



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ÍCARO CUNHA FARIAS DA SILVA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE RELÉ DE DISTÂNCIA PARA PROTEÇÃO DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO EM ALTA TENSÃO**

**FORTALEZA**

**2024**

ÍCARO CUNHA FARIAS DA SILVA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE RELÉ DE DISTÂNCIA PARA PROTEÇÃO DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO EM ALTA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientadora: Eng. Me. Karol Damasceno Cysne

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S584a Silva, Ícaro Cunha Farias da.  
Análise do desempenho de relé de distância para proteção de linhas de transmissão em alta tensão / Ícaro Cunha Farias da Silva. – 2024.  
58 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.  
Coorientação: Profa. Ma. Karol Damasceno Cysne.

1. Relé de distância. 2. Polarização por memória de tensão. 3. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 4. MATLAB. 5. Simulink. I. Título.

CDD 621.3

---

ÍCARO CUNHA FARIAS DA SILVA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE RELÉ DE DISTÂNCIA PARA PROTEÇÃO DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO EM ALTA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Me. Karol Damasceno Cysne (Coorientadora)  
Concessionária Local

---

Profª. Dra. Raquel Cristina Filiagi Gregory  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## RESUMO

A complexidade e a criticidade dos sistemas elétricos tornam a proteção elétrica um aspecto vital para a segurança e a confiabilidade do sistema. Entre os dispositivos de proteção, os relés de distância desempenham um papel crucial na localização e eliminação das faltas, evitando danos ao sistema e aos equipamentos e minimizando interrupções no fornecimento de energia. Entretanto, a atuação do relé de distância pode ser comprometida em situações de faltas próximas ao local de instalação do relé, em que os valores de tensão se tornam extremamente baixos, dificultando o funcionamento dos comparadores de fase do dispositivo e ocasionando seu disparo indevido. Esse cenário desafia a eficácia dos relés de distância na identificação da falta, em particular o relé de distância tipo admitância. Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é analisar o funcionamento do relé de admitância utilizando o *MATLAB-SIMULINK* em diferentes condições de falta, com foco em melhorar sua capacidade de proteção em cenários desafiadores. Para esse desenvolvimento, emprega-se a seguinte estratégia metodológica: (i) levantamento dos dados da linha de transmissão definida para estudo; (ii) dimensionamento dos transformadores de potencial; (iii) determinação dos ajustes das zonas de proteção do relé 21; (iv) implementação dos parâmetros calculados no software *MATLAB-SIMULINK*; e, (v) apresentação dos resultados de avaliação do desempenho do relé. As simulações permitem uma análise detalhada do comportamento das impedâncias a partir das medições de tensões e correntes durante diferentes tipos de curto-circuito, além da avaliação do diagrama R-X, essencial para verificar o alcance das zonas de proteção e a trajetória das impedâncias durante as faltas. Os resultados mostram que a polarização por memória de tensão oferece uma solução alternativa à polarização tradicional, especialmente em curtos-circuitos trifásicos, em que os valores de tensão podem ser muito próximos de zero. No entanto, o estudo também aponta que, em falhas monofásicas, a aplicação da memória de tensão pode ocasionar atuações indevidas do relé em componentes não afetados pela falha. Conclusivamente, o trabalho reforça a importância da polarização por memória de tensão em relés de distância para proteção de linhas curtas, mas destaca a necessidade de um equilíbrio cuidadoso entre sensibilidade e precisão, principalmente ao lidar com diferentes tipos de falhas.

**Palavras-chave:** Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Relé de Distância, Polarização por Memória de Tensão, *MATLAB*, *Simulink*.

## ABSTRACT

The complexity and criticality of electrical systems make electrical protection a vital aspect for the safety and reliability of the system. Among the protection devices, distance relays are crucial in locating and eliminating faults, preventing damage to the system and equipment, and minimizing power supply interruptions. However, the performance of the distance relay can be compromised in situations of faults close to the relay's installation location, where voltage values become extremely low, hindering the functioning of the device's phase comparators and causing false trips. This scenario challenges the effectiveness of distance relays, particularly the admittance-type distance relay. Within this context, the objective of this work is to analyze the performance of the admittance relay using MATLAB-SIMULINK under different fault conditions, focused on enhancing its protective capability in challenging scenarios. The following methodological approach is employed for this development: (i) collection of data from the transmission line defined for study; (ii) dimensioning of potential transformers; (iii) determination of the settings for relay 21 protection zones; (iv) implementation of the parameterized data in MATLAB-SIMULINK; and (v) presentation of the performance evaluation results of the relay. The simulations provide a detailed analysis of impedance behavior based on voltage and current measurements during different types of short circuits, as well as an evaluation of the R-X diagram, essential for verifying the protection zone coverage and impedance trajectory during faults. The results show that memory voltage polarization offers an alternative solution to traditional polarization, especially in three-phase faults, where voltage values can be very close to zero. However, the study also points out that in single-phase faults, the application of memory voltage can result in improper relay actions on components unaffected by the fault. In conclusion, the study reinforces the importance of memory voltage polarization in short-line protection systems. Still, it highlights the need for a careful balance between sensitivity and accuracy, especially when dealing with different types of faults.

**Keywords:** Power System Protection, Distance Relays, Memory Voltage Polarization, MATLAB, Simulink.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 6 – Curvas típicas de perfil de tensão em uma LT sem perdas .....	19
Figura 1 - Transformador de corrente tipo barra associado ao disjuntor.....	20
Figura 2 – Transformador de potencial.....	21
Figura 7 – Princípio de funcionamento de um relé de distância .....	24
Figura 8 – Diagrama R-X .....	25
Figura 9 – Características típicas das zonas da proteção de distância.....	26
Figura 10– Zona de atuação de relés de distância .....	27
Figura 11 – Característica do relé de distância do tipo impedância no plano R-X .....	29
Figura 12 – Gráfico característico do relé de reatância .....	30
Figura 13 – Gráfico característico do relé de admitância .....	31
Figura 14 – Relé de reatância associado ao relé de admitância.....	32
Figura 15 – Característica quadrilateral.....	33
Figura 16 – Característica do relé MHO polarizado por memória de tensão .....	35
Figura 3 - Diagrama de impedância com a presença de resistência de falta .....	36
Figura 4 – Linha de transmissão com presença de <i>infeed</i> intermediário.....	37
Figura 5 – Acoplamento mútuo em linhas paralelas.....	38
Figura 17 – Fluxograma da metodologia.....	40
Figura 18 – Diagrama unifilar da Regional Delmiro Gouveia .....	41
Figura 19 – Simulação de curto-circuito trifásico na subestação Tauape (TAP) utilizando ANAFAS .....	42
Figura 20 – Simulação de curto-circuito monofásico na subestação Tauape (TAP) utilizando ANAFAS .....	43
Figura 21 – Linha de transmissão TAP-ADT simulada via <i>MATLAB-SIMULINK</i> .....	44
Figura 22 – Lógica de atuação do relé MHO implementada em <i>MATLAB-SIMULINK</i> .....	45
Figura 23 – Polarização de sequência positiva implementada em <i>MATLAB-SIMULINK</i> .....	45
Figura 24 – Memória de tensão implementada em <i>MATLAB-SIMULINK</i> .....	46
Figura 25 – Defasagem dos sinais de tensão implementado em <i>MATLAB-SIMULINK</i> .....	47
Figura 26 – Entrada de tensão com memória de tensão implementada em <i>MATLAB-SIMULINK</i> .....	47
Figura 27 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-terra durante curto-circuito monofásico em TAP .....	49
Figura 28 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito	

bifásico em TAP .....	50
Figura 29 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito trifásico em TAP .....	50
Figura 30 – Tensão durante falta trifásica próximo ao barramento TAP .....	51
Figura 31 – Resposta de <i>trip</i> do relé MHO autopolarizado em um curto-circuitotrifásico.....	51
Figura 32 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-terra durante curto-circuito monofásico em TAP .....	52
Figura 33 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito monofásico em TAP .....	53
Figura 34 – Atuação dos relés fase-terra e fase-fase durante curto-circuitomonofásico AT ....	53
Figura 35 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito bifásico em TAP .....	54
Figura 36 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-terra durante curto-circuito bifásico em TAP .....	54
Figura 37 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito trifásico em TAP .....	55
Figura 38 – <i>Trip</i> do relé de fase durante curto-circuitotrifásico ABC.....	55
Figura 39 – Dados da OAP – Informações da LT.....	59
Figura 40 – Dados da OAP – Parâmetros do Relé.....	59
Figura 41 – Cálculo de impedância de sequência positiva e sequência negativa.....	60
Figura 42 – Cálculo da impedância de sequência zero e dimensionamento de TC e TP .....	61
Figura 43 – Cálculo das zonas de proteção do relé de distância e fator de compensação de sequência zero.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da linha de transmissão .....	41
Tabela 2 – Dados de impedância da LT .....	42
Tabela 3 – Dados de impedância na barra ADT .....	42
Tabela 4 – Dados de impedância na barra TAP .....	42
Tabela 5 – Dados de curto-circuito na barra TAP .....	43
Tabela 6 – Parâmetros dos transformadores de instrumentos.....	43
Tabela 7 – Parâmetros das zonas do relé de distância .....	44
Tabela 8 – Validação dos dados com a OAP .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADT	Aldeota
TAP	Tauape
OAP	Ordem de Ajustes da Proteção
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
SIL	<i>Surge Impedance Loading</i>
LT	Linha de Transmissão
SOTF	Energização sob Falta
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
CNLT	Capacidade Nominal da Linha de Transmissão
CCLT	Capacidade Contínua da Linha de Transmissão

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	<i>Objetivo geral</i> .....	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
2.1	LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO.....	17
2.1.1	<i>Potência Natural (SIL)</i> .....	17
2.2	TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS .....	19
2.2.1	<i>Transformador de corrente</i> .....	19
2.2.2	<i>Transformador de potencial</i> .....	20
2.3	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO .....	21
2.3.1	<i>Zonas de Proteção</i> .....	22
2.3.2	<i>Confiabilidade</i> .....	22
2.3.3	<i>Seletividade e Coordenação</i> .....	22
2.3.4	<i>Sensibilidade</i> .....	23
2.4	FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA .....	23
2.4.1	<i>Diagrama R-X</i> .....	24
2.4.2	<i>Zonas de Proteção de Distância</i> .....	25
2.4.2.1	<i>Ajustes para a zona 1</i> .....	25
2.4.2.2	<i>Ajustes para a zona 2</i> .....	26
2.4.2.3	<i>Ajustes para a zona 3</i> .....	26
2.4.2.4	<i>Ajustes para alcance da zona reversa</i> .....	26
2.4.3	<i>Comparadores de amplitude e fase</i> .....	27
2.5	RELÉS DE DISTÂNCIA.....	28
2.5.1	<i>Relé de impedância ou OHM</i> .....	28
2.5.2	<i>Relé de reatância</i> .....	29
2.5.3	<i>Relé de admitância (MHO)</i> .....	30
2.5.4	<i>Relé quadrilateral</i> .....	32
2.6	POLARIZAÇÃO DO RELÉ MHO .....	33
2.6.1	<i>Polarização Cruzada</i> .....	33
2.6.2	<i>Polarização por memória de tensão de sequência positiva</i> .....	34

2.7	INFLUÊNCIAS AO DESEMPENHO DO RELÉ DE DISTÂNCIA.....	35
2.7.1	<i>Resistência de falta</i> .....	35
2.7.2	<i>Corrente de infeed</i> .....	36
2.7.3	<i>Acoplamento mútuo</i> .....	37
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	39
3.1	<b>ABORDAGEM</b> .....	39
3.2	<b>DEFINIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO</b> .....	41
3.3	<b>MEMORIAL DE CÁLCULO</b> .....	43
3.4	<b>IMPLEMENTAÇÃO NO PROGRAMA <i>MATLAB-SIMULINK</i></b> .....	44
3.4.1	<i>Relé MHO autopolarizado</i> .....	44
3.4.2	<i>Relé MHO com memória de tensão</i> .....	45
3.5	<b>VALIDAÇÃO COM A ORDEM DE AJUSTES DA PROTEÇÃO</b> .....	47
4	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	49
4.1	<b>DESEMPENHO DA PROTEÇÃO COM POLARIZAÇÃO DE SEQUÊNCIA POSITIVA</b> .....	49
4.2	<b>DESEMPENHO DA PROTEÇÃO COM POLARIZAÇÃO POR MEMÓRIA DE TENSÃO</b> ....	51
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	56
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	57
	<b>ANEXO A – ORDEM DE AJUSTE DE PROTEÇÃO DA SUBESTAÇÃO</b>	
TAUAPE	.....	59
	<b>APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO</b> .....	60

## 1 INTRODUÇÃO

Ao analisar um sistema elétrico de potência, tem-se foco apenas nos elementos mais fundamentais, como geradores, transformadores e a própria linha de transmissão. No entanto, além de tais equipamentos básicos, também se tem demais equipamentos que são tão essenciais quanto. O relé de proteção é um desses equipamentos e sua proteção desempenha um papel importante para garantir a confiabilidade do sistema e deve ser devidamente planejada (DUARTE, 2018).

Segundo Caminha (1997), a proteção por meio de relés tem como função principal promover uma rápida retirada de serviço de um elemento do sistema, quando opera de modo anormal, capaz de provocar danos ou interferir na correta operação do restante do sistema. Além disso, para cumprir sua finalidade os relés devem, dentre outros, ser simples e robustos, de modo a garantir sua confiabilidade, ter alta sensibilidade e poder de discriminação e ser tão rápidos quanto possível.

Dispositivos de proteção de distância são amplamente utilizados em linhas de transmissão, visto que, em oposição aos relés de sobrecorrente, possuem zonas com tempos de atuação bem definidos, facilitando a coordenação com outros relés, e mais precisos, já que utilizam duas grandezas em sua verificação. Relés de distância processam a tensão aplicada em seus terminais e a corrente de defeito que circula no mesmo ponto, resultando na expressão  $V/I$ , permitindo determinar a distância de um trecho qualquer a partir da impedância do condutor utilizado (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

O relé de proteção de distância do tipo admitância possui três modos principais de polarização: autopolarização; polarização cruzada; e polarização por memória de tensão de sequência positiva, sendo a mais comum a autopolarização, utilizados para precisar os limites de operação do dispositivo. O sistema faz uso dos sinais de tensão e corrente provenientes dos transformadores de instrumentos para mensurar a impedância da linha e comparar com os parâmetros do relé de distância do trecho protegido.

No entanto, apesar de ser uma tecnologia muito utilizada, ainda está susceptível a falhas, em função de fatores como deslocamento do ponto de falta calculado e valores de entrada insuficientes para os comparadores. O primeiro sofre influência na impedância aparente vista pelo relé e afeta o cálculo de localização da falta, o que pode acarretar uma atuação ou não-atuação indevida. O último, é impactado pelos níveis de tensão no ponto da falta, em que faltas muito próximas ao relé, como o foco de estudo desse trabalho, podem apresentar níveis

de tensão insuficientes para o funcionamento de seus comparadores, já que em um curto-circuito a tensão no ponto de falta tende a zero e a corrente de falta se eleva de maneira agressiva.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

O objetivo geral deste trabalho é utilizar a ferramenta computacional *MATLAB-SIMULINK* para analisar o comportamento da atuação dos relés de distância, do tipo admitância, instalados em linhas de transmissão de alta tensão.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Avaliar em qual linha de transmissão de alta tensão o estudo de comportamento do relé de admitância será feito;
- Calcular os ajustes das zonas de proteção de distância para a linha de transmissão em estudo;
- Implementar relés de distância tipo MHO no *MATLAB-SIMULINK*;
- Avaliar o comportamento do relé de admitância para diferentes situações de curto-circuito;
- Validar o método alternativo de polarização para uma identificação mais precisa da falta.

## **1.2 Organização do Texto**

Esse texto está organizado da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é abordado sobre a proteção de distância de linhas de transmissão, apresentando inicialmente os fundamentos da proteção, e posteriormente, as unidades de medição de distância e os tipos de polarizações.
- No Capítulo 3 é apresentada a rede elétrica para análise e as metodologias de cálculo para o dimensionamento do relé de proteção e obtenção de resultados.

- O Capítulo 4 é feita a análise de todos os resultados obtidos e discussão desses resultados.
- No Capítulo 5 é apresentada as conclusões deste trabalho, bem como sugestões de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são introduzidos conceitos teóricos fundamentais para a construção desse trabalho. São destacadas as características de um sistema de proteção, bem como seus fundamentos, além de uma compreensão entre as diferentes unidades de proteção de distância, apresentando a metodologia de cálculo de suas zonas de proteção e os ambientes onde são amplamente utilizadas. Por fim, a utilização do relé quadrilateral será mais bem explorada, apresentando sua evolução frente aos modelos anteriores, dificuldades de operação e metodologia de cálculo e aplicação.

### 2.1 Linhas de transmissão de alta tensão

As Linhas de Transmissão de energia elétrica se referem a um conjunto de componentes que incluem estruturas de suporte, cabos condutores e para-raios, isoladores e ferragens, dentre outros, sendo responsáveis pelo transporte eficiente da energia elétrica entre áreas distintas. A delimitação das linhas de transmissão é geralmente dada a partir de dois terminais ditos transmissor (aquele que transmite a energia) e receptor (aquele que recebe a energia). Os tipos mais comuns de linhas de transmissão são:

- Linha aérea em corrente alternada ou corrente contínua com condutores separados por material isolador;
- Linha subterrânea com cabo coaxial com condutor concêntrico;
- Par blindado, formado por dois condutores paralelos, isolados por material dielétrico.

A transmissão de energia elétrica é majoritariamente efetuada por meio de linhas de transmissão aérea. A transmissão subterrânea geralmente é usada em áreas populosas, por conta de seu alto custo de instalação e manutenção (LEÃO, 2018).

#### 2.1.1 Potência Natural (SIL)

Segundo Sivanagaraju; Satyanarayana (2009) a potência natural, conhecida como *Surge Impedance Loading* (SIL) de uma linha de transmissão é a potência entregue para uma linha ideal, ou seja, sem perdas. Uma linha de transmissão produz potência reativa (MVA<sub>r</sub>) devido sua capacitância natural.

A carga natural de uma linha de transmissão é simplesmente a carga em que a

potência reativa consumida é equivalente à produzida. Portanto, as Equações 1 e 2 apresentam os cálculos para determinação da impedância natural:

$$I^2 * X_L = \frac{(V)^2}{X_C} \therefore X_L * X_C = \frac{(V)^2}{I^2} \quad (1)$$

Tem-se então que:

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{2\pi fL}{2\pi fC} \therefore Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

No qual:

$X_L$  = reatância indutiva;

$X_C$  = reatância capacitiva;

$I$  = corrente;

$V$  = tensão da linha energizada;

$L$  = indutância;

$C$  = capacitância;

$Z_0$  = impedância natural.

Assim, tem-se que o resultado da Equação 2 é a impedância natural.

Analisando-se os cálculos para determinação de tensão e corrente da LT, observa-se que na condição de carga natural os módulos de tensão e corrente variam conforme a impedância de surto do sistema. Logo, o cálculo da potência SIL é representado pela Equação 3:

$$SIL = \frac{|V_{nom}|^2}{Z_0} \Rightarrow \begin{cases} SIL_{1\phi} = \frac{|V_{nom(\phi n)}|^2}{Z_0} = SIL_{por\ fase} \\ SIL_{3\phi} = \frac{|V_{nom(\phi\phi)}|^2}{Z_0} \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

SIL = Potência natural;

$V_{nom}$  = Tensão nominal;

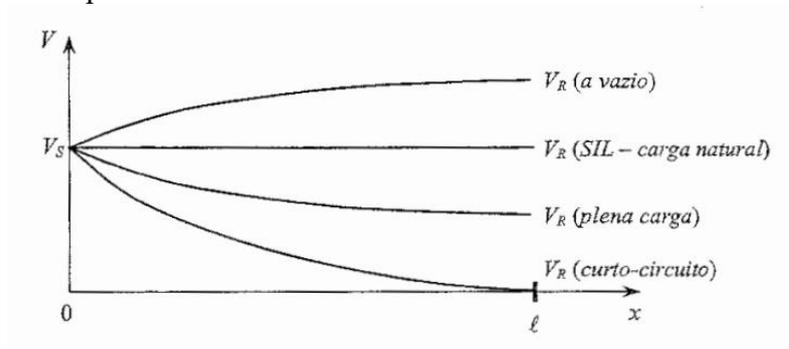
$Z_0$  = impedância natural.

Pereira (2015) aborda que essa análise reflete em diferentes curvas típicas de perfis de tensão de uma linha de transmissão, considerando a tensão do extremo receptor constante, tem-se quatro casos, os quais são apresentados na Figura 1, sendo eles:

- No SIL, a tensão é constante em toda sua extensão;
- Em condições de carga leve ou a vazio, tem-se a presença do efeito Ferranti, ou seja, a tensão no extremo receptor tende a ser maior que a tensão no extremo emissor;
- Para condições de plena carga, onde a tensão no extremo receptor tende a ser menor que a tensão no extremo emissor;
- Em condições de curto-circuito no extremo receptor, o perfil de tensão se ajusta de modo que a tensão vai a zero neste extremo.

A variação de tensão é de forma direta com a variação do comprimento da linha, para maiores comprimentos tem-se maiores variações. Para linhas curtas, as variações são pequenas e é possível se operar a linha com potência de até 3 vezes o SIL. Já para linhas longas, o limite máximo é o SIL, ou no máximo 1,2 vezes o SIL, para se evitar desempenho inadequado na operação das LTs.

Figura 1 – Curvas típicas de perfil de tensão em uma LT sem perdas



Fonte: Pereira (2015).

## 2.2 Transformadores de instrumentos

### 2.2.1 Transformador de corrente

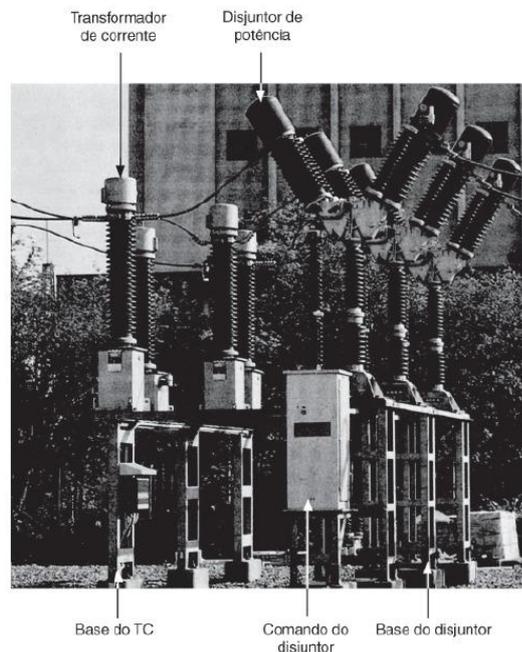
Os transformadores de corrente (TCs) são utilizados para isolar os circuitos de medição do sistema primário de alta tensão e garantem a padronização das correntes nominais dos relés e medidores. Precisam ser capazes de reproduzir correntes até 20 vezes a corrente nominal, de modo a garantir a classe de exatidão determinada pelo fabricante, visto que sua

saturação distorce a corrente de secundário e resulta em um mal funcionamento dos relés de proteção. Sua relação de transformação deve ser selecionada de modo que a corrente no secundário seja próxima 5 A ou 1 A para a corrente máxima de carga (DUARTE, 2018).

Estes equipamentos transformam, por meio de conversão eletromagnética, correntes elevadas que circulam em seu primário, para correntes reduzidas no secundário, seguindo uma relação de transformação.

Segundo Mamede filho; Mamede (2020), os diversos tipos de TCs apresentam diferentes aplicabilidades. A Figura 2 apresenta um TC tipo barra, amplamente utilizados em subestações de potência de média e alta tensão. Além disso, tem-se outros tipos, como: TC tipo janela, utilizado em painéis de comando de baixa tensão, quando não se deseja seccionar o condutor para instalar o TC; TC tipo bucha, com características similares ao primeiro, porém sua instalação é feita na bucha dos equipamentos, os quais funcionam como enrolamentos primários.

Figura 2 - Transformador de corrente tipo barra associado ao disjuntor



Fonte: Mamede Filho; Mamede (2020)

### 2.2.2 Transformador de potencial

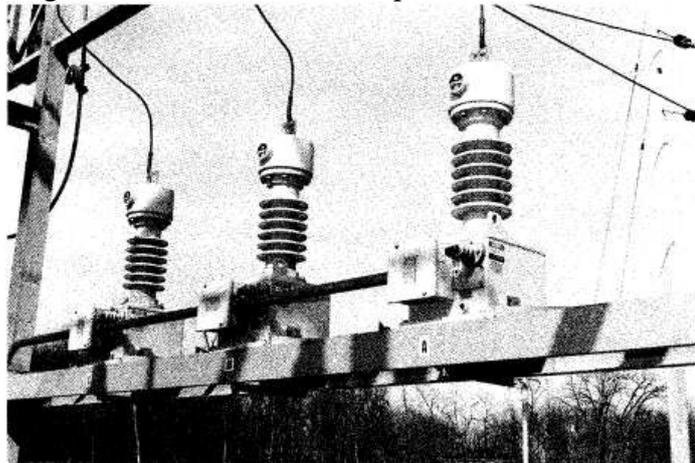
Existem dois tipos distintos de transformadores de potencial utilizados com relés de proteção. Um deles é um transformador similar ao convencional, denominado transformador

de potencial indutivo, e o outro é um transformador de potencial capacitivo. Os TPs capacitivos do tipo acoplamento e tipo bucha, fazem uso de seu divisor capacitivo para reduzir a tensão da linha de transmissão a um nível compatível com os requisitos dos sistemas de medição e proteção (ANDERSON, 1999). A Figura 3 apresenta a aplicação de um TP em um barramento de média tensão.

Na sua forma mais simples, os transformadores de potencial possuem um enrolamento primário de muitas espiras e um enrolamento secundário por meio do qual se obtém a tensão desejada.

Transformadores de potencial são equipamentos utilizados para suprir aparelhos que apresentam elevada impedância, tais como voltímetros, relés de tensão, bobinas de tensão de medidores de energia (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

Figura 3 – Transformador de potencial



Fonte: Glover et al. (2017).

### 2.3 Características básicas de um sistema de proteção

Independentemente de quão bem dimensionado, o sistema de potência nunca estará imune a faltas (PETER RUSH, 2011). Portanto, diante de condições anormais do sistema de energia elétrica, um sistema de proteção adequado deve conseguir proteger as pessoas, a rede elétrica, seus equipamentos e, ao mesmo tempo, iniciar certas ações corretivas. Os sistemas de proteção têm como principal função isolar, no menor tempo possível, a parte do sistema elétrico que apresenta as condições anormais de operação, de forma coordenada e seletiva. Com o advento dos dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) — equipamentos microprocessados utilizados em sistemas elétricos para controlar, monitorar e proteger equipamentos e a rede

elétrica —, além da função principal, o sistema de proteção também pode fornecer dados em tempo real para melhor operar, controlar, gerenciar e testar sua rede elétrica. Em vista disso, algumas características de proteção são aplicadas de modo que o sistema esteja preparado a agir de tal forma, sendo estes:

### ***2.3.1 Zonas de Proteção***

A proteção está estratificada em zonas para delimitar a extensão do sistema que é desconectado. É recomendável a sobreposição dessas zonas de proteção de modo que nenhuma parte do sistema de proteção fique desprotegida.

### ***2.3.2 Confiabilidade***

A confiabilidade está atrelada à probabilidade de que o sistema funcione corretamente na necessidade de sua atuação, a operação incorreta pode ser atribuída a três classificações: dimensionamento incorreto; instalação incorreta e desgaste de utilização (PETER RUSH, 2011).

### ***2.3.3 Seletividade e Coordenação***

A seletividade é a capacidade do sistema de, na ocorrência de uma falta, acionar apenas os equipamentos mais próximos à falta, de modo a isolar a menor área e o mais rápido possível. Tal sistema de disparo é obtida utilizando dois métodos principais, coordenação no tempo e sistema unitário.

A coordenação é utilizada em sistemas de proteção com zonas consecutivas, sendo configurados para operar em tempos coordenados, usualmente na faixa dos 300ms, de modo que, na ocorrência de uma falta, apenas os equipamentos mais próximos à falta atuam e os demais equipamentos atuam somente caso haja a falha deste.

Os sistemas unitários se referem a proteções de atuação específica, como a proteção diferencial, falta restrita a terra, dentre outras. São de atuação rápida visto que não são proteções coordenadas e é independente da gravidade da falta.

### **2.3.4 Sensibilidade**

Sensibilidade refere-se à capacidade do sistema de detectar falhas ou anomalias de pequena magnitude em uma rede elétrica, respondendo de maneira eficaz. Um sistema sensível consegue identificar problemas sutis, garantindo que o problema seja isolado antes de causar maiores danos ou interrupções.

## **2.4 Fundamentos da proteção de distância**

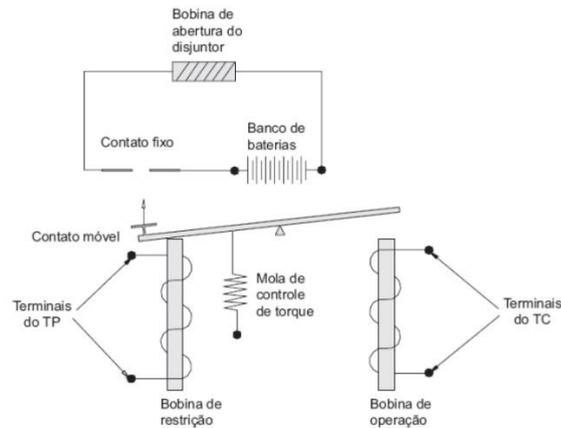
A proteção de distância forma a base para a proteção de redes de transmissão, bem como interconexão entre redes de distribuição. A proteção de distância é mais rápida e mais seletiva do que a proteção de sobrecorrente (GERHARD, 2011).

Os relés de distância processam a tensão aplicada em seus terminais e a corrente de defeito que circula no mesmo ponto, já que essa grandeza permite determinar a distância de um trecho qualquer de um alimentador a partir da impedância unitária do condutor utilizado (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020). Em uma situação na qual a impedância medida se encontre dentro da zona de proteção do relé, este detectará uma falha e atuará. Segundo Gerhard, (2011) os relés de distância são implementados como relés secundários, ou seja, são alimentados com sinais de corrente e tensão do sistema primário por transformadores de instrumento [Transformador de corrente (TC) e Transformador de potencial (TP)], os quais reduzem os níveis de corrente e tensão de modo a garantir uma representação em escala reduzida do comportamento real da rede.

Esta é uma proteção de fácil aplicação e que pode ser utilizada na localização de faltas, além disso pode fornecer funções de retaguarda primária e remota em um único esquema (PETER RUSH, 2011). Seu princípio de funcionamento é formado pela utilização de uma bobina de operação e uma bobina de restrição. Sendo que a bobina de operação está ligada aos terminais secundários do TC e controla a medição do módulo da corrente que circula no sistema, e a bobina de restrição controla a medição do módulo da tensão e está ligada aos terminais do TP.

A Figura 4 apresenta o funcionamento de um relé de distância, em que a força produzida pela bobina de operação supera a força produzida na bobina de restrição o contato móvel conecta a tensão auxiliar da bateria realizando a operação do disjuntor (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

Figura 4 – Princípio de funcionamento de um relé de distância



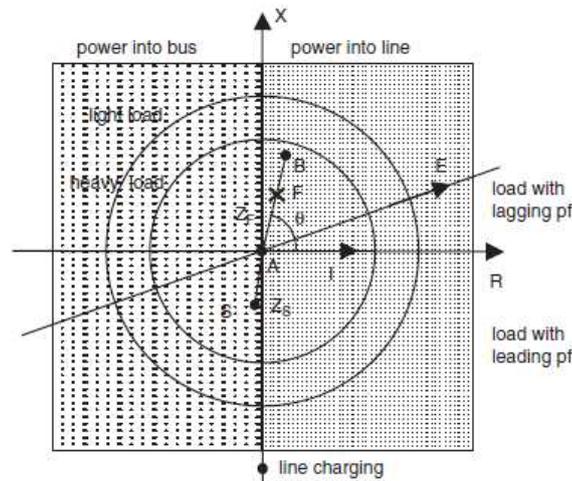
Fonte: Mamede filho; Mamede (2020).

#### 2.4.1 Diagrama R-X

Todos os relés respondem a pelo menos uma entrada quantitativa de produção de torque, para um relé do tipo produto, como é o caso do relé de distância, analisar a resposta do relé para todas as condições é difícil visto que a tensão varia para cada falta ou varia para a mesma falta em diferentes condições do sistema. Com o intuito de resolver essa dificuldade, o uso do diagrama R-X para a análise e visualização da resposta do relé é comum. A utilização desse diagrama é vantajosa por reduzir a quantidade de entradas necessárias para análise, bem como pela possibilidade de representar tanto o relé quanto o sistema no mesmo diagrama (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

A Figura 5 apresenta a composição da impedância vista pelo relé, em que a componente reativa da impedância corresponde ao eixo das abcissas e a componente resistiva corresponde ao eixo das ordenadas, e, que são dadas respectivamente por  $r_r = |Z_r| \cos \theta_r$  e  $x_r = |Z_r| \sin \theta_r$ . Dessa forma, o estudo de tais componentes é fundamental para analisar o comportamento da falta no sistema, bem como a característica de operação do relé.

Figura 5 – Diagrama R-X



Fonte: Horowitz; Phadke (2008).

#### 2.4.2 Zonas de Proteção de Distância

O desempenho do relé está atrelado aos ajustes de suas zonas de proteção e tempos de atuação, os relés eletromecânicos possuem três zonas de proteção, porém relés digitais podem ter até cinco zonas de proteção, com algumas delas configuradas para proteção reversa. A Figura 6 apresenta um relé digital, com a representação das três zonas de atuação e a diferença de tempo entre elas. Neste tópico será tratado principalmente a lógica de ajuste das três zonas diretas, bem como um panorama do que é considerado para a zona de retaguarda.

Segundo Kindermann (2005), a proteção deve considerar três pontos:

- Necessário existir superposição das zonas de atuação dos relés;
- Cada disjuntor esteja contido em pelo menos duas zonas de atuação dos relés;
- Sempre entre cada conjunto de equipamentos deve existir pelo menos um disjuntor.

##### 2.4.2.1 Ajustes para a zona 1

Normalmente relés de distância possuem um ajuste para a primeira zona de 80% da linha protegida, isso porque a partir desse ponto são observados erros na atuação do relé para uma falta mais distante. Essa margem garante que erros nos equipamentos e imprecisões em ajustes e medições não afetem o comportamento do sistema. Os 20% restantes são cobertos pela segunda zona com um tempo de atuação mais lento de modo a garantir a coordenação.

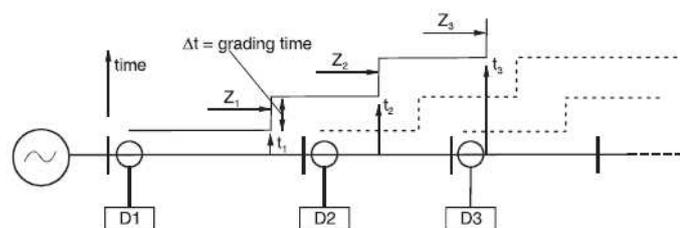
### 2.4.2.2 Ajustes para a zona 2

Para os ajustes da segunda zona existem duas práticas amplamente consideradas em sua determinação, a primeira delas é um alcance de, no mínimo, 120% da impedância da linha protegida, suprimindo a fração da linha desprotegida pela zona 1 e garantindo uma certa proteção da linha adjacente, e, também, existe a possibilidade de ajustar o alcance considerando toda a extensão da linha protegida, acrescido de 50% da linha adjacente mais curta. Essa metodologia busca remover a necessidade de ajustar o tempo de atuação com os relés a montante e a jusante. O tempo de atuação para a segunda zona dos relés é na faixa de 400ms.

### 2.4.2.3 Ajustes para a zona 3

Já para os ajustes da terceira zona, é necessário considerar a seletividade da proteção, portanto, seu tempo de atuação deve levar em consideração o tempo de atuação da segunda zona e do disjuntor adjacente. Normalmente, para o tempo de atuação da terceira zona é utilizado um valor de 800ms. Além disso, o alcance dessa zona é ajustado com um foco na proteção remota de linhas adjacentes, portanto, é considerado uma proteção de 120% acrescido à totalidade da linha protegida.

Figura 6 – Características típicas das zonas da proteção de distância



Fonte: Gerhard (2011).

### 2.4.2.4 Ajustes para alcance da zona reversa.

Relés digitais podem possuir uma zona extra, além das três zonas contidas em relés eletromecânicos, que normalmente é configurada para a proteção da zona reversa. Esta zona tem um alcance de 25% do alcance da zona 1 e tem um tempo de atuação instantâneo. Uma das vantagens da presença desta zona é a proteção para faltas próximas ao relé e faltas com impedância zero. Tal zona também pode proporcionar uma proteção de manobra sobre a falta



## 2.5 Relés de distância

Existem vários tipos de relés de distância com características operacionais diferentes adequadas à determinadas aplicações, dando origem à família dos relés de distância. A aplicação de um ou outro relé de distância está condicionada à característica do sistema no qual irá operar (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

### 2.5.1 Relé de impedância ou OHM

Um relé de impedância é constituído de várias partes, sendo elas: unidade de partida, três unidades de medida de impedância reguláveis independentemente, unidade de temporização e unidades auxiliares (CAMINHA, 1997).

Como apresentado na Figura 4, o esquemático de funcionamento do relé 21 consta de duas bobinas conectadas aos terminais do TC e do TP do sistema além de uma mola de controle de torque, no qual o torque operacional é proporcional a  $|I|^2$  e o torque de restrição é proporcional a  $|V|^2$ . Em vista disso, as Equações 4, 5 e 6 indicam a lógica de funcionamento do relé:

$$k_1 * |I|^2 > k_2 * |V|^2 \quad (4)$$

Onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes proporcionais.

Dessa forma, tem-se que:

$$\frac{|V|}{|I|} < \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \quad (5)$$

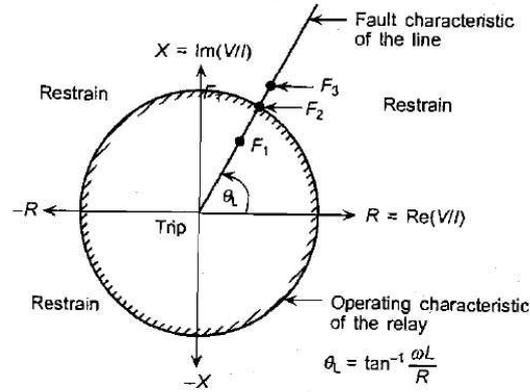
Ou seja,

$$Z_{aparente} < Z_{relé} \quad (6)$$

Segundo Paithankar; Bhide, (2007), a característica de *trip* de um relé de impedância engloba uma área muito grande no plano R-X, o que aumenta a possibilidade de operações indevidas do relé. A Figura 8 traz uma representação da zona do relé de impedância, em que se

pode observar que sua zona de operação é composta por todo o lado direito do círculo.

Figura 8 – Característica do relé de distância do tipo impedância no plano R-X



Fonte: Paithankar; Bhide (2007).

### 2.5.2 Relé de reatância

É um relé que opera somente pela sensibilidade à reatância do sistema. O detalhamento de sua lógica de funcionamento é apresentado nas Equações 7, 8, 9, 10 e 11:

$$C = K_1 * I^2 - K_2 * V * I * \cos(\theta - T) - K_3 \quad (7)$$

Para  $T=90^\circ$ , tem-se que:

$$C = K_1 * I^2 - K_2 * V * I * \sin\theta - K_3 \quad (8)$$

Na iminência de operação ( $C = 0$ ) e desprezando o efeito da mola ( $K_3 = 0$ ), resulta

$$K_1 * I^2 = K_2 * V * I * \sin\theta \quad (9)$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V}{I} * \sin\theta = Z * \sin\theta = X \quad (10)$$

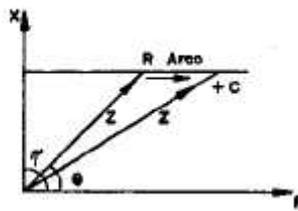
Ou seja,

$$X = \frac{K_1}{K_2} = cte \quad (11)$$

Onde  $K_1$ ,  $K_2$  são constantes proporcionais,  $K_3$  é o efeito da mola,  $V$  é a tensão de operação,  $I$  é a corrente de operação,  $\theta$  é o ângulo direcional,  $T$  é a condição de fabricação do relé e  $X$  é a reatância.

A equação representa no plano R-X uma reta paralela ao eixo dos R, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Gráfico característico do relé de reatância



Fonte: Caminha (1997).

Embora esse relé tenha certas restrições por ser de característica aberta, é diversamente utilizado em vista de sua independência quanto ao valor de resistência de arco. Tal relé terá sensibilidade para qualquer tipo de defeito, independentemente do valor de sua resistência, ao contrário do que ocorre em relés de característica fechada, tipo os relés de impedância. É usual a combinação de características do tipo impedância e admitância, para formar um relé complexo que tira vantagem de ambas as curvas (CAMINHA, 1997).

Devido sua característica aberta, é muito aplicado para proteção de fase em linhas curtas, onde a componente resistiva apresenta maior influência e são necessários considerar os arcos voltaicos.

### 2.5.3 Relé de admitância (MHO)

É caracterizado com um relé de distância com característica direcional. A determinação da impedância é apresentada pelas Equações 12, 13 e 14:

$$C = K_1 * V * I * \cos(\theta - T) - K_2 * V - K_3 \quad (12)$$

Em seu ponto de equilíbrio ( $C = 0$ ) e desprezando o efeito da mola ( $K_3 = 0$ ), resulta

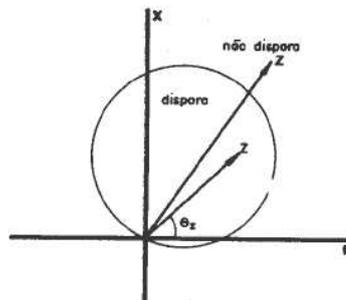
$$K_1 * V * I * \cos(\theta - T) = K_2 * V^2 \quad (13)$$

$$\frac{K_1}{K_2} * \cos(\theta - T) = \frac{V}{I} = Z \quad (14)$$

Onde  $K_1$ ,  $K_2$  são constantes proporcionais,  $K_3$  é o efeito da mola,  $V$  é a tensão de operação,  $I$  é a corrente de operação,  $\theta$  é o ângulo direcional,  $T$  é a condição de fabricação do relé e  $Z$  é a impedância.

Uma outra vantagem deste tipo de relé é sua melhor cobertura a uma possível resistência de arco. Conforme apresentado na Figura 10, o relé está localizado quase que inteiramente no segundo quadrante, isso o torna capaz de ter uma maior sensibilidade às oscilações do sistema. Por outro lado, um dos problemas enfrentados por este relé é sua baixa sensibilidade para falhas curtas, muito próximas a fonte, o que torna a aplicabilidade deste relé mais comuns na proteção de fase de linhas longas (ENGERS DA CRUZ, 2013).

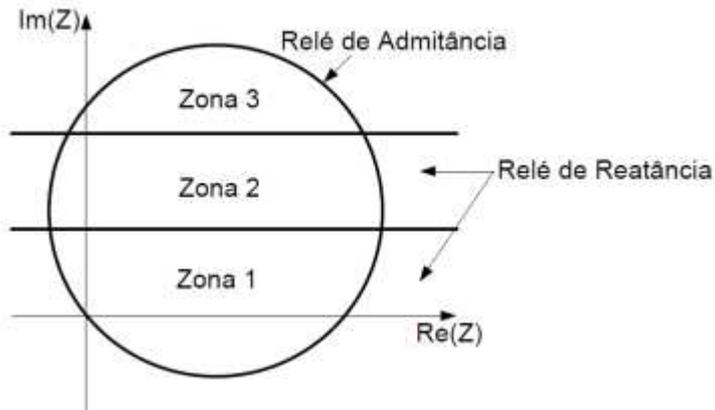
Figura 10 – Gráfico característico do relé de admitância



Fonte: Mello (1979).

A Figura 11 apresenta um método muito utilizado para contornar este problema com a sensibilidade de linhas curtas é a associação de um relé de reatância para a proteção da primeira e segunda zona, com um relé de admitância para proteção da zona subsequente, visto que um supre as falhas do outro.

Figura 11 – Relé de reatância associado ao relé de admitância



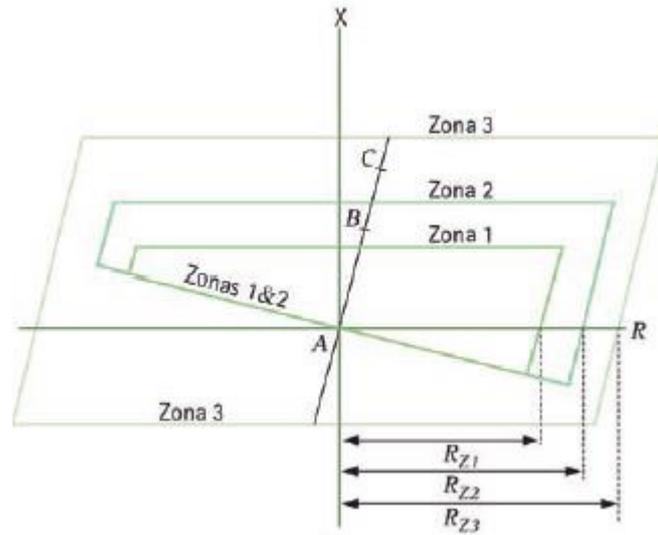
Fonte: Engers da Cruz (2013).

#### 2.5.4 Relé quadrilateral

A característica possui alcance à frente e ajustes de alcance resistivo que são ajustados independentemente. Proporciona melhor cobertura resistiva para linhas curtas que qualquer característica do tipo MHO. Isso é especialmente verdade para medição de impedância de falta a terra, onde a resistência de arco e a resistência de falta para a terra contribuem para aumentar os valores de resistência total da falta (PETER RUSH, 2011).

A característica quadrilateral envolve a combinação de duas unidades direcionais e duas unidades de impedância. Com o suporte da capacidade computacional de relés microprocessados é possível dimensionar uma área operacional bem precisa. Na Figura 12 observa-se que cada zona tem sua componente de resistência determinada de forma independente, essa sua capacidade de controlar livremente suas zonas de operação foi o que tornou o relé quadrilateral o equipamento muito importante para detecção de faltas a terra, e, conseqüentemente, sua resistência de falta.

Figura 12 – Característica quadrilateral



Fonte: Peter Rush (2011).

## 2.6 Polarização do relé MHO

A maior desvantagem ao se usar a tensão para o sinal de polarização é a falta de segurança para faltas com tensão zero. Para essas faltas o sinal de polarização não tem ângulo definido (ROBERTS; GUZMAN; SCHWEITZER, 1994).

O relé faz uso de comparações de ângulos de tensão para determinar se o ponto de falta está dentro de seu alcance. No entanto, para faltas muito próximas, tem-se valores de tensão muito próximos a zero, portanto, o comparador não conseguirá determinar a atuação do relé e não terá a resposta devida.

### 2.6.1 Polarização Cruzada

A polarização cruzada busca aumentar a confiabilidade do relé utilizando os sinais de tensão de fases não afetadas para recriar a relação de fasores necessária para produzir a característica MHO. É então construída uma tensão no local do relé que reproduz uma tensão pré-falta utilizando as tensões não afetadas. A tensão polarizada então, se torna uma associação entre a impedância aparente e a impedância da fonte, supondo que a carga pré-falta seja pequena. (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

No entanto, para casos de falta trifásicas, não existe fase sã, ou seja, não é possível construir uma tensão pré-falta confiável, o que retorna ao mesmo problema enfrentado pelo relé

de distância autopolarizado.

### 2.6.2 Polarização por memória de tensão de sequência positiva

A memória de tensão tem seu funcionamento por meio da alimentação de um circuito de memória que armazena a tensão pré-falta durante alguns ciclos. A tensão de memória apresenta ângulo de fase muito próximo ao ângulo de fase da tensão antes do acontecimento da falta (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Tal feito contorna o problema enfrentado pelos demais métodos de polarização, visto que a não dependência de níveis de tensão durante a falta o torna capaz de atuar, também, durante curto-circuitos trifásicos.

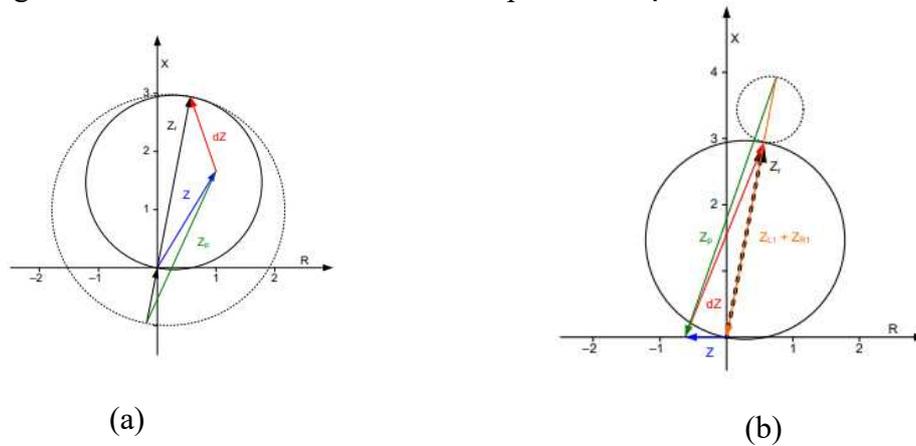
Utilizando a metodologia de polarização por memória de tensão, a tensão de memória pode ser calculada segundo a Equação 15:

$$V_{mem} = \alpha * V_{R1} - (1 - \alpha) * V_{préF} \quad (15)$$

No qual,  $\alpha$  é a constante que envolve o ciclo de memória, quanto menor  $\alpha$  maior será a memória.  $V_{préF}$  é a tensão pré-falta memorizada e  $V_{R1}$  é a tensão de sequência positiva vista pelo relé. A polarização por memória de tensão expande as características do relé tipo MHO para faltas a frente do relé e fornece uma maior cobertura para resistências de falta, além de adaptar as características para evitar sobre-alcance indevido por conta de altos fluxos de carga (HOU; GUZMÁN; ROBERTS, 1998)

No entanto, para faltas reversas, tem-se o comportamento contrário. A corrente de curto-circuito flui pelo relé em direção oposta e conseqüentemente a corrente em relação à tensão é invertida. O relé MHO portanto tem uma contração em sua característica, identificando corretamente o ponto de falta e garantindo sua não operação. A Figura 13 apresenta ambas as situações de dinamismo do relé MHO, tendo sua expansão para uma falta direta e uma retração em caso de falta inversa.

Figura 13 – Característica do relé MHO polarizado por memória de tensão



Fonte: Fentie (2016).

Descrição: (a) falta na direção direta; (b) falta na direção inversa.

## 2.7 Influências ao desempenho do relé de distância

Para a correta operação de um relé de distância é necessário se atentar a diversos fatores que afetam sua operação e desempenho. Isso se deve à alta susceptibilidade do sistema a variações e sua complexidade. Cada variável adicional necessita de uma abordagem diferente para sua solução.

Existem diversos tipos de parâmetros que podem impedir o cálculo preciso da localização de falta, tais modificações podem ser feitas afetando diretamente a impedância ou influenciando a corrente de modo a deslocar o ponto de falta visto pelo relé.

Gerhard (2011) se aprofunda sobre diversas influências que alteram o ponto da falta da medição de distância, dentre elas, pode-se destacar:

- Resistência de Falta
- Corrente de *Infeed*
- Acoplamento mútuo

### 2.7.1 Resistência de falta

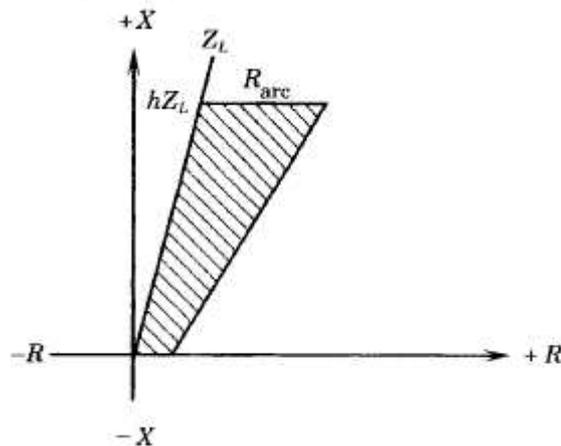
O efeito da resistência de arco, tipicamente a resistência contida na resistência de falta, em relés de distância é deslocar o ponto da falta para a direita no plano da impedância, o que acarreta uma redução do alcance do relé de distância (ANDERSON, 1999). As zonas de proteção possuem suas especificidades de dimensionamento de zonas protegidas, o que será apresentado no capítulo 3. Portanto, durante o dimensionamento dos ajustes da zona de proteção

é necessário inserir a resistência de arco como uma nova variável na equação, de modo que o relé esteja dimensionado para sua influência. A Figura 14 exemplifica um caso de falta a terra, em que se tem uma influência significativa da componente resistiva, deslocando o ponto da falta no eixo da resistência.

A injeção de uma corrente em sentido reverso, proveniente do terminal remoto, amplia ainda mais a resistência de falta, fazendo com que o relé de distância tenha um sobre ou um subalcançe. Um número significativo de faltas envolvendo contato com árvores mostrou que para faltas de alta impedância, os relés de distância são menos sensíveis que relés de sobrecorrente de terra e muitas vezes não respondem corretamente (ELMORE, 2004).

Para acomodar a resistência no espaço da falta, é necessário construir a zona de *trip* do relé de distância de tal maneira que a região em volta da impedância aparente esteja incluída dentro da zona de operação (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Uma alternativa para realizar essa acomodação é a utilização do relé de reatância, visto que possui baixa sensibilidade para resistência, então, para linhas longas, pode-se implementar a associação entre relé de reatância e admitância, como apresentado na seção 2.5.2.

Figura 14 - Diagrama de impedância com a presença de resistência de falta



Fonte: Anderson (1999).

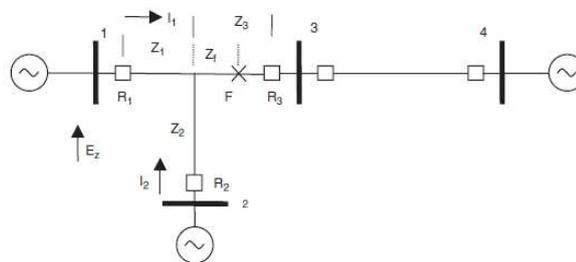
### 2.7.2 Corrente de infeed

Linhas de transmissão podem apresentar derivações intermediárias, podendo ser utilizados tanto para a inserção de uma nova fonte de tensão quanto para conectar uma carga. A corrente de *infeed* se refere a essas derivações, são correntes de linhas adjacentes que

influenciam a componente da corrente vista pelo relé. O acréscimo dessa corrente à corrente de falta, modifica o resultado do cálculo da impedância e atrapalha a medição de corrente pelo relé. A exemplificando um caso de *infeed*.

Figura 15 apresenta uma LT com a inserção de uma nova fonte de tensão intermediária no barramento B, exemplificando um caso de *infeed*.

Figura 15 – Linha de transmissão com presença de *infeed* intermediário



Fonte: Horowitz; Phadke (2008).

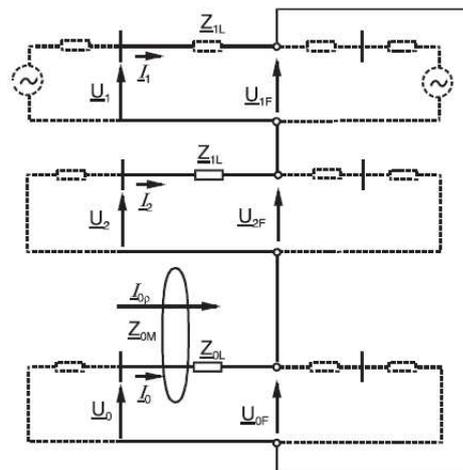
Em situações como esta, na qual há a injeção de diversas componentes de corrente, dada uma falta, existem diferentes formas em que se pode abordar tal problema, uma delas é o disparo sequencial, no qual os disjuntores das fontes adjacentes são disparados um a um, de modo a corrigir o *infeed* presente na linha com presença de falta. O ponto negativo dessa metodologia é o tempo para a atuação da proteção, visto que a necessidade de atuação dos relés adjacentes torna o processo longo. Uma outra metodologia utilizada é a consideração do *infeed* máximo possível durante o dimensionamento do relé, o que fará com que aquele sistema esteja preparado para a injeção adicional.

### 2.7.3 Acoplamento mútuo

Quando linhas de transmissão seguem caminhos paralelos, existe um acoplamento indutivo mútuo dos caminhos percorridos pela corrente. No caso de linhas transpostas, esse efeito na sequência positiva e negativa do sistema pode ser negligenciado. Isso implica que durante condições de carregamento, e para todos os curtos-circuitos entre fases, as linhas podem ser consideradas independentes. Durante faltas a terra, a corrente dos condutores não iguala a zero, mas sim a um valor de corrente equivalente ao somatório da corrente aterrada (GERHARD, 2011).

Tal corrente aterrada induz uma tensão na falta da linha medida e modifica a informação de tensão recebida pelo relé, afetando a identificação do ponto de falta. A Figura 16 demonstra a influência de um fluxo positivo, ou seja, as correntes fluem na mesma direção, e ocorre a medição de uma impedância muito grande, o que faz o relé identificar um ponto de falta além da sua proteção, um subalcance. Já para o caso em que há uma influência negativa, ou seja, os somatórios das correntes fluem em caminhos inversos, há uma medição da impedância menor do que o real, e o relé identifica como um sobre-alcance.

Figura 16 – Acoplamento mútuo em linhas paralelas



Fonte: Gerhard (2011).

Segundo Duarte (2018) as condições que determinam as direções das correntes em linhas mutualmente acopladas podem ser muito complexas, dependendo do próprio acoplamento mútuo, da localização da falta e da topologia do sistema. Alternativas para lidar com esse problema são:

- Ajustes fixos capazes de acomodar diferentes cenários de acoplamento mútuo, no qual, a primeira zona é ajustada para um cenário de subalcance, enquanto a segunda zona deve ser ajustada para um cenário de sobrealcance.
- Ajustes adaptativos a diferentes condições de operação do circuito paralelo (em serviço, fora de serviço e fora de serviço e aterrada), considerando o acoplamento mútuo específico a cada situação. A dificuldade desse método está no dinamismo do estado do circuito paralelo, portanto, as mudanças dos ajustes podem ser lentas em tempo real para se adaptar as mudanças.

### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo trata do estudo do desempenho da proteção de distância em linhas subtransmissão de alta tensão com a utilização do relé de distância tipo MHO (admitância) analisado através de um sistema adaptado no programa *MATLAB* que simula um relé de distância.

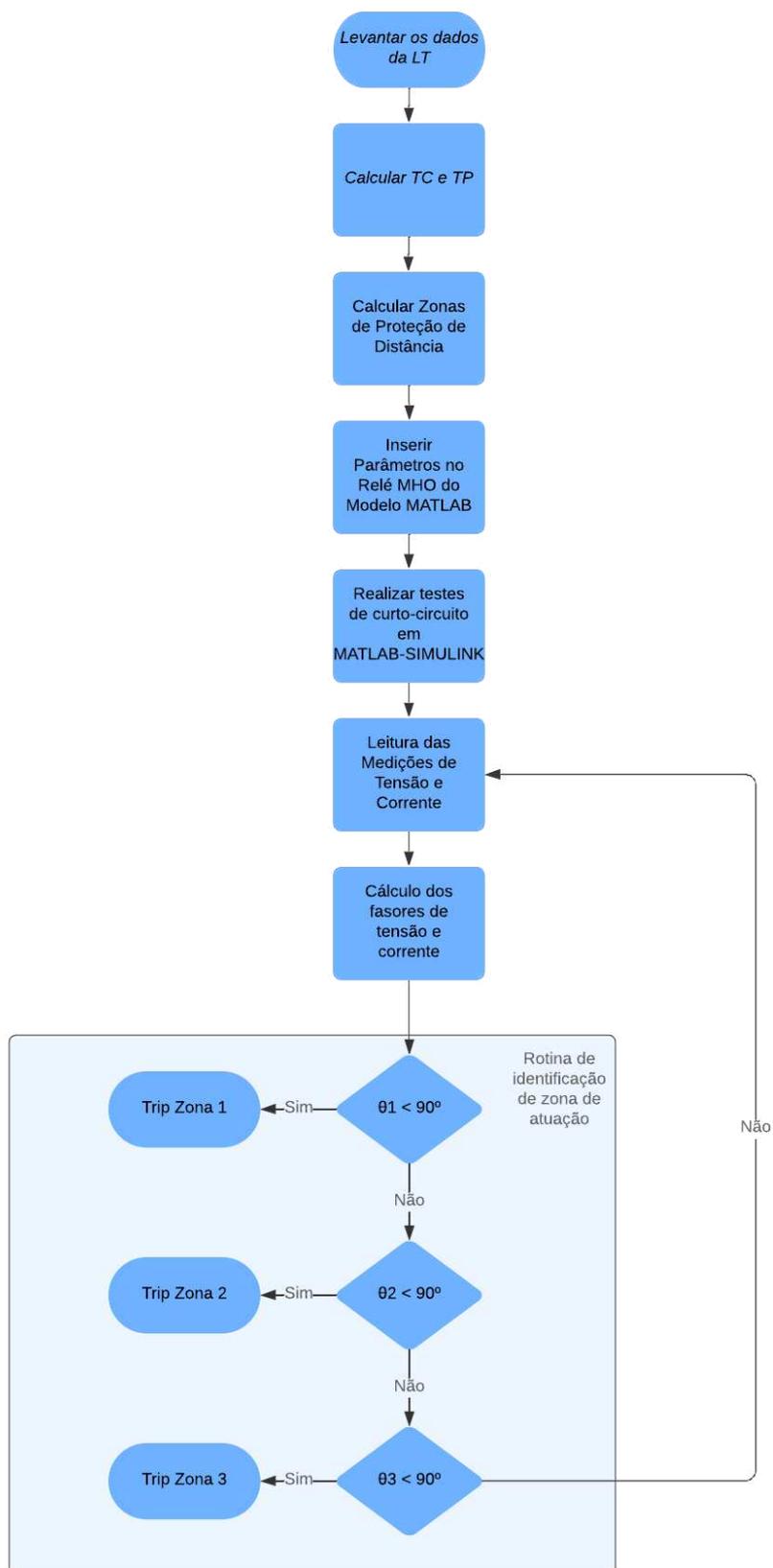
#### 3.1 Abordagem

Nesta seção é apresentada as etapas do estudo do desempenho do relé de distância tipo MHO aplicado em uma linha de subtransmissão curta que abrange as seguintes etapas:

- Definição da linha de transmissão 69 kV para o estudo de caso;
- Levantamento de dados da linha de transmissão, TCs e TPs;
- Cálculos dos ajustes das zonas de proteção do relé 21;
- Implementação dos parâmetros calculados no software *MATLAB-SIMULINK*.

Os dados da linha de subtransmissão levantados, sendo eles os níveis de curto-circuito e valores de impedância da linha, são disponibilizados pela Concessionária Local. Fazendo uso de tais dados, é feito o dimensionamento dos TCs e TPs para a correta atuação do relé. Após dimensionados, os valores dos transformadores de instrumento, bem como os valores de impedância da linha e comprimento da rede são utilizados para a determinação do alcance das zonas de proteção. Em seguida, tais informações são inseridas em um modelo no programa *MATLAB*, para gerar as zonas de proteção e analisar diferentes situações de curto-circuito próximos ao barramento transmissor. A Figura 17 mostra o fluxograma da metodologia utilizada.

Figura 17 – Fluxograma da metodologia

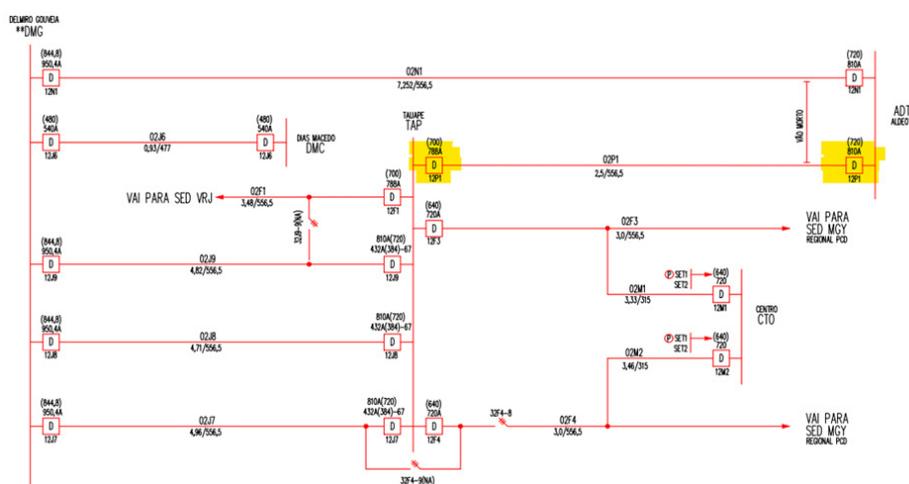


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Definição da Linha de transmissão

O sistema utilizado para estudo presente na Figura 18 se refere a regional elétrica Delmiro Gouveia, na qual é analisado a linha 02P1 de 69 kV que conecta as subestações Tauape (TAP) e Aldeota (ADT). Os pontos demarcados se referem aos dispositivos envolvidos na linha, os quais utilizam relés SEL 411L.

Figura 18 – Diagrama unifilar do Regional Delmiro Gouveia



Fonte: CONCESSIONÁRIA LOCAL (2024).

Apresentam-se nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 as informações da linha de subtransmissão, bem como as impedâncias das subestações, fornecidas pela concessionária de energia elétrica.

Tabela 1 – Dados da linha de transmissão

Linhas de transmissão (LT)	Código	Tensão de isolamento (kV)	Tensão de operação (kV)	Cap. Nomi. LT (CNLT) (MVA)	Cap. Nomi. LT (CNLT) (A)	Cap. Cont. LT (CCLT) (MVA)	Cap. Cont. LT (CCLT) (A)
(9002-9005) TAP/ADT	02P1	72,5	69	79	661,09	90	753,14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Dados de impedância da LT

Linhas de transmissão (LT)	Código	Extensão (km)	Impedâncias e susceptâncias (%)					
			Sequência positiva			Sequência Zero		
			R1	X1	B1	R0	X0	B0
(9002-9005) TAP/ADT	02P1	2,5	0,61	2,25	0,05	1,54	9,22	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Dados de impedância na barra ADT

Impedância de sequência positiva (ohm/km)		Impedância de sequência zero (ohm/km)	
0,8625	5,442	2,1307	26,4437

Fonte: Elaborado pelo autor.

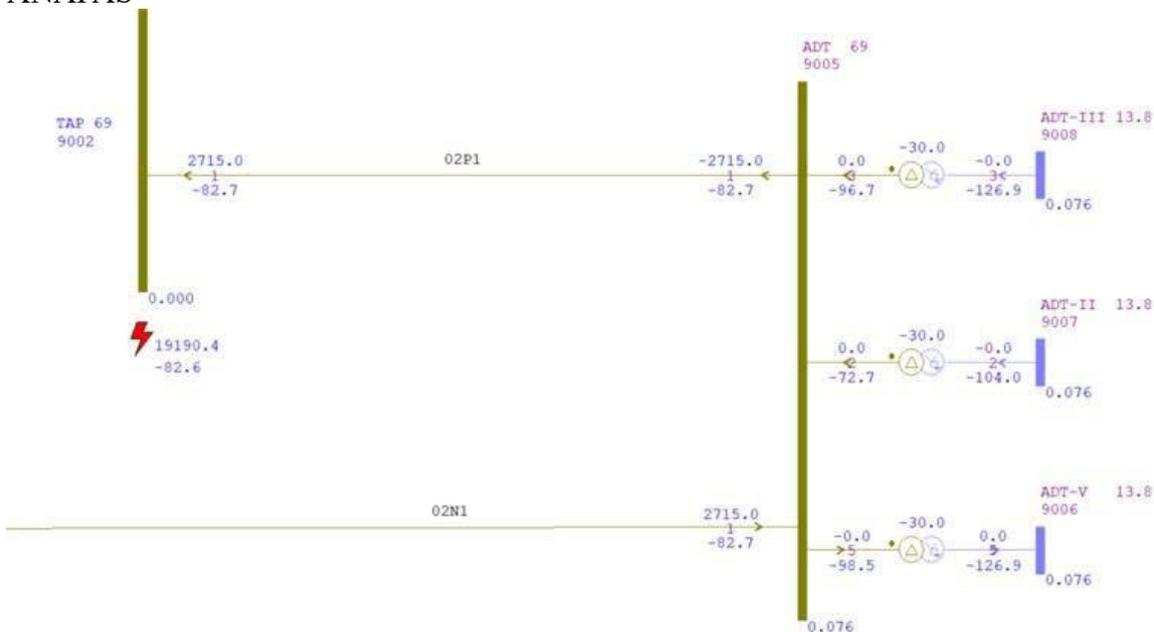
Tabela 4 – Dados de impedância na barra TAP

Impedância de sequência positiva (ohm/km)		Impedância de sequência zero (ohm/km)	
0,5596	4,324	1,3653	21,8643

Fonte: Elaborado pelo autor.

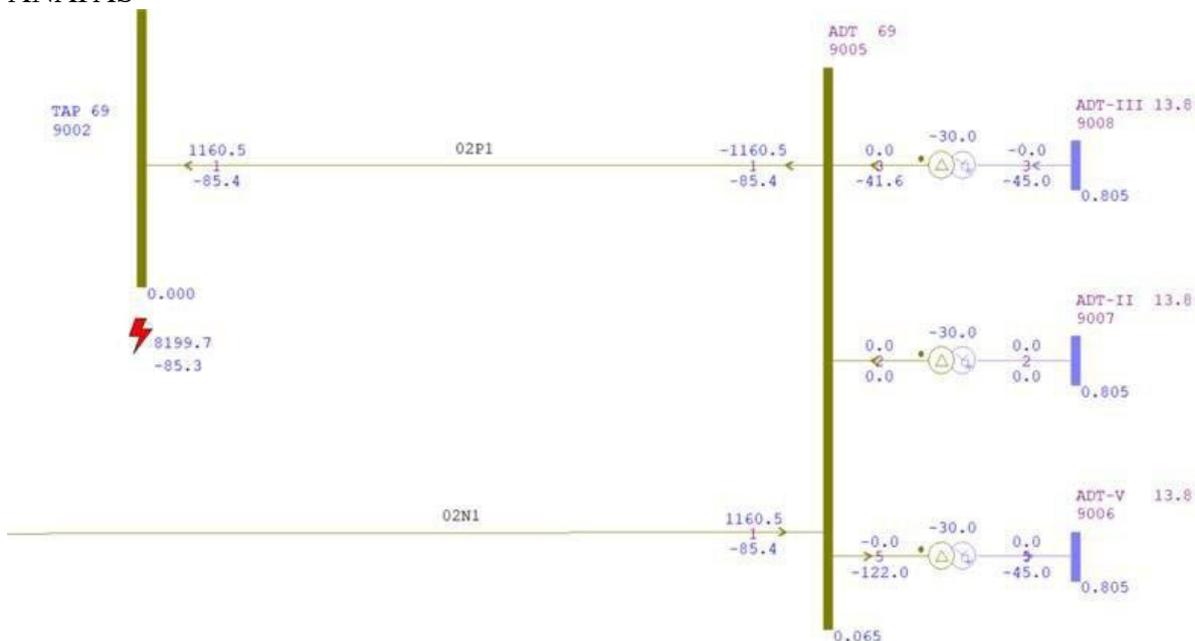
A seguir na Figura 19, tem-se os dados referente ao curto-circuito trifásico na barra Tauape (TAP), bem como os dados de curto-circuito monofásico apresentados na Figura 20, utilizados como foco para o estudo.

Figura 19 – Simulação de curto-circuito trifásico na subestação Tauape (TAP) utilizando ANAFAS



Fonte: CONCESSIONÁRIA LOCAL (2024).

Figura 20 – Simulação de curto-circuito monofásico na subestação Tauape (TAP) utilizando ANAFAS



Fonte: CONCESSIONÁRIA LOCAL (2024).

Consolidando tais dados, tem-se na Tabela 5, os valores de curto-circuito trifásico e monofásico do sistema em estudo.

Tabela 5 – Dados de curto-circuito na barra TAP

Tipo de Curto-Circuito	Magnitude (kA)	Ângulo (graus)
Trifásico	19,2	-82,6
Monofásico	8,2	-85,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Memorial de Cálculo

Os cálculos para parametrização dos TCs e TPs bem como a tratativa dos dados da linha de transmissão e as zonas de atuação do relé são realizados por meio do programa *Mathcad* e são apresentados no APÊNDICE A – Memorial de cálculo. Tem-se na Tabela 6 e na Tabela 7 os dados consolidados a partir dos cálculos.

Tabela 6 – Parâmetros dos transformadores de instrumentos

Tipo de transformador	Primário	Secundário	Relação de Transformação
Corrente	1200	5	240
Potencial	69000	115	600

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Parâmetros das zonas do relé de distância

Ajustes	Magnitude	Ângulo
Zona 1	0,355	74,831
Zona 2	0,533	74,831
K0	1,005	7,569

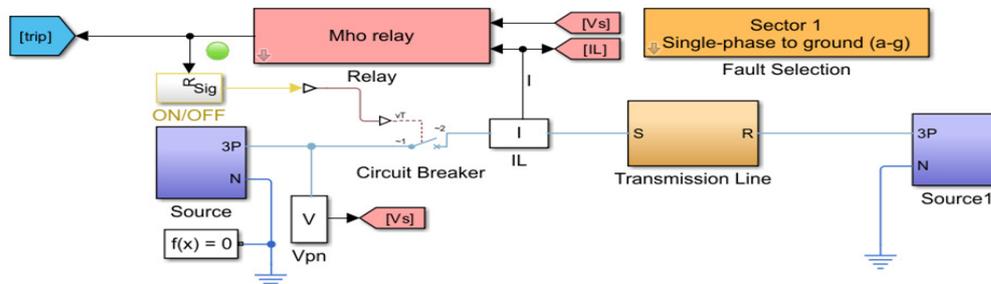
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 Implementação no programa *MATLAB-SIMULINK*

#### 3.4.1 Relé MHO autopolarizado

O modelo para testes é adaptado de um modelo exemplo pré-existente no programa da *MATWORKS*, o qual trata do funcionamento do relé de distância em uma microrede de corrente alternada. Esse modelo é modificado de forma a refletir os aspectos da rede de estudo, com a substituição do bloco de carga por uma fonte de tensão que representa o barramento aldeota e modificação dos parâmetros da linha e das zonas de proteção, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Linha de transmissão TAP-ADT simulada via *MATLAB-SIMULINK*

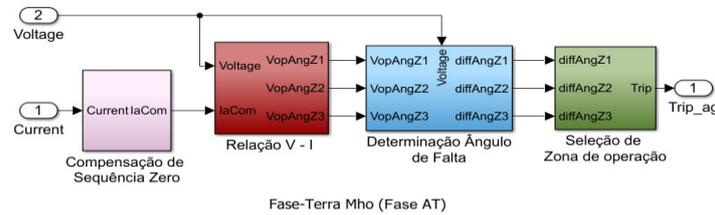


Fonte: Adaptado de Mathworks (2024).

O sistema é composto por uma fonte de tensão de 69kV associada a um disjuntor e medidores de tensão e corrente, os quais suprem o relé MHO autopolarizado, além disso um subsistema contendo os blocos de linha de transmissão e de falta trifásica. Por fim, uma segunda fonte de tensão de 69 kV representando o terminal aldeota.

A Figura 22 apresenta os subsistemas do relé MHO de terra que realizam os cálculos para determinação do *trip*. Os dados de medição de tensão e corrente são injetados no sistema, sendo a corrente tratada de forma a considerar a corrente de sequência zero e o fator de compensação, determina-se então o ângulo de operação, os quais são comparados com o ângulo de tensão de entrada para determinar a zona de atuação do relé e acionar o sinal de *trip*.

Figura 22 – Lógica de atuação do relé MHO implementada em *MATLAB-SIMULINK*



Fonte: Adaptado de Mathworks (2024).

### 3.4.2 Relé MHO com memória de tensão

Segundo Schweitzer (1991), a lógica de implementação da memória de tensão inicia com a obtenção da tensão de sequência positiva, o qual utiliza um fator  $\alpha$  com magnitude 1 e ângulo de  $120^\circ$  e a tensão VA como base de cálculo, fazendo uso dos demais fasores de tensão, seguindo a Equação 16:

$$VA1 = \frac{VA + (\alpha - 1)VB + (\alpha^2 - 1)VC}{3} \quad (16)$$

Em que os coeficientes de VB e VC deslocam a tensão em  $\pm 60$  graus para uma melhor resposta transitória, em vista de um tempo de *delay* menor.

Utiliza-se o bloco *MATLAB Function* para executar o cálculo do filtro de sequência positiva da nossa memória, representado na Figura 23.

Figura 23 – Polarização de sequência positiva implementada em *MATLAB-SIMULINK*

```

DistanceProtection > Relay > Fourier Analysis > Subsystem1 > MATLAB Function
1 function VA1 = calcVA1(VA, VB, VC)
2     % Define a constante 'a' com magnitude 1 e ângulo de 120 graus
3     a = exp(1j * 2 * pi / 3); % Equivalente a e^(j*120°)
4
5     % Calcule VA1 usando a fórmula fornecida
6     VA1 = (VA + (a - 1) * VB + (a^2 - 1) * VC) / 3;
7 end
8

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desse valor é possível implementar a memória de tensão, utilizando

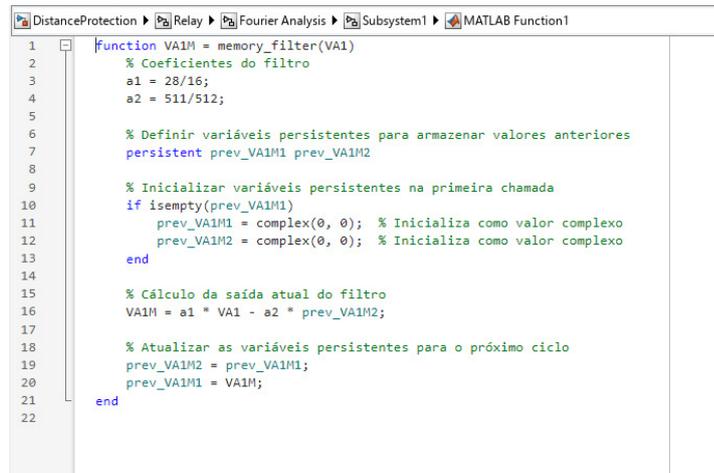
constantes de decaimento para mensurar a parcela atual da tensão filtrada com redução da tensão memorizada a dois ciclos anteriores, demonstrado na Equação 17:

$$VA1M_k = a * VA1_k - b * VA1M_{k-2} \quad (17)$$

Onde  $VA1M_k$  é a tensão de memória no ciclo  $k$ ,  $a$  e  $b$  são constantes de decaimento,  $VA1_k$  é a tensão de sequência positiva no ciclo  $k$  e  $VA1M_{k-2}$  é a tensão de memória no ciclo  $k-2$ .

O filtro avança a tensão de saída em dois passos e a eleva utilizando a constante “ $b$ ” e adiciona a essa informação a parcela da tensão de entrada  $VA1_k$ . A lógica para o cálculo da memória é implementada em outro bloco *MATLAB function*, utilizando como entrada o resultado do cálculo de  $VA1$ , evidenciado na Figura 24.

Figura 24 – Memória de tensão implementada em *MATLAB-SIMULINK*



```

1 function VA1M = memory_filter(VA1)
2 % Coeficientes do filtro
3 a1 = 28/16;
4 a2 = 511/512;
5
6 % Definir variáveis persistentes para armazenar valores anteriores
7 persistent prev_VA1M1 prev_VA1M2
8
9 % Inicializar variáveis persistentes na primeira chamada
10 if isempty(prev_VA1M1)
11     prev_VA1M1 = complex(0, 0); % Inicializa como valor complexo
12     prev_VA1M2 = complex(0, 0); % Inicializa como valor complexo
13 end
14
15 % Cálculo da saída atual do filtro
16 VA1M = a1 * VA1 - a2 * prev_VA1M2;
17
18 % Atualizar as variáveis persistentes para o próximo ciclo
19 prev_VA1M2 = prev_VA1M1;
20 prev_VA1M1 = VA1M;
21 end
22

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o dado já polarizado e aplicado a memória para  $VA1$  é então segmentado para se obter as componentes  $VB$  e  $VC$  da tensão, os quais são multiplicados pela constante  $\alpha$ , sendo  $\alpha^2$  para  $VB$  e  $\alpha$  para  $VC$ , de modo a garantir a defasagem dos sinais, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Defasagem dos sinais de tensão implementado em *MATLAB-SIMULINK*

```

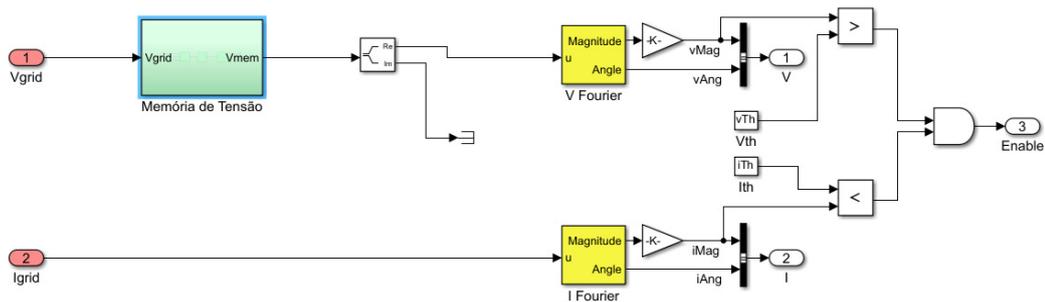
DistanceProtection > Relay > Fourier Analysis > Subsystem1 > MATLAB Function2
1  function [Va, Vb, Vc] = defasagem (VA1M)
2
3  % Define a constante 'a' com magnitude 1 e ângulo de 120 graus
4  a = exp(1j * 2 * pi / 3); % Equivalente a e^(j*120°)
5
6  % Calcule as tensões usando a fórmula fornecida
7  Va = VA1M;
8  Vb = VA1M*a^2;
9  Vc = VA1M*a;
10 end

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A implementação dessa lógica resulta em um subsistema apresentado na Figura 26 o qual condensa esses 3 passos e conecta a fonte de tensão “Vgrid” para iniciar os cálculos de validação da atuação do relé.

Figura 26 – Entrada de tensão com memória de tensão implementada em *MATLAB-SIMULINK*



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5 Validação com a Ordem de Ajustes da Proteção

A ordem de ajuste de proteção (OAP) é fundamental em sistemas elétricos para configurar corretamente os dispositivos de proteção, de modo a garantir a operação segura e eficiente da rede. Esses ajustes definem os parâmetros que determinam como e quando os dispositivos devem atuar em caso de falhas, sobrecargas ou curtos-circuitos. Em vista disso, com intuito de validar a assertividade do estudo realizado, compara-se os parâmetros obtidos via cálculo com os dados presentes na OAP, apresentadas no ANEXO A – O da linha que interliga as subestações Tauape e Aldeota, com referência ao barramento Tauape. São analisados os valores referentes ao alcance das zonas de atuação bem como o fator de compensação de terra (K0). Vale ressaltar, também, que a OAP indica que a característica MHO

foi utilizada apenas para faltas fase-fase e para fase-terra foi utilizado a característica quadrilateral.

Tabela 8 – Validação dos dados com a OAP

Tipo de Ajuste	OAP		Calculado	
	Magnitude ( $\Omega$ )	Ângulo (Graus)	Magnitude ( $\Omega$ )	Ângulo (Graus)
Z1	0,31	74,83	0,36	74,83
Z2	0,53	74,83	0,53	74,83
K0	1,005	7,57	1,005	7,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Tabela 8, os valores para os parâmetros calculados estão quase que em sua totalidade iguais aos determinados pela OAP, no entanto, a divergência presente na zona 1 pode ser justificada visto que a OAP utilizou um alcance de 70% em oposição ao alcance calculado que foi de 80%. Desse modo, pode-se concluir que a simulação foi capaz de apresentar resultados condizentes com o esperado para o dispositivo real.

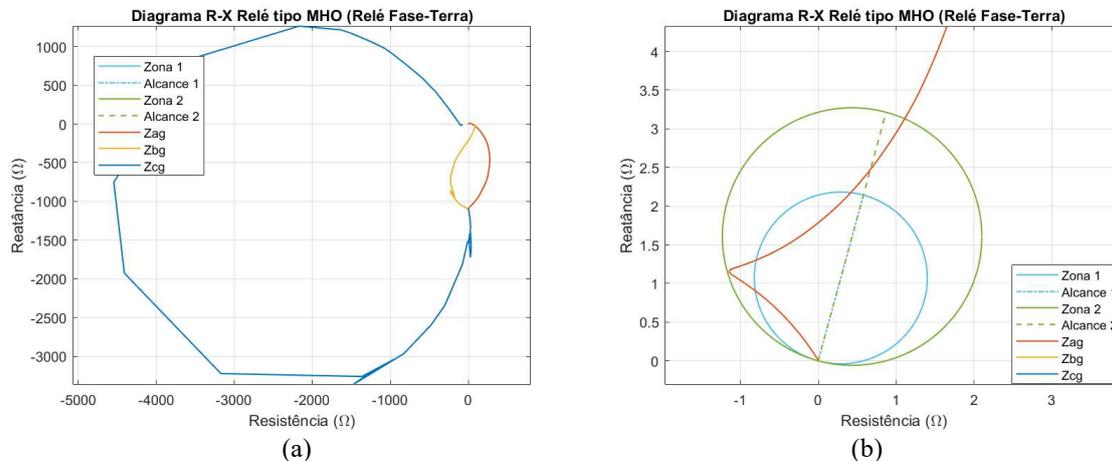
## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 Desempenho da proteção com polarização de sequência positiva

Neste estudo, analisa-se o comportamento do relé de distância tipo MHO para diversas situações de falta, primeiramente, observando o comportamento do relé para uma falta monofásica, depois evidenciando seu comportamento para uma falta bifásica e por fim uma falta trifásica.

A Figura 27 apresenta o mapeamento das impedâncias vistas pelo relé frente a uma falta fase-terra na fase A aplicada a uma distância mínima ao barramento de Tauape (TAP). É possível observar que o comportamento da trajetória das impedâncias tende a origem do diagrama R-X, ponto característico de impedância nula. Pode-se observar de melhor forma que apenas a componente de impedância AT, em vermelho, entra na zona de operação do relé, atuando de maneira esperada.

Figura 27 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-terra durante curto-circuito monofásico em TAP

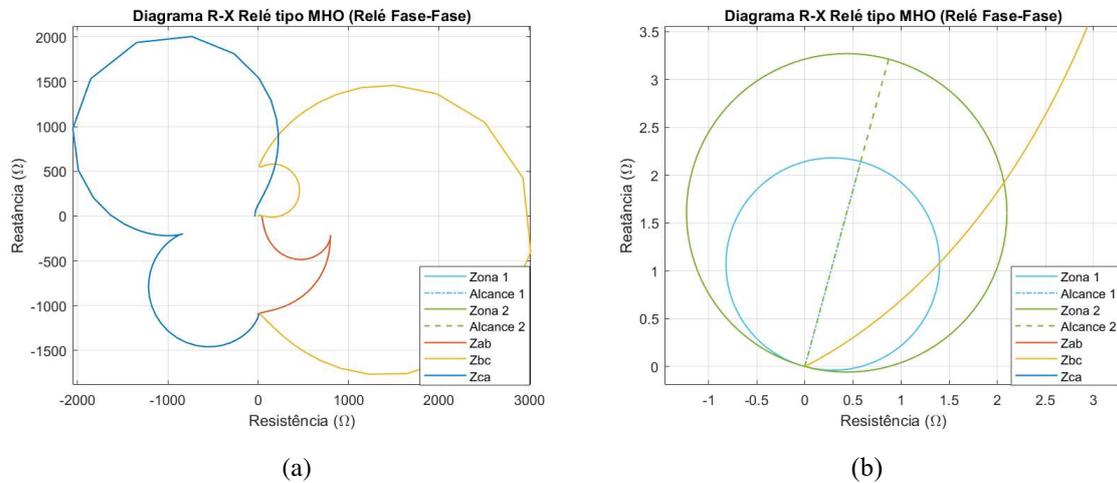


Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição: (a) visualização completa da trajetória das impedâncias; (b) visualização aproximada da trajetória das impedâncias.

Ao analisar uma falta fase-fase entre as fases B e C aplicada em um ponto de distância mínima ao barramento TAP, nas mesmas condições, observa-se que as demais componentes de impedância se aproximam da zona de atuação do relé BC, porém não atingem sua zona de atuação, indicando que o relé está parametrizado de forma que as demais componentes não causem sua atuação indevida, conforme evidenciado na Figura 28.

Figura 28 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito bifásico em TAP

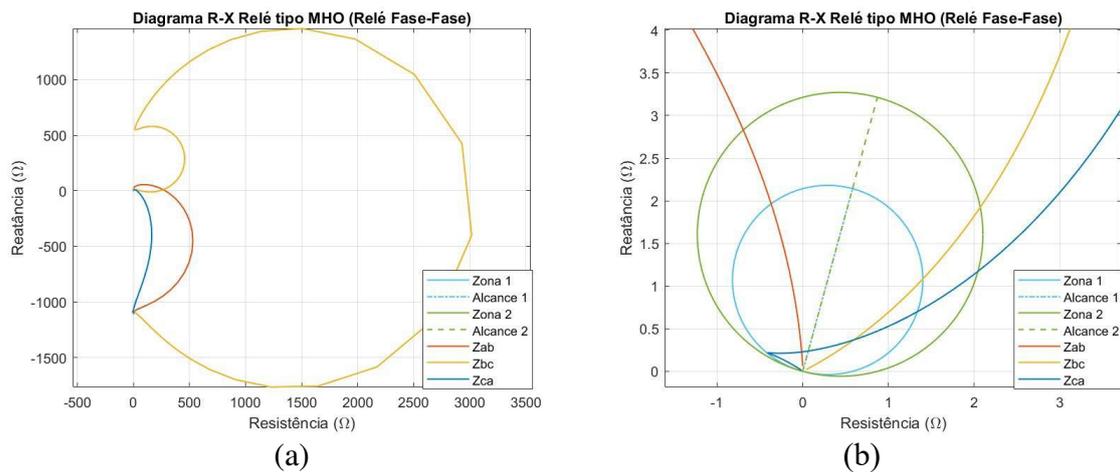


Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição: (a) visualização completa da trajetória das impedâncias; (b) visualização aproximada da trajetória das impedâncias.

A Figura 29 apresenta o comportamento das impedâncias de fase frente a uma falta trifásica para a mesma condição de falta apresentada nos demais casos, em um ponto de distância mínima que objetiva simular um comportamento de falta nas imediações do relé de distância.

Figura 29 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito trifásico em TAP



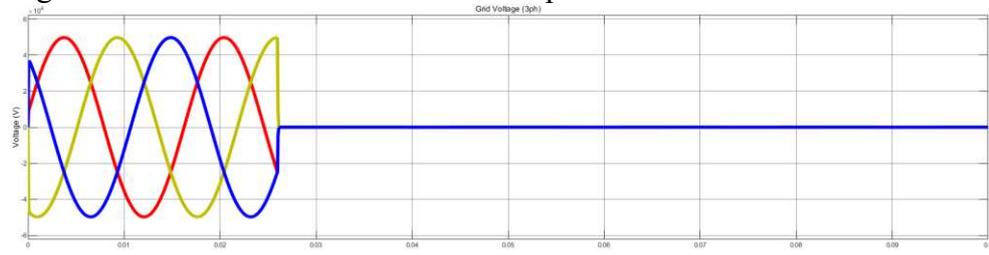
Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição: (a) visualização completa da trajetória das impedâncias; (b) visualização aproximada da trajetória das impedâncias.

Ao aproximar as zonas de operação do relé observa-se um comportamento distinto dos demais casos, no qual, apesar de o curto-circuito estar localizado próximo à origem do

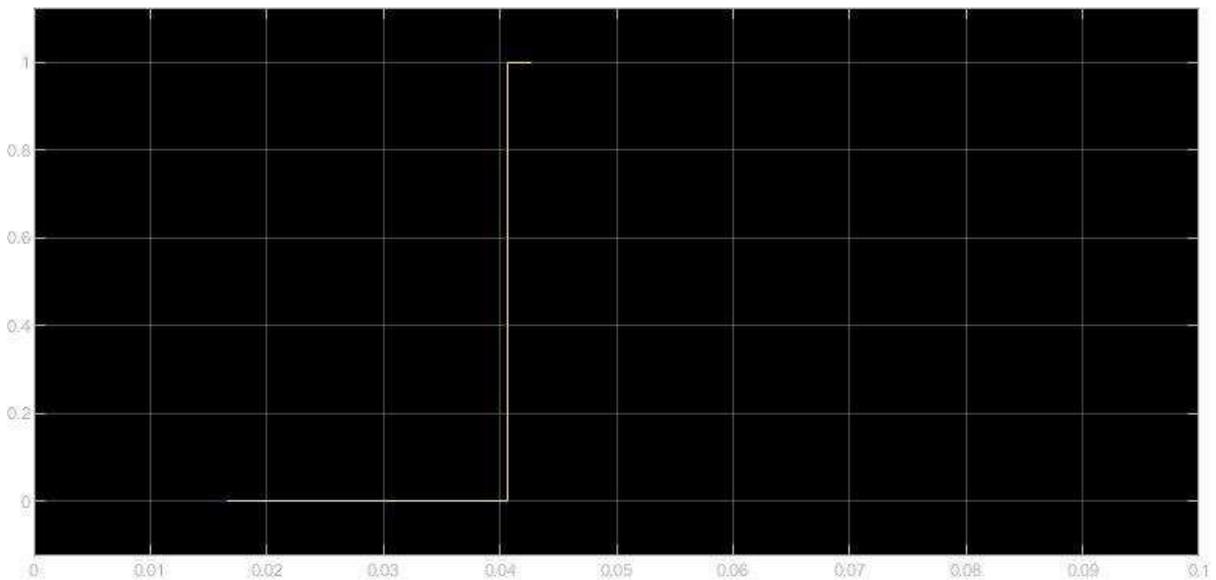
dispositivo, as impedâncias não refletem o ponto correto. Isso ocorre, pois, a tensão atinge o limiar mínimo de operação estipulado, pontos de falta muito próximos a fonte resultam em valores de tensão muito próximos a zero, como apresentado na Figura 30. Tais valores não são suficientes para serem utilizados nos comparadores de fase do relé para determinação da atuação, já que o elemento de tensão zero não tem ângulo definido. O relé então para de enviar uma resposta de *trip* ao sistema, visto que a informação não pode ser determinada, como evidenciado na Figura 31.

Figura 30 – Tensão durante falta trifásica próximo ao barramento TAP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Resposta de *trip* do relé MHO autopolarizado em um curto-circuitotrifásico



Fonte: Elaborado pelo autor.

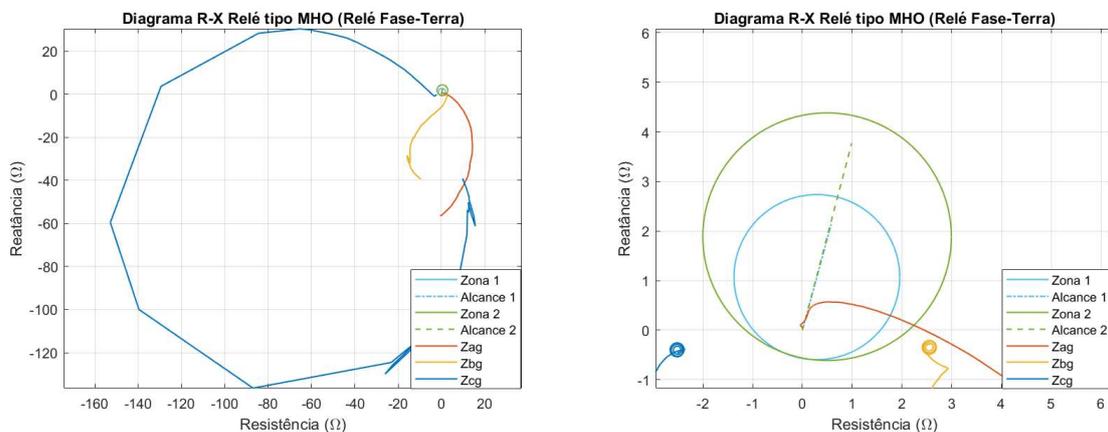
## 4.2 Desempenho da proteção com polarização por memória de tensão

Como apresentado no tópico 2.6, a memória de tensão objetiva corrigir o problema de não atuação do relé autopolarizado causados por valores de tensão insuficientes para correta verificação do relé em faltas muito próximas ao barramento protegido. É um método de

polarização especialmente eficaz para faltas trifásicas visto que não depende de uma fase não afetada para avaliação dos parâmetros de impedância.

Na Figura 32 observa-se o comportamento das impedâncias frente a uma falta monofásica na fase A com memória de tensão aplicada. Analisa-se uma mudança no perfil das zonas de atuação visto que esse método de polarização traz uma característica de expansão do alcance do relé para garantia de operação. O relé MHO simulado foi adaptado por meio de cálculos simples com objetivo apenas de idealizar o comportamento real do relé, visto a complexidade da implementação real dessas correções. Para a simulação de uma falta monofásica, especificamente, foi necessário uma redução da constante de memória de modo a evitar ruídos na simulação. Ao observar a visualização aproximada, nota-se que o diagrama R-X indica a atuação correta do relé A e uma aproximação das impedâncias B e C para sua zona de atuação, porém sem causar interferência em seu correto funcionamento. No entanto, ao se analisar a Figura 33, a qual se refere ao comportamento dos relés de fase durante o curto-circuitomonofásico, é visto que as componentes de fase AB e CA se apresentam dentro da zona de atuação do relé, podendo causar em uma atuação indevida do dispositivo.

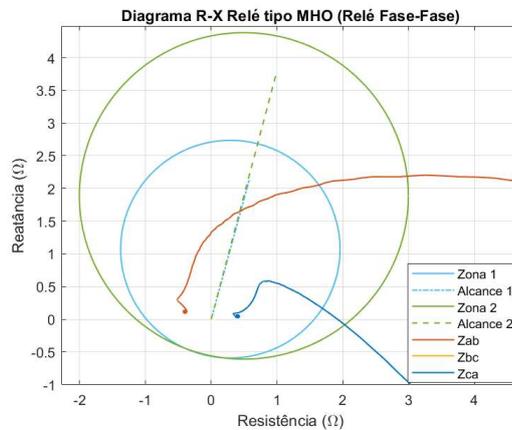
Figura 32 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-terra durante curto-circuito monofásico em TAP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição: (a) visualização completa da trajetória das impedâncias; (b) visualização aproximada da trajetória das impedâncias.

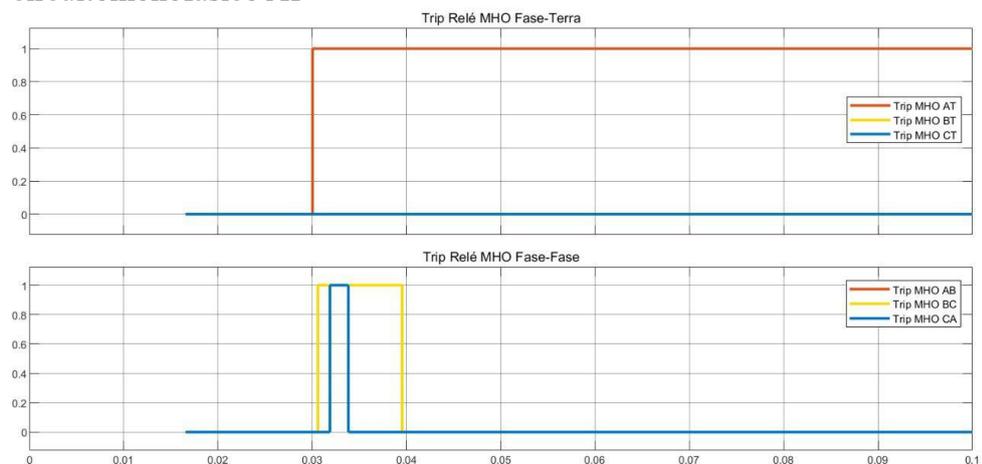
Figura 33 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito monofásico em TAP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, por se tratar de gráficos simplificados, é necessário avaliar os sinais de *trip* para a confirmação de quais elementos efetivamente atuam. Em vista disso, na Figura 34 observa-se o comportamento dos *trips* para o relé de terra e para o relé de fase. Para as componentes de terra tem-se a atuação correta do relé, atuando apenas o relé A sem a interferência das demais impedâncias. Já para o relé de fase, tem-se a atuação das três componentes durante poucos ciclos no início da falta, porém durante o restante da simulação o relé se comporta da maneira esperada, sem *trip* para nenhum dos relés de fase.

Figura 34 – Atuação dos relés fase-terra e fase-fase durante curto-circuitomonofásico AT

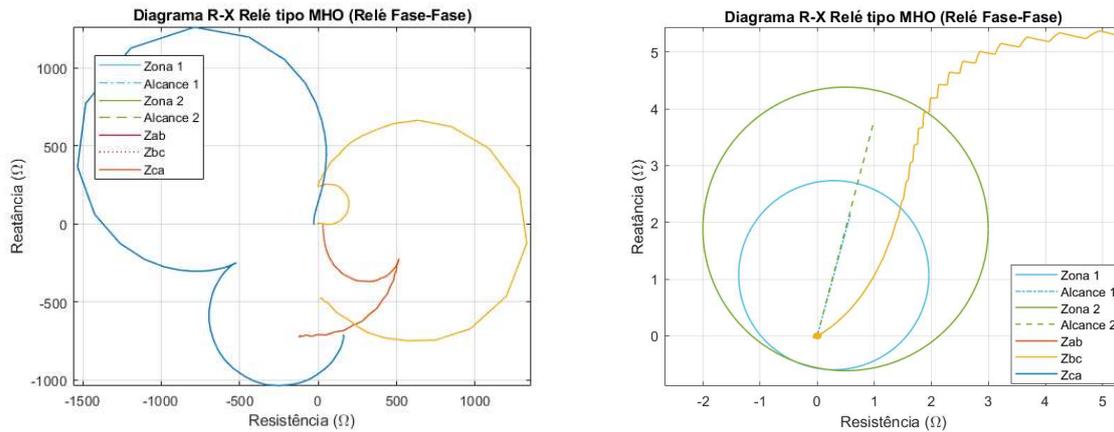


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 35 apresenta a trajetória das impedâncias durante uma falta bifásica entre as fases B e C com memória de tensão aplicada na proximidade do barramento TAP. Observa-

se que há a correta atuação do relé BC durante a falta e as demais impedâncias não estão suficientemente próximas de modo a influenciar na sua atuação. Por fim, na Figura 36 analisa-se, também, o comportamento das componentes de terra durante esse mesmo curto. As impedâncias BT e CT se aproximam da zona de atuação do relé terra, porém não entra em sua zona, indicando apenas a atuação do relé BC de fase durante essa falta.

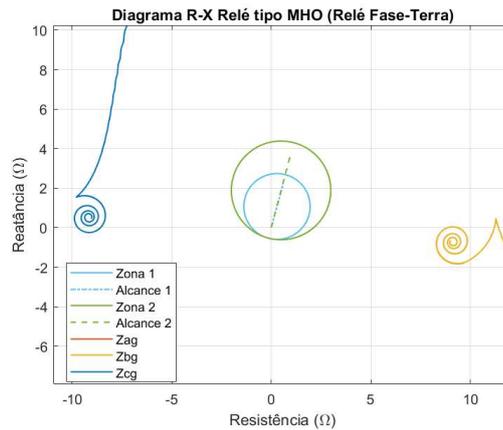
Figura 35 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito bifásico em TAP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição: (a) visualização completa da trajetória das impedâncias; (b) visualização aproximada da trajetória das impedâncias.

Figura 36 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-terra durante curto-circuito bifásico em TAP

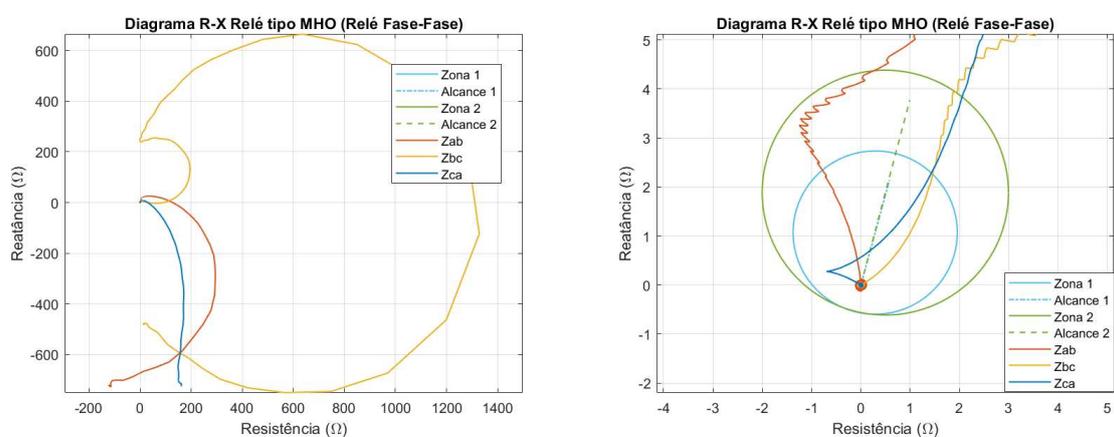


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 37 indica a trajetória de impedância frente a uma falta trifásica aplicado no ponto de proximidade máxima ao barramento A de forma completa e ampliada. Em oposição ao comportamento apresentado durante a atuação do relé autopolarizado, observa-se que as impedâncias atingem de fato o ponto da origem, mostrando que o nível de tensão não atingiu

os limiares de funcionamento e as operações matemáticas realizadas pelos comparadores ocorrem durante toda a simulação. A impedância atinge pontos que estariam anteriormente atrás da área de atuação do relé, no entanto, devido a ampliação da zona de atuação do relé, estes pontos estão em sua totalidade dentro da zona de atuação. Além disso, na Figura 38 é visto que o sinal de *trip* perdura durante a simulação, indicativo de que o decaimento da memória é suficientemente longo para uma atuação correta.

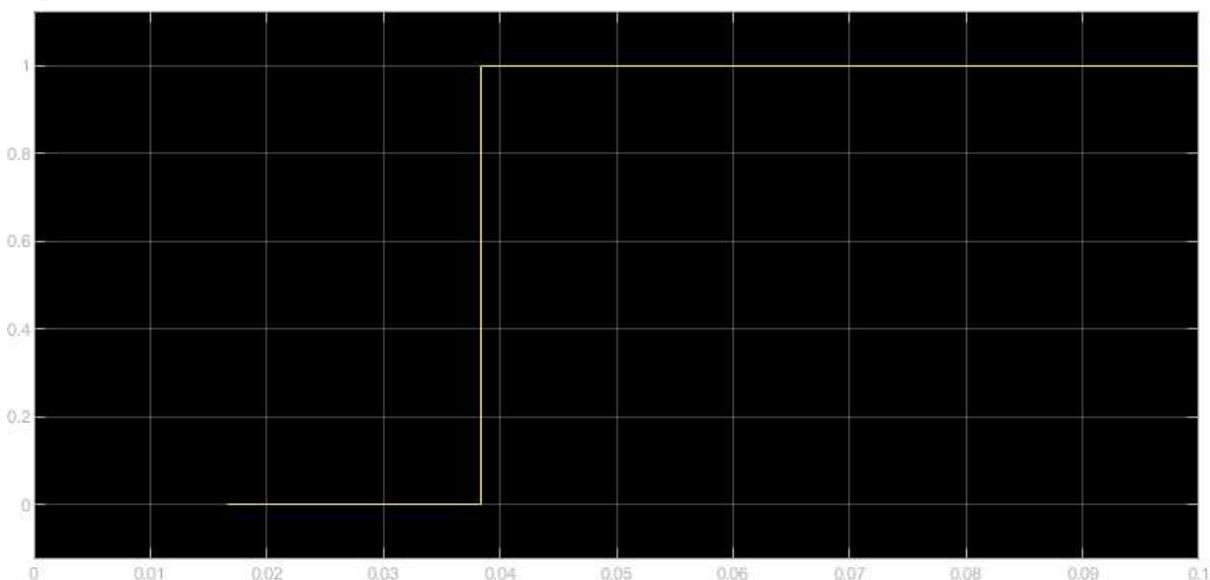
Figura 37 – Resultado da simulação das impedâncias do relé fase-fase durante curto-circuito trifásico em TAP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição: (a) visualização completa da trajetória das impedâncias; (b) visualização aproximada da trajetória das impedâncias.

Figura 38 – *Trip* do relé de fase durante curto-circuitotrifásico ABC



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nas análises efetuadas a partir das simulações implementadas via programa *MATLAB/SIMULINK*, conclui-se que a aplicação da polarização por memória de tensão é capaz de suprir as deficiências de atuação observadas durante a atuação do relé de distância tipo MHO autopolarizado, porém, com certas ressalvas.

Durante os testes realizados para o desempenho da proteção de distância autopolarizada foi analisado que o sistema possui dificuldades de operação para curtos-circuitos trifásicos muito próximos ao barramento no qual o sistema está localizado. Ao avaliar esse comportamento, é possível constatar que existe um limiar de tensão para que o dispositivo funcione em sua normalidade, ou seja, uma faixa de não operação do relé, o que traz a necessidade de uma diferente forma de polarização para sanar tal problema.

Ademais, ao avaliar os mesmos casos de curto-circuito, porém com a aplicação da polarização por memória de tensão, é possível afirmar que esse método traz uma alternativa viável para a correta atuação da proteção para curtos-circuitos fase-fase, principalmente em casos de curto-circuito trifásico, no qual o sistema anterior apresentou dificuldades em operação, sendo capaz de garantir a confiabilidade do relé de admitância e sua operação durante todo o período de falha. No entanto, apesar da memória solucionar o problema de faltas trifásicas também levanta um ponto de atenção durante faltas monofásicas, já que pode acarretar uma atuação, mesmo que momentânea, de componentes que não são afetadas.

Com o intuito de dar continuidade aos estudos realizados neste trabalho, de modo que possamos evoluir em nossas análises e nos aprofundar sobre o funcionamento do relé de distância, destacam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar a influência do barramento ADT ao desempenho do relé;
- Avaliar os demais métodos de polarização e suas dificuldades;
- Realizar a parametrização do relé em bancada e validar seu desempenho em diferentes tipos de polarização.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. Nova Iorque: 1999.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.
- DUARTE, A. C. DA R. **Introdução à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo: Artliber Editora, 2018.
- ELMORE, W. A. **Protective Relaying Theory and Applications**. 2<sup>a</sup> ed. CRC Press, 2004.
- ENGERS DA CRUZ, M. **Análise do Desempenho de Relés de Distância sob Condição de Saturação dos Transformadores de Corrente**. Alegrete: Universidade Federal do Pampa, 11 out. 2013.
- FENTIE, D. D. **Understanding the Dynamic Mho Distance Characteristic**. Pullman: 2016.
- GERHARD, Z. **Numerical Distance Protection**. 4<sup>a</sup> ed. Publicis, 2011.
- GLOVER, J. D. et al. **POWER SYSTEM ANALYSIS & DESIGN**. 6<sup>a</sup> ed. Boston: Cengage Learning, 2017.
- HOROWITZ, S. H. .; PHADKE, A. G. . **Power system relaying**. 3<sup>a</sup> ed. Hertfordshire: John Wiley & Sons : Research Studies Press, 2008.
- HOU, D.; GUZMÁN, A.; ROBERTS, J. **Innovative Solutions Improve Transmission Line Protection**. Pullman, WA USA: 1998.
- KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. v. 2
- LEÃO, R. P. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2018.
- MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção De Sistemas Elétricos De Potência**. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- MATHWORKS. **Distance Relay Protection in AC Microgrid**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/relay-distance-protection.html>>. Acesso em: 30 jun. 2024.
- MELLO, F. P. DE. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1979. v. 7
- PAITHANKAR, Y. G. .; BHIDE, S. R. . **Fundamentals of power system protection**. Nova Delhi: Prentice-Hall of India, 2007.
- PEREIRA, C. **Redes elétricas no domínio da frequência**. 2015.

PETER RUSH. **Proteção e Automação de Redes: Conceito e Aplicação**. São Paulo: Schneider, 2011.

ROBERTS, J.; GUZMAN, A.; SCHWEITZER, E. O. **Z = V/I Não Faz um Relé de Distância**. Atlanta: 1994.

SCHWEITZER, E. O. **New Developments in Distance Relay Polarization and Fault Type Selection**. 1991.

SIVANAGARAJU, S.; SATYANARAYANA, S. **ELECTRIC POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION**. Nova Delhi: Pearson, 2009.

## ANEXO A – Ordem de Ajuste de Proteção da Subestação Tauape

A Figura 39 apresenta os percentuais de alcance das zonas de proteção do relé 21, bem como as relações de transformação dos transformadores de corrente e potencial e os dados de impedância da linha. Já a Figura 40, mostra os parâmetros utilizado na implementação do relé, evidenciando a magnitude do alcance das zonas, o tipo de relé de distância associado ao tipo de falta, o fator de compensação de sequência zero e a extensão total da linha.

Figura 39 – Dados da OAP – Informações da LT

<b>ORDEN DE AJUSTE DE PROTEÇÃO - PROGRAMADA</b> SE : TAUAPE - TAP_12P1 <span style="float: right;">OAP Nº 291/2024</span>													PÁGINA: 01 / 06						
006													DATA: 22/07/2024						
ITEM	EQUIPAMENTO OU LT PROTEGIDO	TENSÃO (KV)	RELAÇÃO DE TC DE PICK-UP (A)	CORRENTE DE PICK-UP TEMPORIZ (A)	PROTEÇÃO	FABRICANTE TIPO	COR. PICK-UP INSTANTÂNEA(A)	COR. PICK-UP NEUTRO SENSÍVEL(A)	COR. PICK-UP SEQUENCIA NEGATIVA(2)	PICK-UP IZHI	COLD LOAD PICK-UP	DIFERENCIAL DE LINHA (87L)	IMPLANTAÇÃO						
FUNÇÃO Z1													Z1	Z2	PO				
DESCRİÇÃO													MÍN	MÁX	REMEX	UNIDAD	AJUSTE RELÉ		
													SET-1	SET-2	SET-3				
<b>LINE CONFIGURATION</b>																			
Current Transformer Ratio - Input W, CTRW (RTC)							RTC	CTRW	Range = 1 to 50000	1	-	240	240	OFF					
Current Transformer Ratio - Input X, CTRX (RTC)							RTC	CTRX	Range = 1 to 50000	1	-	240	240	-					
Potential Transformer Ratio - Input Y, PTRY (RTP)							RTP	PTRY	Range = 1,0 to 10000,0	1	-	600,0	600,0	-					
PT Nominal Voltage (L-L) - Input Y, VNOMY (Tensão Secundária do TP)							Vsec	VNOMY	Range = 60 to 300	1	-	115	115	-					
Potential Transformer Ratio - Input Z, PTRZ (RTP)							RTP	PTRZ	Range = 1,0 to 10000,0	1	-	600,0	600,0	-					
PT Nominal Voltage (L-L) - Input Z, VNOMZ (Tensão Secundária do TP)							Vsec	VNOMZ	Range = 60 to 300	1	-	115	115	-					
Positive-Sequence Line Impedance Magnitude, Z1MAG (Módulo de sequencia positiva da linha - Z1)							Impedância de Seq Positiva da Linha	Z1MAG	Range = 0,05 to 255,00	0,01	ohms,se c	0,44	0,44	-					
Positive-Sequence Line Impedance Angle, Z1ANG (Ângulo de sequencia positiva da linha - Z1)							Ângulo de Seq. Positiva da Linha	Z1ANG	Range = 5,00 to 90,00	0,01	graus	74,83	74,83	-					
Zero-Sequence Line Impedance Magnitude, Z0MAG (Módulo de sequencia zero da linha - Z0)							Impedância de Seq Zero da Linha	Z0MAG	Range = 0,05 to 255,00	0,01	ohms,se c	1,78	1,78	-					
Zero-Sequence Line Impedance Angle, Z0ANG (Ângulo de sequencia zero da linha - Z0)							Ângulo de Seq Zero da Linha	Z0ANG	Range = 5,00 to 90,00	0,01	graus	80,52	80,52	-					
Fault Location, EFLOC							LOCALIZAÇÃO DE FALTA	Localização de Falta	Select: Y, N	-	-	Y	Y	-					

Fonte: Concessionária Local, 2024.

Figura 40 – Dados da OAP – Parâmetros do Relé

RELAY CONFIGURATION ENABLES															
Mho Phase Distance Zones, E21MP (Número de zonas MHO ativas de fase)							Número de zonas MHO ativas de fase		E21MP	Select: N, 1-5	1	-	2	2	-
Quadrilateral Phase Distance Zones, E21XP (Número de zonas Quadrilateral ativas de fase)							Número de zonas Quadrilateral ativas de fase		E21XP	Select: N, 1-5	1	-	N	N	-
Mho Ground Distance Zones, E21MG (Número de zonas MHO ativas de Terra)							Número de zonas MHO ativas de Terra		E21MG	Select: N, 1-5	1	-	N	N	-
Quadrilateral Ground Distance Zones, E21XG (Número de zonas Quadrilateral ativas de neutro)							Número de zonas Quadrilateral ativas de neutro		E21XG	Select: N, 1-5	1	-	2	2	-
<b>MHO FASE DISTANCE ELEMENT REACH</b>															
Zone 1 Reach, Z1MP (MHO) Z da Linha (FASE).							ZONA 1 (IMPEDÂNCIA)	Z1MP	Range = 0,05 to 255,00 OFF	0,01	ohms,se c	0,31	0,31	-	
Zone 2 Reach, Z2MP (MHO) Z da Linha (FASE).							ZONA 2 (IMPEDÂNCIA)	Z2MP	Range = 0,05 to 255,00 OFF	0,01	ohms,se c	0,53	0,53	-	
<b>FASE DISTANCE ELEMENT TIME DELAY</b>															
Zone 1 Time Delay, Z1PD (Ciclos).							ZONA 1 (TEMPO)	Z1PD	Range = 0,000 to 1000,000 OFF	0,001	dclos	3,00	3,00	-	
Zone 2 Time Delay, Z2PD (Ciclos).							ZONA 2 (TEMPO)	Z2PD	Range = 0,000 to 1000,000 OFF	0,001	dclos	21,00	21,00	-	
<b>ZERO-SEQUENCE COMPENSATION FACTOR</b>															
Zone 1 ZSC Factor Magnitude, k0M1 (Módulo k0).							MÓDULO K0	k0M1	Range = 0,000 to 10,000 OFF	0,001	-	1,005	1,005	-	
Zone 1 ZSC Factor Angle, k0A1 (Ângulo k0).							ÂNGULO K0	k0A1	Range = -179,99 to 180,00	0,01	graus	7,57	7,57	-	
<b>FAULT LOCATOR</b>															
Line Length, LLR (em Km).							LLR	LLR	Range = 0,10 to 999,99	0,01	km	2,500	2,500	-	

Fonte: Concessionária Local, 2024.

## APÊNDICE A – Memorial de cálculo

As Figuras Figura 41, Figura 42 e Figura 43 apresentam a transformação da impedância da linha, fornecida em PU, para ohms secundários, a determinação das impedância de sequência positiva, negativa e zero, cálculos para escolha do TC utilizando valores de curto-circuitocircuito trifásicos e, por fim, cálculos para determinação do alcance das zonas do relé, utilizando 80% para o alcance da primeira zona e 120% para o alcance da segunda.

Figura 41 – Cálculo de impedância de sequência positiva e sequência negativa

**Relé De Distância**

$$L_{12} := 2.5 \quad R_{11pu} := 0.0061 \quad R_{01pu} := 0.0154 \quad S_{11} := 100 \text{ M} \cdot \text{V} \cdot \text{A}$$

$$X_{11pu} := 0.0225 \quad X_{01pu} := 0.0922 \quad Tpu := \frac{(100 \cdot 10^6)}{(69 \cdot 10^3)^2}$$

$$R_{11} := \frac{R_{11pu}}{Tpu} = 0.29 \quad R_{01} := \frac{R_{01pu}}{Tpu} = 0.733$$

$$X_{11} := \frac{X_{11pu}}{Tpu} = 1.071 \quad X_{01} := \frac{X_{01pu}}{Tpu} = 4.39 \quad I_{cc3} := 19200 \text{ A}$$

$$Z_{1,1} := R_{11} + X_{11} \cdot i = 0.29 + 1.071i$$

$$Z_{1,0} := R_{01} + X_{01} \cdot i = 0.733 + 4.39i$$

**Impedância de Sequência Positiva**

$$Z_{12} := L_{12} \cdot Z_{1,1} = 0.726 + 2.678i$$

$$Z_{12T} = 74.831 \quad Z_{12Z} = 2.775$$

**Impedância de Sequencia Negativa**

$$Zn_{12Z} := Z_{12Z} = 2.775$$

$$Zn_{12T} := Z_{12T} = 74.831$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

## Figura 42 – Cálculo da impedância de sequência zero e dimensionamento de TC e TP

### Impedância de Sequência Zero

$$Z_{h_{12}} := L_{12} \cdot Z_{1,0} = 1.833 + 10.974i$$

$$Z_{h_{12Z}} = 11.126$$

$$Z_{h_{12T}} = 80.518$$

### Dimensionamento de TP e TC

De modo a garantir a operacionalidade segura do TC, utiliza-se o método que garante sua não saturação para uma corrente 20 vezes superior à sua nominal. Tendo em vista um curto-circuito trifásico no barramento de TAP equivalente à 19.2 kA, teremos então que a corrente nominal segue:

$$I_{sat_{12}} := \frac{I_{cc3}}{20} = 960 \text{ A}$$

$$I_w > I_n \quad I_{TCp12} := 1200 \text{ A}$$

$$RTC_{12} := \frac{I_{TCp12}}{5 \text{ A}} = 240$$

$$RTP := \frac{69000}{115} = 600$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

## Figura 43 – Cálculo das zonas de proteção do relé de distância e fator de compensação de sequência zero

### Ajustes das Zonas de Proteção

Chamaremos de  $K_n$  a relação  $RTC/RTP$ , onde  $n$  se refere ao de para da linha. Essa transformação é necessária para que tenhamos os alcances do relé em parâmetros secundários.

$$K_{12} := \frac{RTC_{12}}{RTP} = 0.4$$

A primeira zona equivale a 80% de toda a linha, logo:

$$Z_{z_{12,1}} := Z_{1,1} \cdot K_{12} \cdot 0.8 = 0.093 + 0.343i$$

$$Z_{z_{12,1mag}} := |Z_{z_{12,1}}| = 0.355$$

$$Z_{z_{12,1ang}} := -\frac{180}{\pi} \cdot \text{atan} \left( \frac{\text{Im}(Z_{z_{12,1}})}{\text{Re}(Z_{z_{12,1}})} \right) = 74.831$$

Já para a segunda Zona, temos a proteção completa da primeira zona acrescida a 20% da linha seguinte, com tempo de atuação de 0,4s

$$Z_{z_{12,2}} := 1.2 \cdot Z_{1,1} \cdot K_{12} = 0.139 + 0.514i$$

$$Z_{z_{12,2mag}} := |Z_{z_{12,2}}| = 0.533$$

$$Z_{z_{12,2ang}} := -\frac{180}{\pi} \cdot \text{atan} \left( \frac{\text{Im}(Z_{z_{12,2}})}{\text{Re}(Z_{z_{12,2}})} \right) = 74.831$$

Por fim, calcula-se o fator de compensação de sequência zero para amenizar os efeitos de desbalanço de sequência zero em curtos monofásicos.

$$K_0 := \frac{(Z_{1,0} - Z_{1,1})}{3 \cdot Z_{1,1}} = 0.997 + 0.132i$$

Obtendo a magnitude do sinal, temos:

$$K_{0m} := |K_0| = 1.005$$

$$K_{0ang} := \frac{180}{\pi} \cdot \text{atan} \left( \frac{\text{Im}(K_0)}{\text{Re}(K_0)} \right) = 7.569$$

Fonte: Elaborado pelo autor.