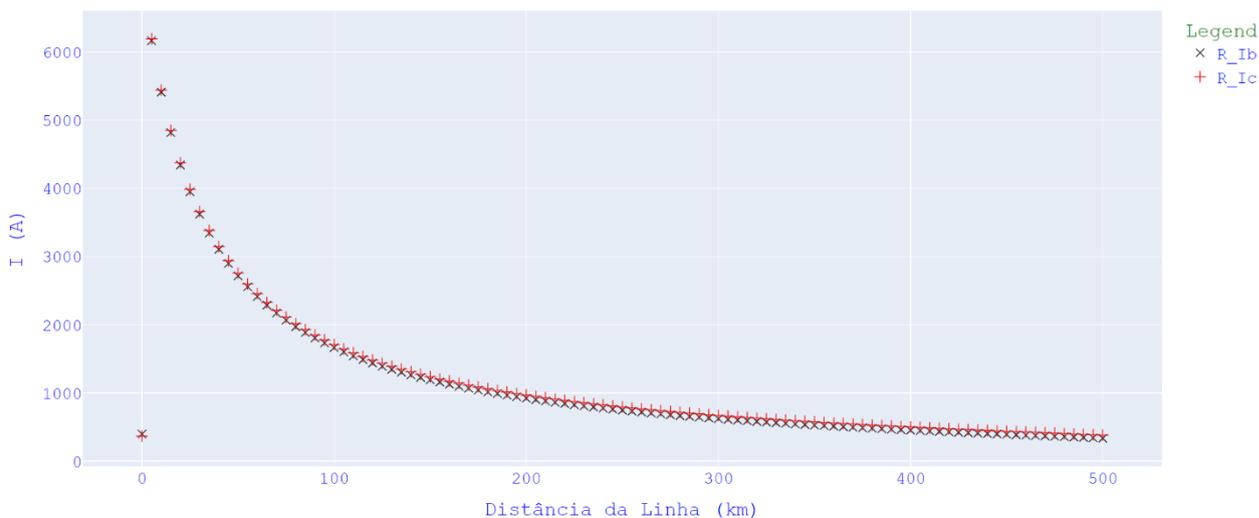
Correntes x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

Outra simulação com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, porém com 500 km de extensão, visto pelo terminal R, pode ser verificada na Figura 51.

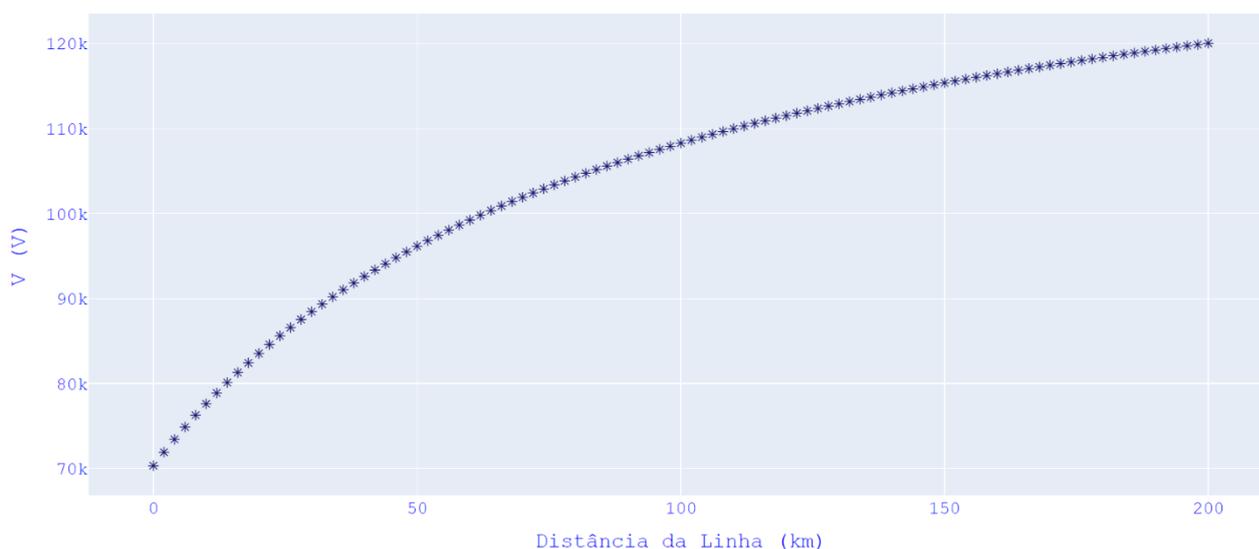
**Figura 51 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal R – 500 km – SEL**  
Correntes x Distância da Falta - Terminal R



Fonte: Autoria própria (2023).

Assim como nas faltas monofásicas, a SEL utiliza para faltas bifásicas tensão de sequência positiva medida e de memória para efetuar a polarização. Simulando uma LT simples sem *shunt*, porém, com 200 km de extensão, visto pelo terminal S, o usuário consegue observar o valor de sequência positiva conforme Figura 52.

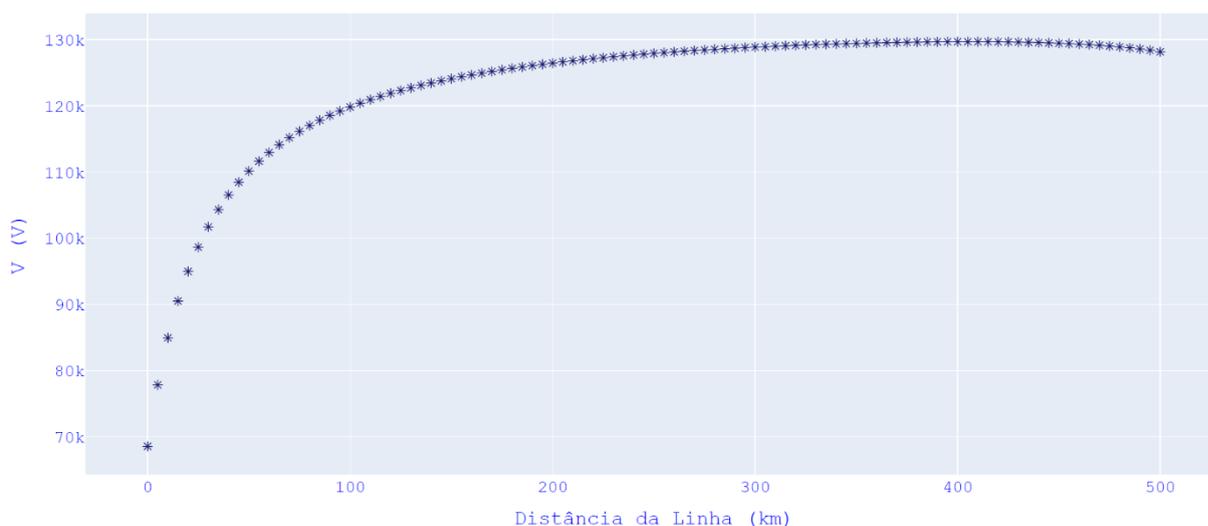
**Figura 52 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal S – 200 km – SEL**  
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

Modificando os parâmetros para LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, porém, com 500 km de extensão, visto pelo terminal R, obtém-se a Figura 53, o qual o usuário consegue analisar o valor de sequência positiva.

**Figura 53 – Gráfico V1 – Falta BC – Terminal R – 500 km – SEL**  
Tensão de sequência 1 x Distância da Falta - Terminal R



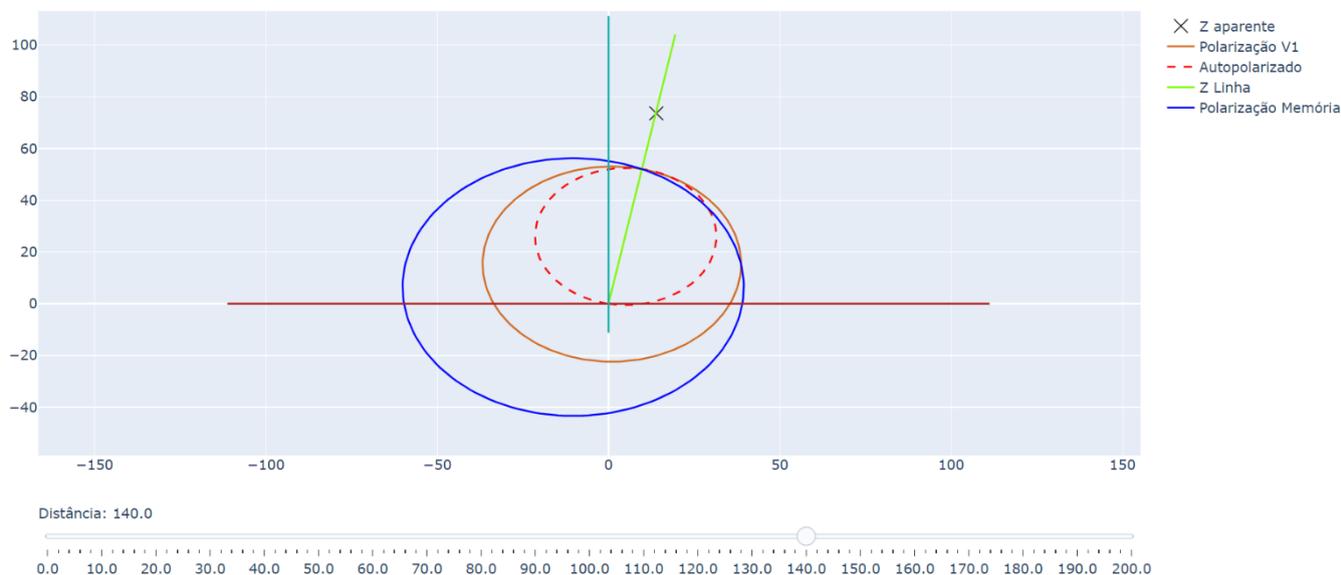
Fonte: Autoria própria (2023).

Para faltas bifásicas, o ângulo de comparação para operação é  $90^\circ$ , da mesma forma que acontece para faltas monofásicas. O ajuste que pode ser alterado nesta análise é o alcance da região.

Executando o algoritmo com uma LT simples sem *shunt*, porém com 200 km de extensão, visto pelo terminal S, com alcance de 50 % para realizar simulações, no quilômetro 140, como a falta está fora do alcance, não satisfaz a exigência, conforme mostra a Figura 54.

**Figura 54 – Gráfico MHO – Não atuação falta BC – LT 200 km – SEL**

Gráfico MHO 311I SEL - TERMINAL S

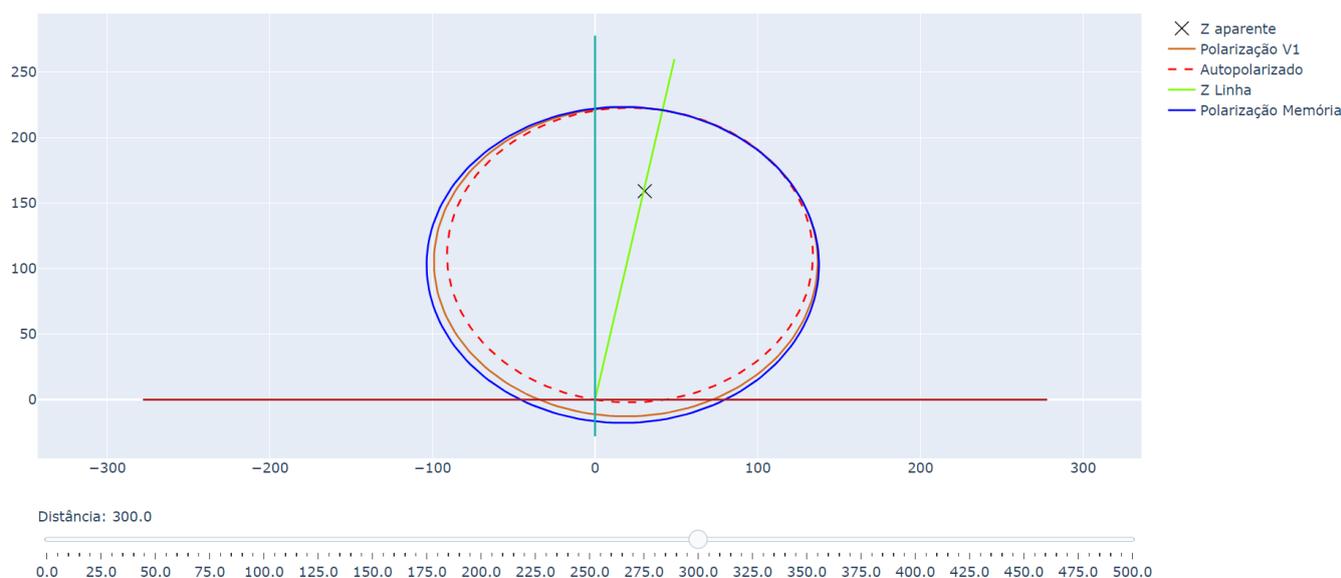


Fonte: Autoria própria (2023).

Ao elaborar uma simulação com alcance de 85 %, em LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 500 km de extensão, observado pelo terminal R, na distância de 300 km é formado o gráfico da figura 55, o usuário pode observar que atende ao requisito, pois está dentro região de proteção.

**Figura 55 – Gráfico MHO – Atuação falta BC – LT 500 km – SEL**

Gráfico MHO 311I SEL - TERMINAL R



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.4.3 Relé SIEMENS – 7SL86

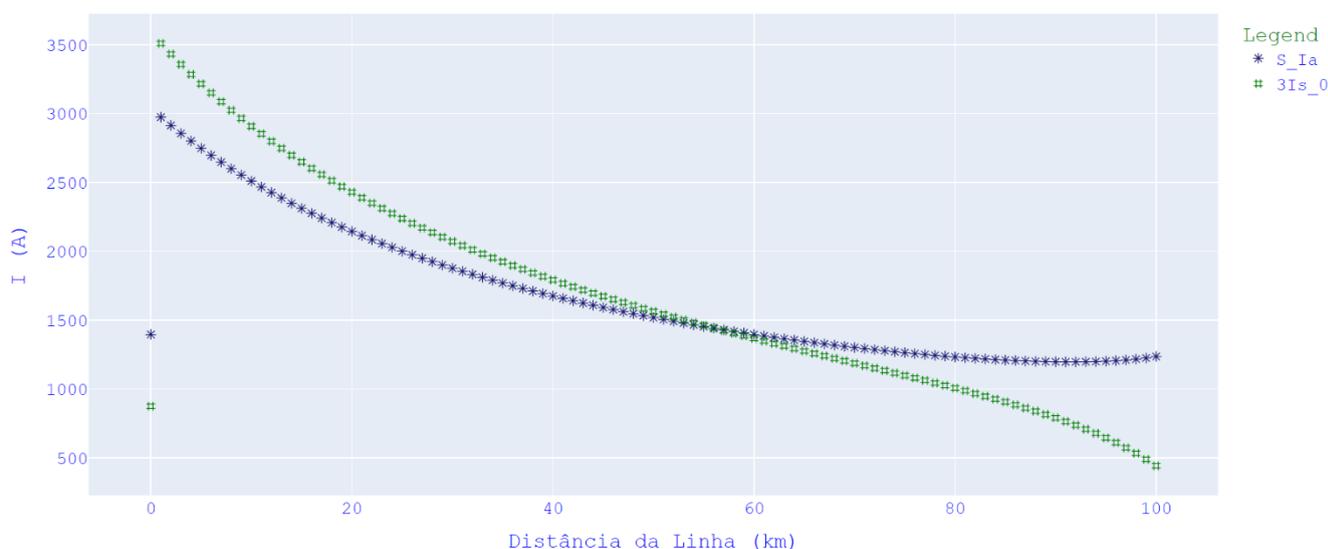
Para o relé SIEMENS 7SL86, utiliza um fator  $k$  para inserir na equação do elemento de distância por meio de tensão da fase(s) e a(s) tensão(ões) da(s) fase(s) saudáveis e há sensor de mínima corrente. Os primeiros gráficos mostram as tensões e correntes para realizar estas análises e os gráficos subsequentes mostram as regiões de proteção parametrizadas, tanto por polarização de memória quanto a cruzada. Para o relé SIEMENS a característica MHO sempre compara o ângulo de  $90^\circ$ . O padrão recomendado para  $K_{source}$  e  $K_{cross}$  é 15 %, portanto os gráficos serão conforme recomendação do fabricante. Se o usuário desejar, pode realizar alterações na aba “plots”.

##### 4.4.3.1 Faltas monofásicas

Tal como indicado Capítulo 3, o fabricante utiliza sensor de mínima corrente, sendo definido o valor de 10 % da corrente nominal, as entradas possuem normalmente correntes nominais de 5 A ou 1 A. Há mais um sensor de mínima corrente, sendo o valor mínimo de 310 para detecção de faltas a terra, o fabricante recomenda ajustar este parâmetro em 0,1 A.

Com uma LT simples sem *shunt*, porém com 100 km de extensão, visto pelo terminal S, o usuário pode verificar os valores de corrente na Figura 56. Caso seja necessário, o usuário poderá trocar a relação de transformação do TC como uma alternativa.

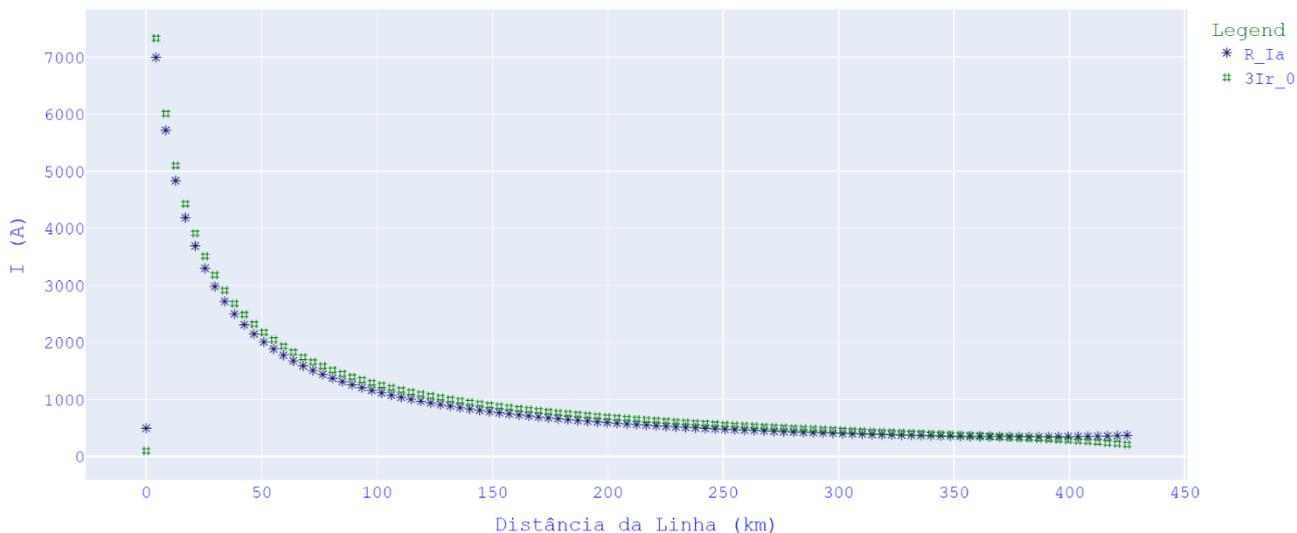
**Figura 56 – Gráfico correntes – Falta AG – Terminal S – 100 km – Siemens**  
Correntes x Distância da Falta - Terminal S



Fonte: Autoria própria (2023).

Com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 425 km de extensão, observado pelo terminal R, o usuário pode verificar os valores de corrente na Figura 57.

**Figura 57 – Gráfico correntes – Falta AG – Terminal R – 425 km – Siemens**  
Correntes x Distância da Falta - Terminal R

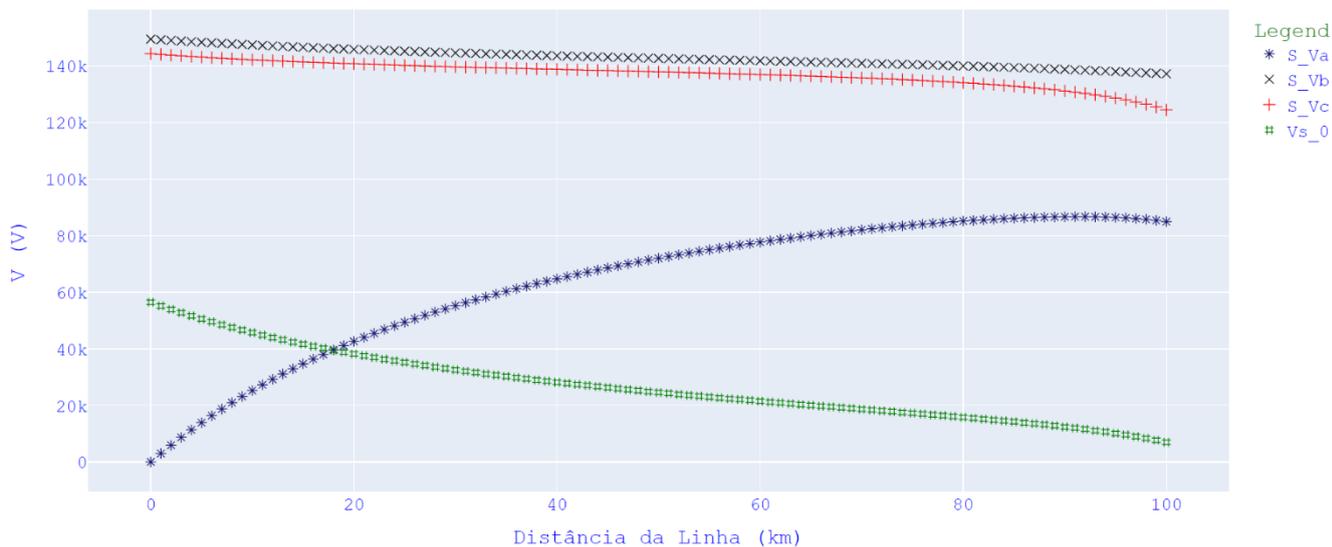


Fonte: Autoria própria (2023).

Para tensões, são dois parâmetros importantes, tanto de fases para realizar a polarização, quanto para o mínimo sensor de tensão de sequência zero, sendo o valor 1,667 V recomendado pelo fabricante, como indicado no Capítulo 3.

Com uma LT simples sem *shunt*, 100 km de extensão, visto pelo terminal S, o usuário pode verificar os valores de tensões na Figura 58.

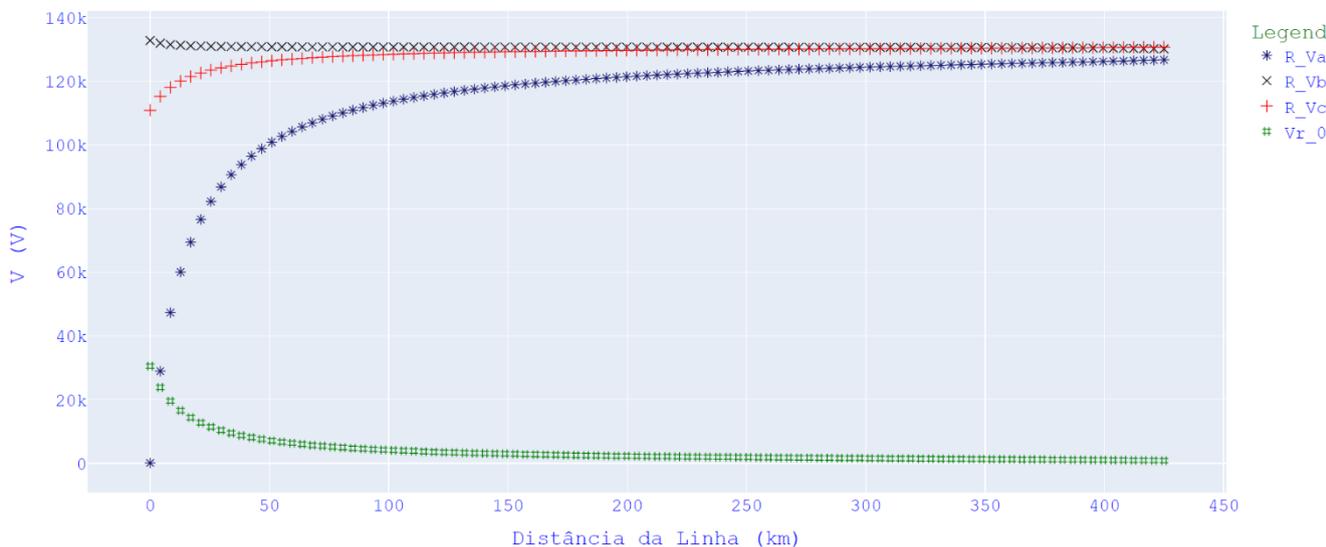
**Figura 58 – Gráfico tensões – Falta AG – Terminal S – 100 km – Siemens**  
Tensões x Distância da Falta



Fonte: Autoria própria (2023).

Na simulação com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 425 km de extensão, observado pelo terminal R, o usuário pode verificar os valores de tensão conforme a Figura 59.

**Figura 59 – Gráfico tensões – Falta AG – Terminal R – 425 km – Siemens**  
Tensões x Distância da Falta



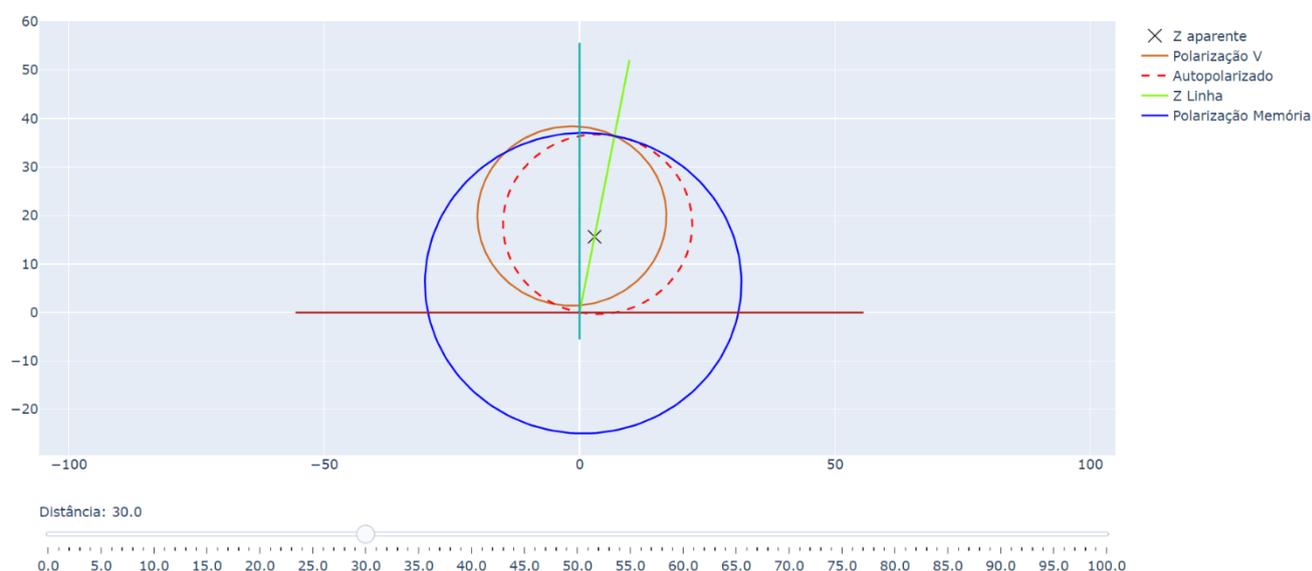
Fonte: Autoria própria (2023).

No Capítulo 3 é indicado que o fabricante utiliza duas formas polarização, sendo por polarização por memória e outra por polarização cruzada. Em ambos utilizam um fator  $k$ , padrão recomendado para  $K_{source}$  e  $K_{cross}$  é 15 %, portanto foi considerado este valor para gerar os gráficos.

Em uma LT simples sem *shunt*, porém com 100 km de extensão, alcance de 60 %, visto pelo terminal S, no quilômetro 30, utilizando tensão de polarização memorizada, através da Figura 60, o usuário pode verificar que a falta atendeu os requisitos e está dentro da região. Caso não atendesse, uma solução para o usuário final seria analisar o fator  $K_{source}$ .

**Figura 60 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal S – 100 km – Siemens**

Gráfico MHO 7SJ86 SIEMENS - TERMINAL S

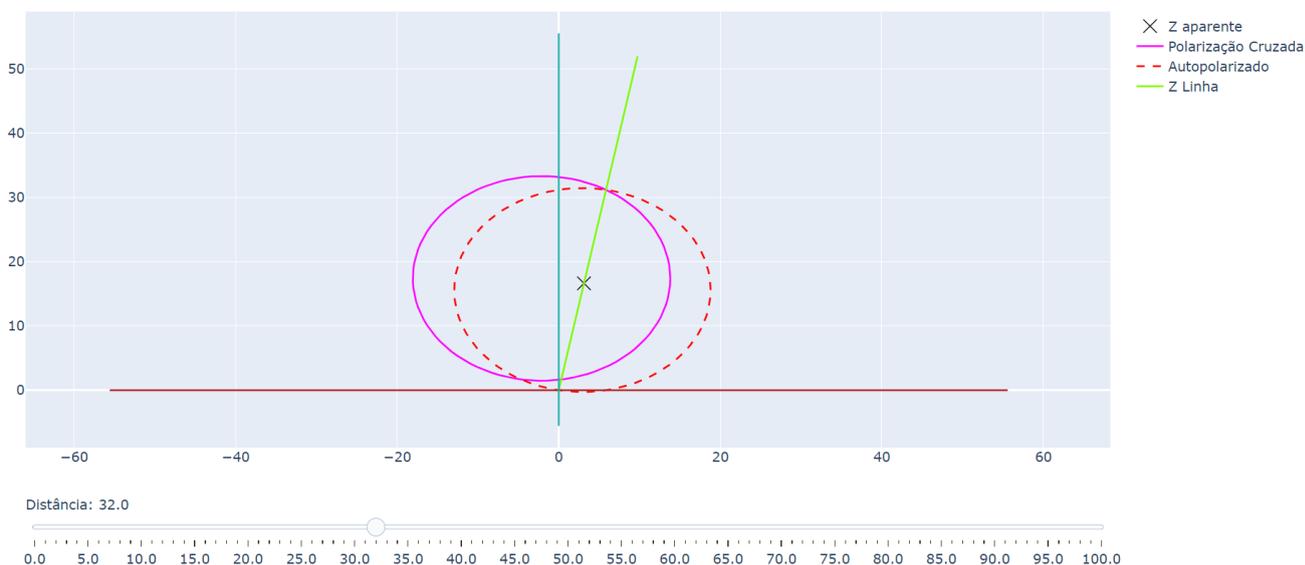


Fonte: Autoria própria (2023).

A simulação com a mesma linha, porém alterando para polarização cruzada, pode ser verificada na Figura 61, onde está dentro da zona de proteção, portanto, atende o requisito. Caso não atendesse, uma solução para o usuário final seria analisar o fator  $K_{cross}$ .

**Figura 61 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal S – 100 km – Siemens**

Gráfico MHO CRUZADO 7SJ86 SIEMENS - TERMINAL S

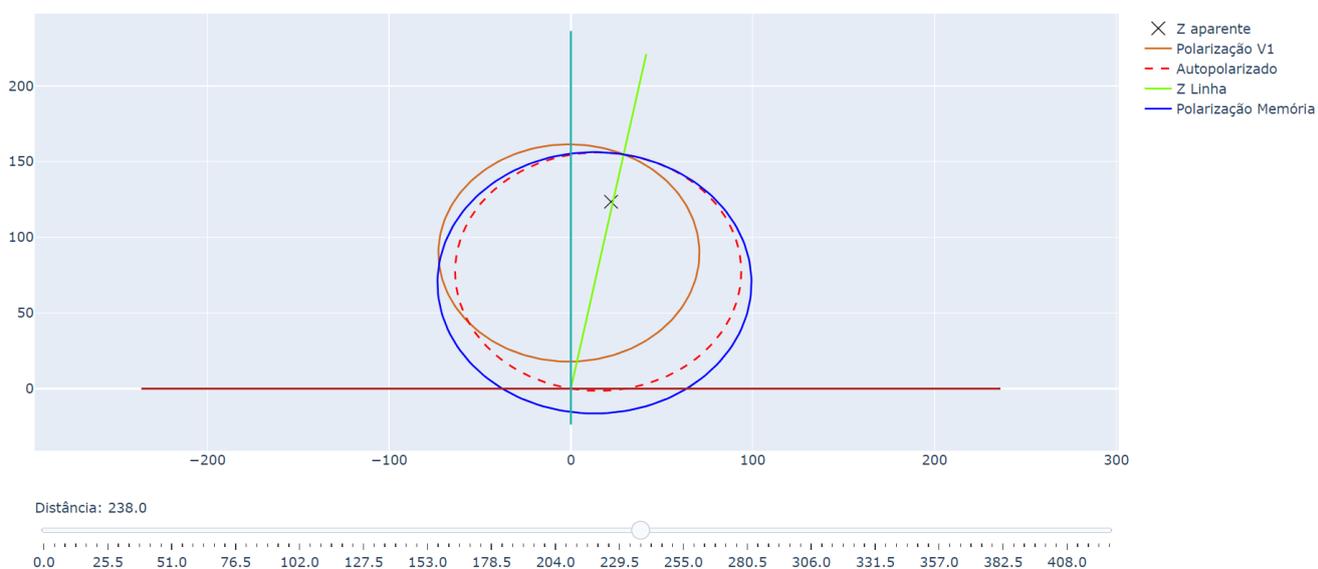


Fonte: Autoria própria (2023).

Em LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, 425 km de extensão, alcance de 70%, visto pelo terminal R, no quilômetro 238, utilizando tensão de polarização memorizada, com base na Figura 62 o usuário pode verificar que a falta atendeu os requisitos e está dentro da região. Caso não atendesse, uma solução para o usuário final seria analisar o fator  $K_{source}$ .

**Figura 62 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal R – 425 km – Siemens**

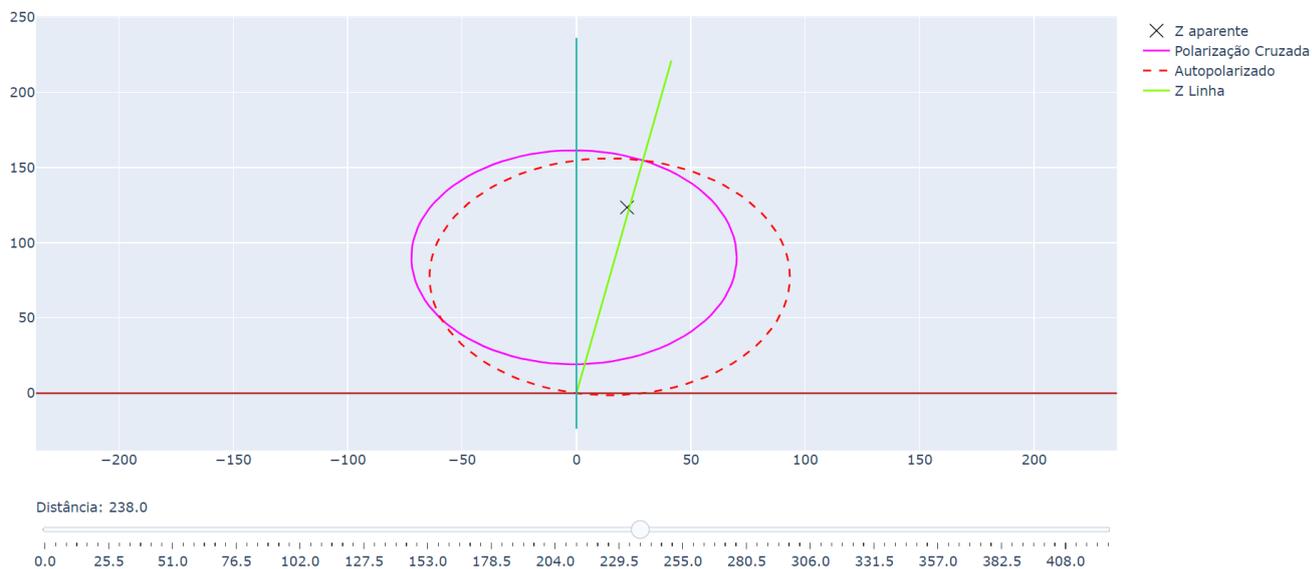
Gráfico MHO 7SJ86 SIEMENS - TERMINAL R



Fonte: Autoria própria (2023).

A simulação com a mesma linha, porém alterando para polarização cruzada pode ser verificada na Figura 63, onde está dentro da zona de proteção, portanto, atende o requisito. Caso não atendesse, uma solução para o usuário final seria analisar o fator  $K_{cross}$ .

**Figura 63 – Gráfico MHO – Falta AG– Terminal R – 425 km – Siemens**  
Gráfico MHO CRUZADO 7SJ86 SIEMENS - TERMINAL R



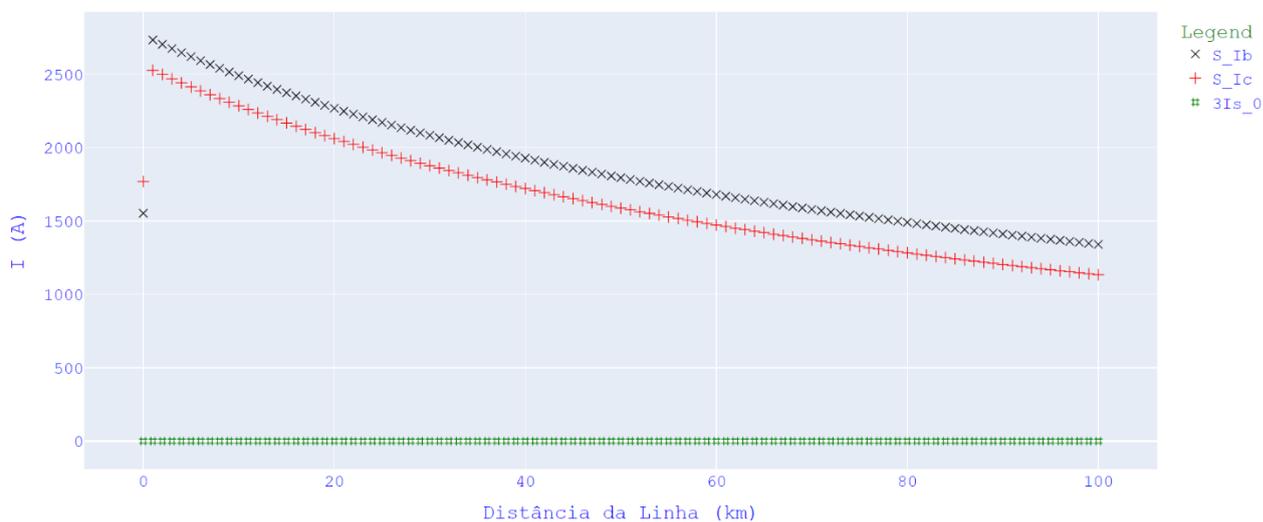
Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.4.3.2 Faltas bifásicas

As faltas bifásicas, utilizam os mesmos padrões das faltas monofásicas, possuem sensor de mínima corrente de fases e sequência zero.

Com uma LT simples sem *shunt*, porém com 100 km de extensão, visto pelo terminal S, o usuário pode verificar os valores de corrente na Figura 64. Caso seja necessário, o usuário poderá trocar a relação de transformação do TC como uma alternativa.

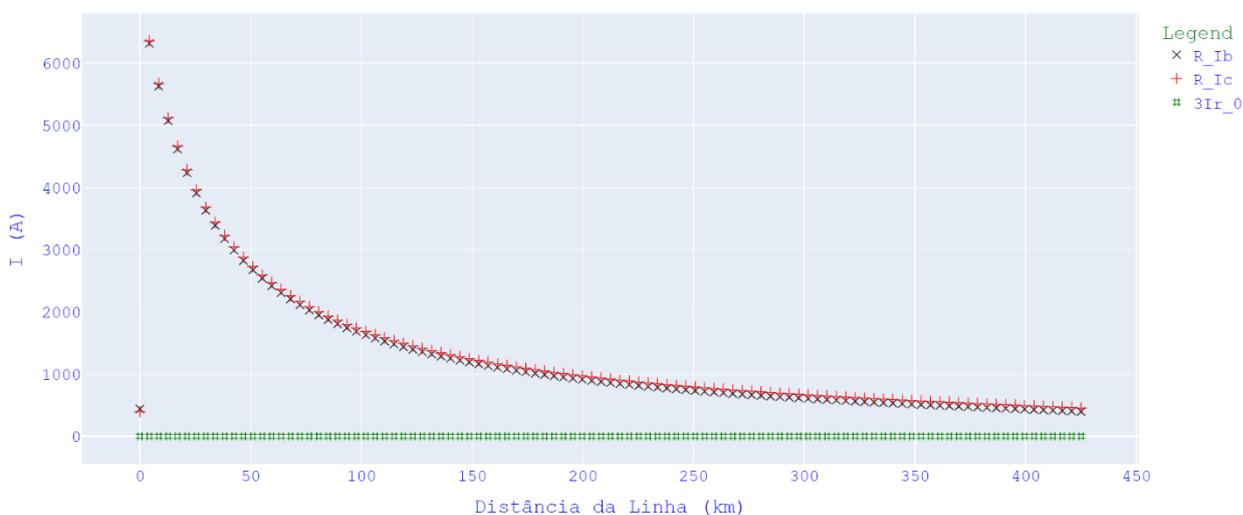
**Figura 64 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens**  
Correntes x Distância da Falta



Fonte: Autoria própria (2023).

Na simulação de faltas bifásicas com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 425 km de extensão, observado pelo terminal R, os valores de correntes são mostrados na Figura 65.

**Figura 65 – Gráfico correntes – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens**  
Correntes x Distância da Falta

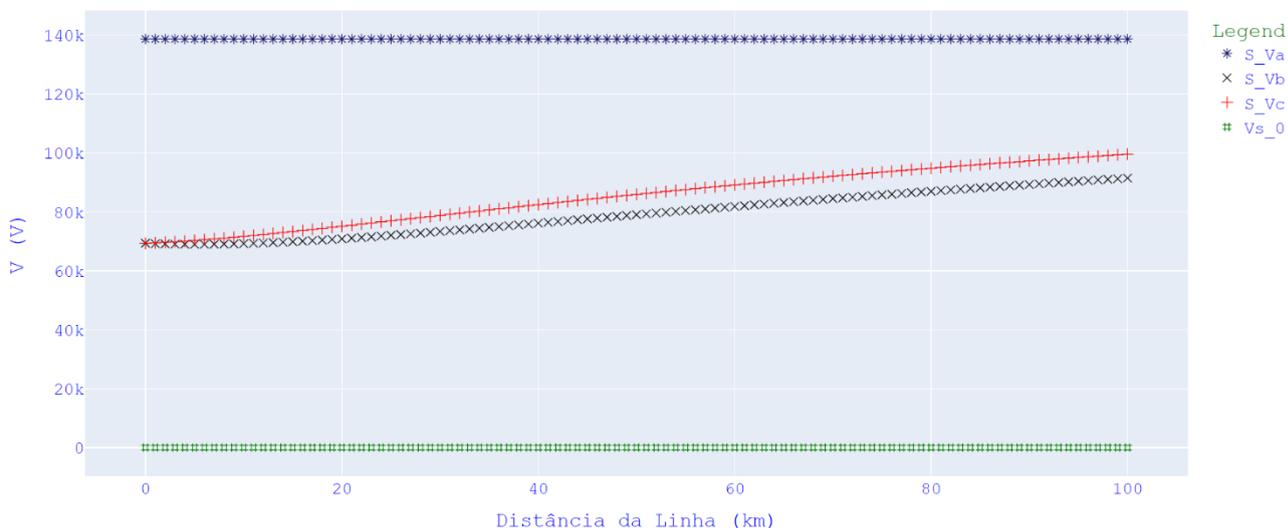


Fonte: Autoria própria (2023).

Em faltas bifásicas segue os mesmos parâmetros de tensão que para faltas monofásicas, sendo polarização e sensor de mínima tensão.

A simulação com uma LT simples sem *shunt*, porém com 100 km de extensão, visto pelo terminal S, o usuário pode verificar os valores de tensões na Figura 66.

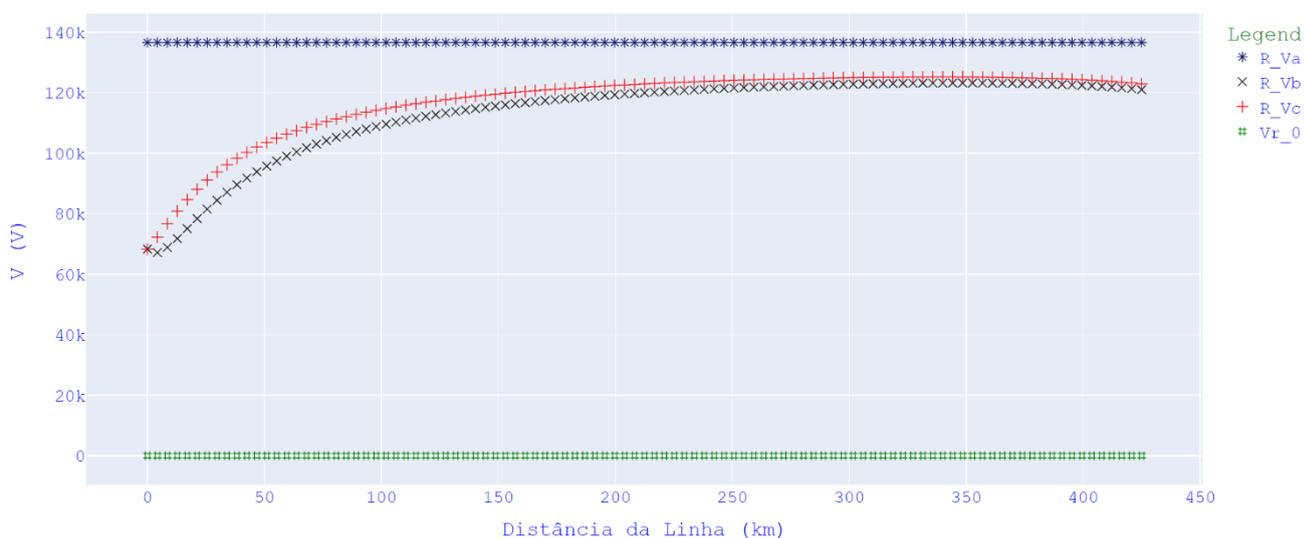
**Figura 66 – Gráfico tensões – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens**  
Tensões x Distância da Falta



Fonte: Autoria própria (2023).

Na simulação de faltas bifásicas com LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, com 425 km de extensão, observado pelo terminal R, o usuário pode verificar os valores de tensão conforme a Figura 67.

**Figura 67 – Gráfico tensões – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens**  
Tensões x Distância da Falta



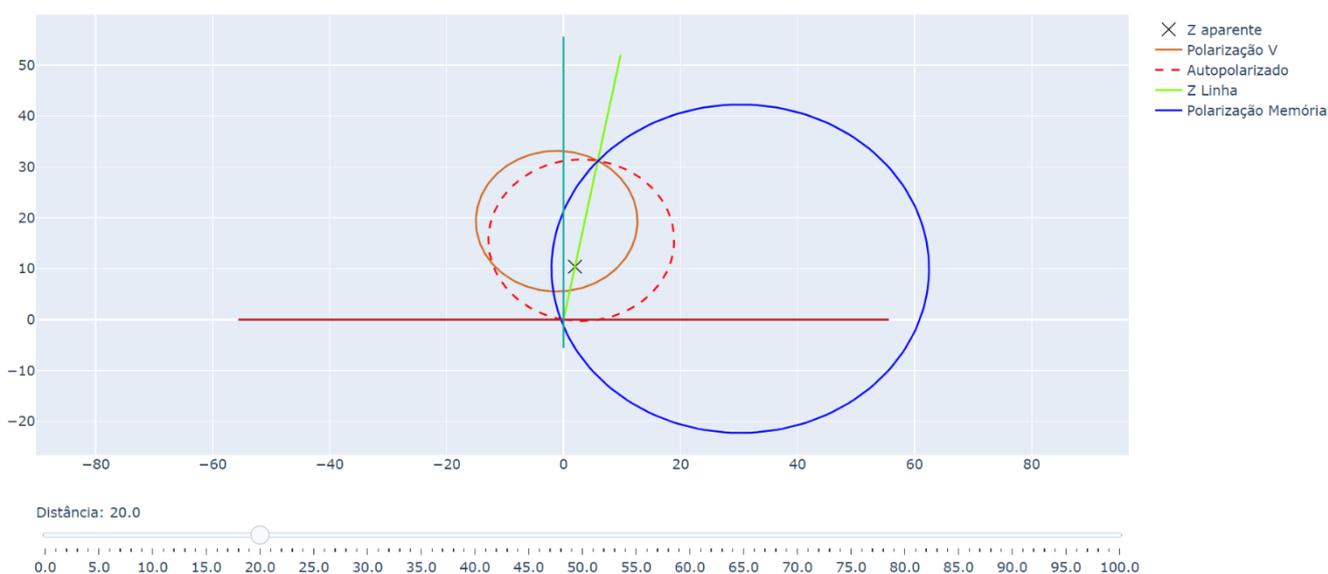
Fonte: Autoria própria (2023).

Da mesma maneira que para faltas monofásicas, as polarizações podem ser de memória ou cruzada. Os fatores  $K_{source}$  e  $K_{cross}$  também são aplicados para estes tipos de falta.

Com um alcance de 60% para uma LT simples sem *shunt*, 100 km de extensão, visto pelo terminal S, no quilômetro 20, utilizando tensão de polarização memorizada, obtém-se a Figura 68, o usuário pode verificar que a falta atendeu os requisitos e está dentro da região. Caso não atendesse, uma solução para o usuário final seria analisar o fator  $K_{source}$ .

**Figura 68 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens**

Gráfico MHO 7SJ86 SIEMENS - TERMINAL S

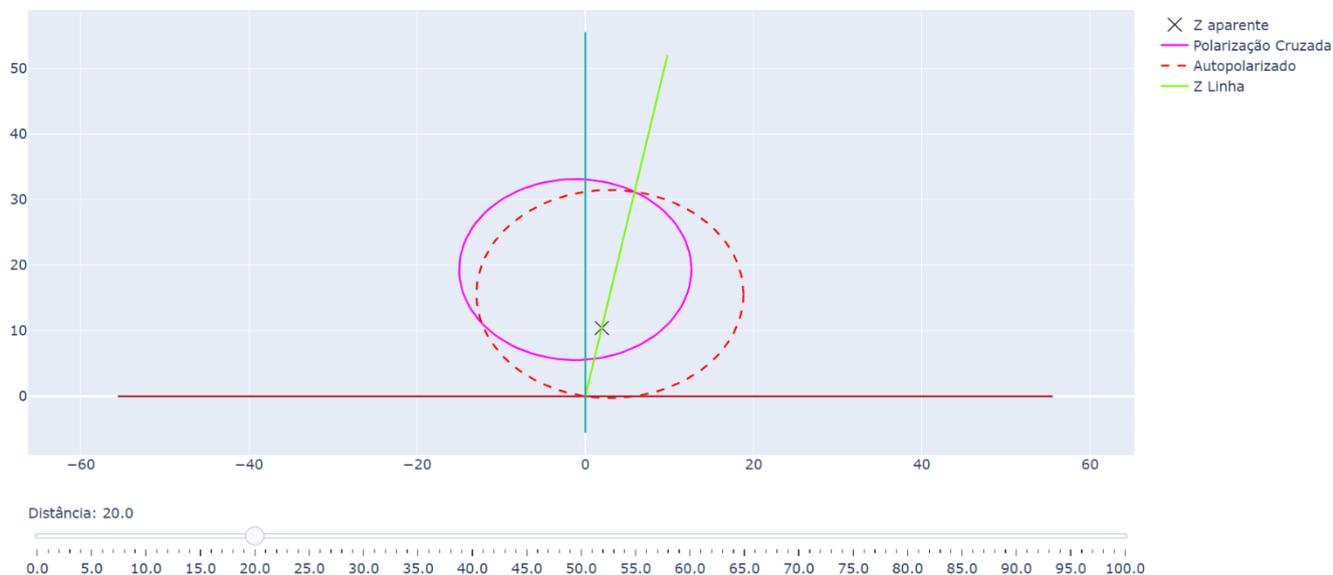


Fonte: Autoria própria (2023).

Mantendo os parâmetros da mesma linha, através da polarização cruzada encontra-se o gráfico da Figura 69, onde está dentro da zona de proteção, portanto, atende o requisito. Caso não atendesse, uma solução para o usuário final seria analisar o fator  $K_{cross}$ .

**Figura 69 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal S – 100 km – Siemens**

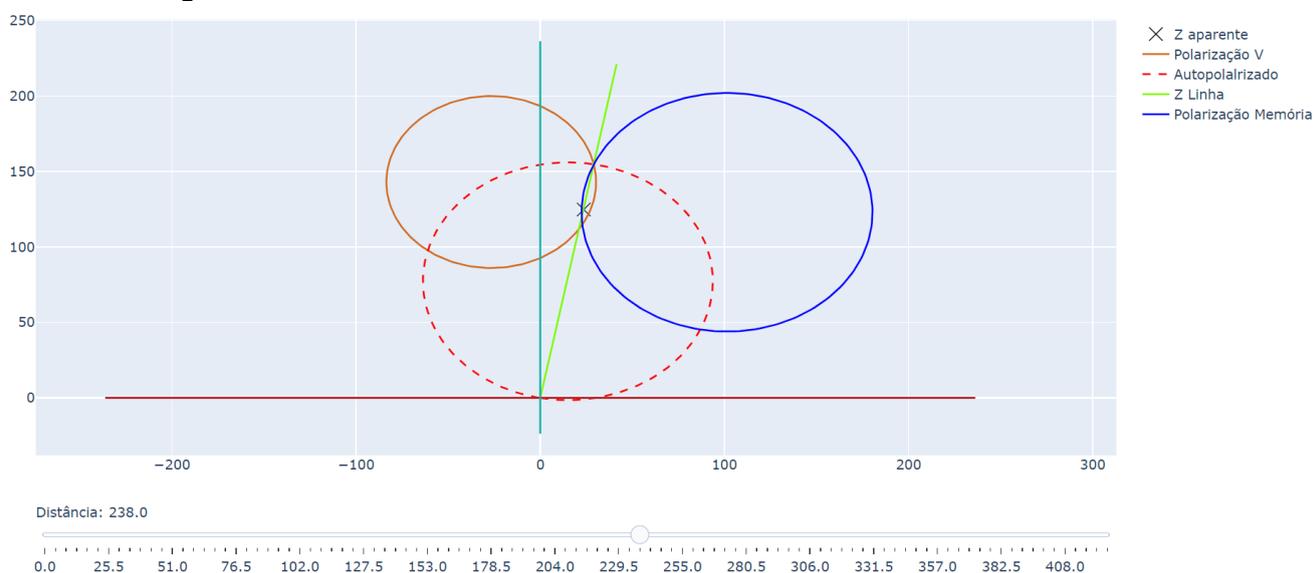
Gráfico MHO CRUZADO 7S386 SIEMENS - TERMINAL S



Fonte: Autoria própria (2023).

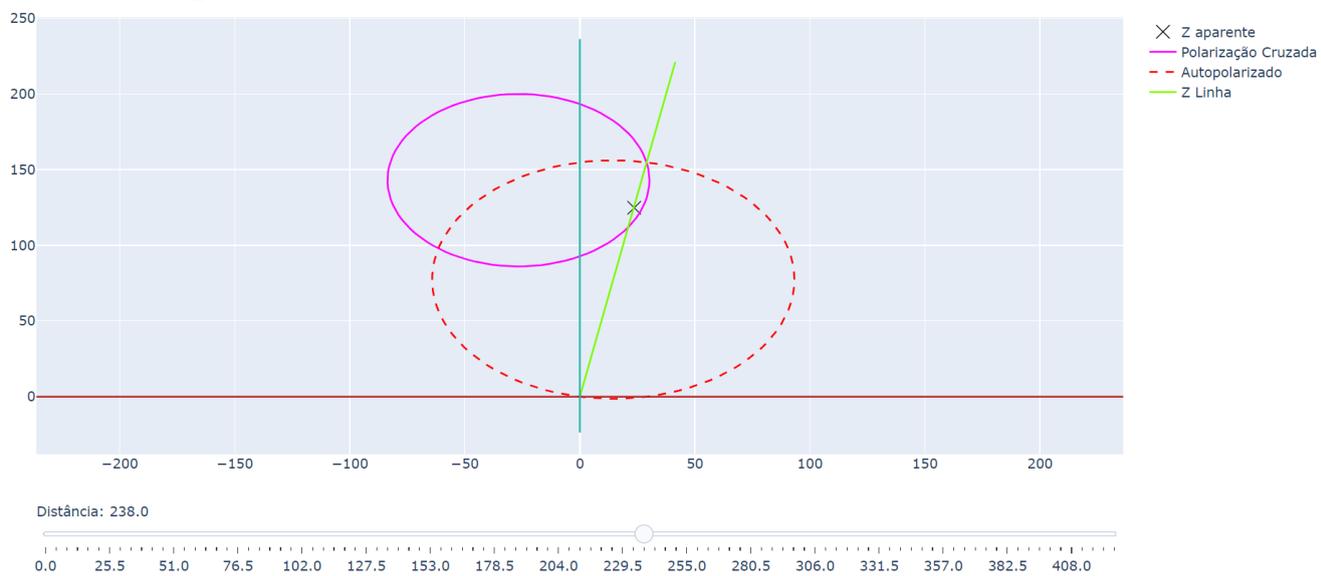
Simulando LTs paralelas com *shunt* em ambas as linhas nos dois terminais, 425 km de extensão, alcance de 70 %, visto pelo terminal R, na distância 238 km, utilizando tensão de polarização memorizada, com base na Figura 70 o usuário pode verificar que a falta atendeu os requisitos e está dentro da região.

**Figura 70 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens**



Fonte: Autoria própria (2023).

Empregando a mesma configuração de LT, utilizando a polarização cruzada conforme Figura 71, em que está dentro da zona de proteção, atende o requisito.

**Figura 71 – Gráfico MHO – Falta BC – Terminal R – 425 km – Siemens**

Fonte: Autoria própria (2023).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi desenvolvido para auxiliar estudantes e profissionais da área de proteção, ampliando uma ferramenta com uma nova função que é de distância (21), sendo possível entender a importância de cada ajuste e conseguir verificar de uma maneira mais visual o impacto de cada ajuste, para cada LT e de diferentes fabricantes de relés comerciais.

O trabalho foi baseado em principais referências bibliográficas da área, bem como a busca de informações em manuais e até mesmo contato com a engenharia de aplicação de fabricante de relés. Há muita dificuldade no mercado para entender as informações sobre a função, como linguagem dificultosa, voltada a profissionais da área, não havendo muitas informações de como o algoritmo do relé se comporta, sendo um desafio para o profissional entender e interpretar. Neste contexto a ferramenta já traz informações mais acessíveis ao usuário.

Com as informações coletadas dos fabricantes de relés foi possível observar que há diferenças entre eles, sendo um desafio para o profissional e até mesmo para o desenvolvimento do aplicativo, visto que o algoritmo é diferente entre eles para a mesma função.

A linguagem Python foi escolhida, pois a ferramenta já estava desenvolvida nesta linguagem. Esta linguagem é aberta e vem sendo muito aplicada. Foram utilizadas bibliotecas como `plotly` que auxilia na execução de gráficos, porém houve grandes dificuldades para realizar um gráfico dinâmico sendo atualizado de acordo com ações do usuário, que é a troca da distância, para simular cada ponto de falta.

Com a execução dos diferentes tipos de faltas para fabricantes distintos, é possível verificar a disposição de gráficos, que facilita análises, comportamento de faltas em regime permanente, auxiliando, assim, profissionais e estudantes. Há intenção do trabalho é dar subsídios para tomar decisões, interpretar dados e entender comportamentos conforme simulações exemplificadas no Capítulo 4.

Este trabalho de conclusão de curso se limitou a característica MHO, não sendo aplicado para utilização de curvas quadrilaterais.

O objetivo do trabalho foi alcançado, inserindo uma nova função para o aplicativo, gerando oportunidades para a ampliação desta função e melhorias da

ferramenta, colaborando para utilização em meios acadêmicos e até para profissionais da área de proteção.

Com este trabalho é possível analisar os gráficos, verificando se os componentes do sistema como tensão e corrente irão atender o mínimo necessário para atuação do relé, apresentar regiões de proteção e o ponto de falta por distância.

## **5.2 TRABALHOS FUTUROS**

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi constatado a possibilidade de melhorias e incrementação para esta ferramenta, por essa razão, aqui estão algumas sugestões para melhoria deste trabalho:

- Inclusão de curvas quadrilaterais para função de distância;
- Inclusão de seletor de fases
- Inclusão de mais fabricantes de relés;
- Ampliar o sistema e inserir novos equipamentos como transformador;
- Inclusão de novas funções;
- Interface gráfica para usuário.

## REFERÊNCIAS

EPE (Empresa de Pesquisa Energética), **abcdenergia - Eficiência Energética**.

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>. Acesso em: 15 de maio 2022

ONS (Operador Nacional do Sistema), **Atuação**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/atuacao>. Acesso em: 15 de maio 2022

CGTI (Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação); DALLBELLO, A.C.; CEMAT; SILVEIRA, P. M.; PARENTONI, M. F.C.; ADAMI, J.F.; UNIFEI; **Análise de Sinais Provocados por Defeitos em Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Telecomunicação e Processamento de Sinais**. 2016. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/Ana%CC%81lise-de-Sinais-Provocados-por-Defeitos-em-nLinhas-de-Transmissao%CC%83o-Utilizando-Te%CC%81nicas-de-Telecomunicac%CC%A7a%CC%83o-e-Processamento-de-Sinais.pdf>. Acesso em: 12 de junho 2022

EPE (Empresa de Pesquisa Energética), **Desafios da Transmissão no Longo Prazo**. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Desafios%20da%20Transmissao.pdf>. Acesso em: 16 de Junho 2022

ONS (Operador Nacional do Sistema), **Indicadores de desempenho do SIN número de perturbações ocorridas na rede básica**. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento-paineis.aspx>. Acesso em: 16/06/2022

KINDERMANN G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Volume 1, 2ª Edição, Edição do autor, Florianópolis, 2005.

KINDERMANN G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Volume 2, 3ª Edição, Edição do autor, Florianópolis, 2020.

FILHO, J. Mamede; MAMEDE, D. Ribeiro, **Proteção de sistemas elétricos de potência**, 1ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, W.C., **Estudo e avaliação das proteções de linhas de transmissão 500kV da eletrobrás-eletronorte localizadas na subestação de Tucuruí**, UFPA, 2010. Disponível em: <https://www.drb-m.org/protecaosep/7protecaolinhastransmissao500kv.pdf>. Acessado em: 10 de janeiro 2023

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T.; **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**, 2ª edição, EDGARD BLUCHER LDTA, São Paulo, 1992.

Roberts, J.; Guzman, A; Schweitzer III, E. O.; Schweitzer Engineering Laboratories, **Z = V/I Não Faz um Relé de Distância**, 20th Annual Western Protective Relay Conference, apresentado em 1993. Disponível em: <https://selinc.com/api/download/2429/?lang=pt>. Acesso em: 05 de fevereiro 2023

Ziegler, G., **Numerical Distance Protection Principles and Applications**, Second edition, SIEMENS, Erlangen, 2006.

GE (General Electric), **Manual de Instrução GE L90**: Line Current Differential System. GE, versão 8.3x, GE publication code: 1601-0081-AM1, 2022. Disponível em: <https://www.gegridsolutions.com/app/viewfiles.aspx?prod=l90&type=3>. Acesso em: 05 de janeiro 2023

SEL (Schweitzer Engineering Laboratories), **Manual de Instrução SEL-311L**: Line Current Differential Protection and Automation System. SEL, datacode: 20211203 , 2021. Disponível em: <http://www.selinc.com>. Acesso em: 05 de janeiro 2023

SIEMENS, **Manual de Instrução 7SL86**: Distance Protection, Line Differential Protection, and Overcurrent Protection for 3-Pole Tripping 7SA82, 7SD82, 7SL82, 7SA86, 7SD86, 7SL86, 7SJ86. SIEMENS, versão 9.5. 2023. Disponível em: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742413/siprotec-5-7sa82-86-7sd82-86-7sl82-86-7sj86-lineprot-3pol-manual?dti=0&lc=en-BR>. Acesso em: 07 de maio 2023.

MENDES, P. C.; SILVA, E., **Desenvolvimento de programa aplicativo de apoio à configuração da função direcional de sobrecorrente em relés de proteção digitais**. UTFPR, Curitiba, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9829>. Acesso em: 08 de maio 2022

OLIVEIRA, F. A. S.; LIMA, H. L.; SANTOS, L. G.; **Aprimoramento de aplicativo para auxílio à configuração de relés de proteção: adição de linhas paralelas e reatores shunt**. UTFPR, Curitiba, 2020. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26572>. Acesso em: 08 de maio 2022

IEEE STD. C37.2 - 2008. **IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations**. [s.l.] IEEE, 2008.

## ANEXO A – DESCRIÇÃO FUNÇÕES E DISPOSITIVOS

Para as funções e dispositivos no sistema são utilizados números, padronizados conforme norma IEEE Std C37.2 (*IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*). A lista a seguir apresenta as descrições números das funções utilizadas nesse TCC.

Descrição	Número
Relé de distância para faltas fases	21
Relé de distância para faltas a terra	21N
Relé de subtensão	27
Relé de Sobrecorrente Instantânea	50
Relé de Sobrecorrente Instantânea de Neutro	50N
Relé de Sobrecorrente de Emergência	50E
Relé de Sobrecorrente Temporizada	51
Relé de Sobrecorrente Temporizada de Neutro	51N
Disjuntor de corrente alternada	52
Relé de sobretensão	59
Relé direcional de sobrecorrente	67
Relé direcional de sobrecorrente de Neutro	67N
Relé receptor de sinal de telecomunicação (teleproteção)	85
Relé de proteção diferencial de Linha	87L