

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

ENIO MATHEUS ANDRADE RANGEL

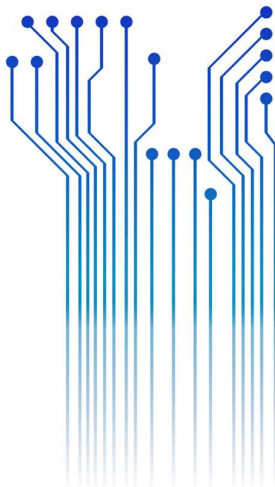


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO  
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2018

Enio Matheus Andrade Rangel

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

*Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.  
Orientador

Campina Grande  
2018

Enio Matheus Andrade Rangel

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

*Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em 18 / 12 / 2018

**Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

**Professor Célio Anésio da Silva, D. Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

## RESUMO

O relatório a seguir tem como objetivo descrever as atividades realizadas pelo aluno do curso de graduação em Engenharia Elétrica, Enio Matheus Andrade Rangel, durante Estágio Curricular Supervisionado, realizado no Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), com carga horária de 180 horas. O trabalho realizado consistiu em avaliar a recém-chegada unidade de teste de proteção ERP-UB, do fabricante espanhol Edibon. Além das funcionalidades básicas da unidade ERP-UB, foi também verificado o elemento de proteção de distância de um dos relés digitais que compõem o sistema: O relé em questão é o SEL311-C, do fabricante *Schweitzer Engineering Laboratories*.

**Palavras-chave:** Relé digital, Proteção de distância, Função mho.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA R-X DE IMPEDÂNCIA, ADMITÂNCIA, REATÂNCIA E QUADRILATERAL, RESPECTIVAMENTE.....	11
FIGURA 2: RELAÇÕES DO VETOR $dZ$ . .....	11
FIGURA 3: FUNÇÃO MHO EM TERMOS DA TENSÃO MEDIDA.....	12
FIGURA 4: PROJEÇÃO DO VETOR $Z$ SOBRE $Z_R$ . .....	13
FIGURA 5: EXPANSÃO DA FUNÇÃO MHO. ....	15
FIGURA 6: LADO ESQUERDO DO MÓDULO DE CONTROLE E MEDIÇÕES. ....	16
FIGURA 7: LADO DIREITO DO MÓDULO DE CONTROLE E MEDIÇÕES.....	17
FIGURA 8: MÓDULO DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA COM O SEL311-C. ....	18
FIGURA 9: MÓDULO LT.....	20
FIGURA 10: MÓDULO DE INJEÇÃO DE FALTAS.....	21
FIGURA 11: DIAGRAMA UNIFILAR DO EXEMPLO 1. ....	22
FIGURA 12: EXPERIMENTO PRONTO PARA SER REALIZADO. ....	24
FIGURA 13: CONEXÕES PARA REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO PRÁTICO. ....	26
FIGURA 14: HMI DO SEL311-C. ....	27
FIGURA 15: MÓDULO DE INJEÇÃO DE FALTAS ENERGIZADO E PRONTO PARA USO. ....	28
FIGURA 16: DETECÇÃO DE FALTA TRIFÁSICA. ....	29
FIGURA 17: DESCRIÇÃO DO EVENTO GERADO, FALTA TRIFÁSICA.....	30
FIGURA 18: EXTINÇÃO DA CORRENTE DE FALTA, FALTA TRIFÁSICA. ....	30
FIGURA 19: INTERVALO DE INJEÇÃO DA FALTA AO PICKUP, FALTA TRIFÁSICA. ....	31
FIGURA 20: DIAGRAMA R-X, FALTA TRIFÁSICA. ....	31
FIGURA 21: DETECÇÃO DE FALTA FASE-TERRA. ....	32
FIGURA 22: DESCRIÇÃO DO EVENTO GERADO, FALTA FASE-TERRA.....	32
FIGURA 23: PICKUP DE ELEMENTOS DA ZONA 4, FALTA FASE-TERRA. ....	33
FIGURA 24: LEITURA DE TENSÃO PROVENIENTE DOS TP, FALTA FASE-TERRA. ....	33
FIGURA 25: DIAGRAMA R-X, FALTA FASE-TERRA. ....	34
FIGURA 26: DETECÇÃO DE FALTA FASE-FASE-TERRA. ....	34
FIGURA 27: DESCRIÇÃO DO EVENTO GERADO, FALTA FASE-FASE-TERRA. ....	35
FIGURA 28: CORRENTE DE TERRA IG, FALTA FASE-FASE-TERRA.....	35
FIGURA 29: EXTINÇÃO DA CORRENTE DE FALTA E PICKUP DOS ELEMENTOS, FALTA BIFÁSICA.....	36
FIGURA 30: DIAGRAMA R-X, FALTA FASE-FASE-TERRA. ....	36
FIGURA 31: DETECÇÃO DE FALTA FASE-FASE. ....	37
FIGURA 32: DESCRIÇÃO DO EVENTO GERADO, FALTA BIFÁSICA.....	37
FIGURA 33: EXTINÇÃO DA CORRENTE DE FALTA E PICKUP DOS ELEMENTOS, FALTA BIFÁSICA.....	38
FIGURA 34: DIAGRAMA R-X, FALTA BIFÁSICA. ....	38
FIGURA 35: <i>PORT COMMUNICATION SETTINGS</i> .....	41
FIGURA 36: CONFIRMAÇÃO DA CONEXÃO.....	41
FIGURA 37: <i>GENERAL SETTINGS</i> . ....	42
FIGURA 38: <i>GENERAL</i> .....	43
FIGURA 39: <i>LINE SETTINGS AND FAULT LOCATOR</i> . ....	44
FIGURA 40: <i>PHASE DISTANCE ELEMENTS</i> . ....	45
FIGURA 41: <i>GROUND DISTANCE ELEMENTS</i> . ....	46
FIGURA 42: <i>DISTANCE ELEMENT TIME DELAY SETTINGS</i> . ....	47
FIGURA 43: <i>OUTPUT CONTACTS</i> .....	48
FIGURA 44: <i>CLOSE/RECLOSE LOGIC</i> . ....	49
FIGURA 45: <i>TRIP LOGIC</i> . ....	50
FIGURA 46: <i>SER TRIGGER LISTS</i> .....	51

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: GRANDEZAS DE POLARIZAÇÃO. ....	14
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DO EXEMPLO. ....	22
TABELA 3: IMPEDÂNCIAS DE SECUNDÁRIO CALCULADAS. ....	23
TABELA 4: PARÂMETROS DE PROTEÇÃO DO RELÉ PARA O EXEMPLO. ....	23
TABELA 5: CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DO EXERCÍCIO PRÁTICO. ....	25
TABELA 6: PARÂMETROS DE PROTEÇÃO DO RELÉ PARA O EXERCÍCIO PRÁTICO. ....	25

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTR	<i>Current Transformer Ratio</i>
CCVT	<i>Coupling Capacitor Voltage Transformer</i>
DCB	<i>Directional Comparison Blocking</i>
DCUB	<i>Directional Comparison Unblocking</i>
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
LSP	Laboratório de Sistemas de Potência
LT	Linha de Transmissão
POTT	<i>Permissive Overreaching Transfer Trip</i>
PTR	<i>Potential Transformer Ratio</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SER	<i>Sequential Event Recorder</i>
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1. OBJETIVOS .....	9
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	9
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA.....</b>	<b>10</b>
2.1. DIAGRAMAS R-X.....	10
2.2. O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE DISTÂNCIA MHO .....	11
2.3. A GRANDEZA DE REFERÊNCIA DA FUNÇÃO MHO .....	13
<b>3. EQUIPAMENTO AVALIADO .....</b>	<b>16</b>
3.1. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE CONTROLE E MEDIÇÕES .....	16
3.2. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA.....	18
3.3. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE LINHA DE TRANSMISSÃO (LT) .....	19
3.4. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE INJEÇÃO DE FALTAS .....	21
<b>4. ESTUDO DE CASO - PARÂMETROS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA .....</b>	<b>22</b>
<b>5. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS .....</b>	<b>24</b>
5.1. MÓDULOS UTILIZADOS .....	25
5.2. CÁLCULO DOS PARÂMETROS.....	25
5.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO.....	26
<b>6. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
6.1. FALTA TRIFÁSICA .....	29
6.2. FALTA FASE-TERRA .....	31
6.3. FALTA FASE-FASE-TERRA .....	34
6.4. FALTA FASE-FASE .....	37
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>
<b>APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DO SEL311-C .....</b>	<b>41</b>
<b>APÊNDICE B – CÁLCULO DOS PARÂMETROS EM MATLAB .....</b>	<b>52</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O atual Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) da UFCG teve suas atividades iniciadas em 2014. Desde então, o LSP tem sido referência de pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas da Engenharia Elétrica, sobretudo:

- Análise de SEPs em regime permanente;
- Dinâmica e controle de SEPs;
- Qualidade de energia;
- Análise de transitórios eletromagnéticos;
- Técnicas de inteligência artificial aplicadas a SEPs;
- Esquemas de proteção digital de SEPs.

Da data deste trabalho, o LSP está sob a coordenação da professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc., supervisora do estágio realizado pelo autor.

Um dos laboratórios pertencentes ao LSP é o Laboratório de Proteção Digital (LABPRO), equipado com diversos relés de proteção digitais, um simulador digital em tempo real (RTDS), computadores para programação e análise de dados, e etc.

Nesse contexto, a unidade de teste de proteção recentemente adquirida pelo LSP – a Edibon ERP-UB – que possui estrutura modular, permite a verificação de uma larga faixa de configurações de proteção e testes de relés de proteção industriais.

O ERP-UB é uma unidade didática que permite ao aluno adquirir experiência teórica e prática com relés de proteção industriais. A unidade permite o emprego de no máximo dois relés simultaneamente, e a programação de cada equipamento é feita com auxílio de software próprio do fabricante, *Schweitzer Engineering Laboratories* (Edibon, 2014).

A teoria de relés digitais é extremamente ampla. O método de proteção de distância, utilizado em larga escala na proteção de linha de transmissão de alta tensão, é uma pequena fração da teoria de proteção de sistemas elétricos, porém, uma fração de crucial importância. A proteção de sobrecorrente tem diversas limitações que podem ser desprezados em sistemas de Média Tensão e Baixa Tensão, como a alta correlação com as impedâncias de carga e de fonte, a disparidade no alcance de detecção para variados tipos de defeito, etc. (Paithankar *et al.*, 2007).

Em sistemas de Extra Alta Tensão e Alta Tensão, tais limitações não podem ser toleradas. Uma falha na operação de relés nesses sistemas pode comprometer a estabilidade de uma região muito maior, considerando-se a interligação da rede elétrica moderna. Dadas essas condições, a proteção de distância é concebida.

A proteção de distância é relativamente independente de variações de impedância na fonte e de variações na carga. Relés de proteção de distância apresentam alcance igual para todos os tipos de defeito, e são capazes de atuar rapidamente (dois a três ciclos) na abertura de disjuntores, trazendo dessa forma, uma técnica de proteção robusta e eficaz na guarda de extensas linhas de transmissão essenciais ao funcionamento do sistema elétrico interligado.

### **1.1. OBJETIVOS**

O principal objetivo do estágio desenvolvido foi a avaliação da unidade de teste de proteção ERP-UB, recém adquirida pelo LSP. Para tal, foi escolhido o módulo de proteção de distância para realização de testes práticos que validassem o equipamento:

- Receber treinamento na filosofia de proteção de sistemas elétricos de potência.
- Compreender o objetivo da função de proteção de distância;
- Verificar a performance de um sistema de proteção de distância na ocorrência de faltas na linha de transmissão;

### **1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO**

A Seção 2 traz a fundamentação teórica necessária para entender o funcionamento dos elementos de proteção de distância em relés digitais, sobretudo a característica de proteção mho (ou de admitância), amplamente utilizada na proteção de linhas de transmissão de Alta Tensão e Extra Alta Tensão.

Na Seção 3 é realizada a caracterização dos módulos da unidade de teste de proteção ERP-UB.

Na Seção 4 apresenta-se um estudo de caso de proteção de distância, crucial para o entendimento da definição de parâmetros de proteção em relés de distância.

Na Seção 5 apresentam-se as atividades desenvolvidas durante o estágio, enquanto a Seção 6 contém a discussão acerca dos resultados obtidos com o ERP-UB.

Por fim, na Seção 7 discutem-se as considerações finais acerca do estágio realizado.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Por que usar a proteção de distância em linhas de transmissão? Os elementos de proteção de sobrecorrente (50, 51 e seus derivados) e de tensão (27, 59 e seus derivados) não são seletivos o bastante para coordenar esquemas de proteção encontrados em linhas de transmissão, nem são capazes de identificar o local da falta. Saber o ponto em que ocorre uma falta em linhas de transmissão de alta tensão que se estendem por centenas de quilômetros é imprescindível. Elementos de medição de impedância (21 e seus derivados), comumente denominados elementos de proteção de distância, atendem a esses dois requisitos de projeto.

Outra vantagem da proteção de distância é o fato de a mesma ter um baixo grau de correlação com as impedâncias de fonte e de carga do sistema. Essa característica é extremamente útil, pois o fluxo de carga em linhas de transmissão sofre grandes variações ao longo do tempo (Paithankar *et al.*, 2007).

Fundamentalmente, relés de proteção de distância comparam a tensão e corrente em determinado ponto, lidas em tempo real pelos transformadores de instrumentação (TP e TC) do sistema. Para redes balanceadas e faltas entre fases, essa relação é a impedância de falta  $Z_{falta} = VI$ . Por esse motivo, relés de distância são configurados em função da impedância do sistema de potência para a zona que se deseja proteger (Edibon, 2014).

Para uma falta trifásica no ponto  $n$  da LT, a tensão elétrica nesse ponto será mínima. Portanto, a tensão no ponto em que estão instalados os equipamentos de medição será equivalente à queda de tensão ao longo da LT até o ponto  $n$ , ou seja:

$$V = I \cdot n \cdot Z_{LT} \text{ e, portanto, a impedância vista pelo relé para uma falta trifásica será } Z_{falta} = n \cdot Z_{LT}.$$

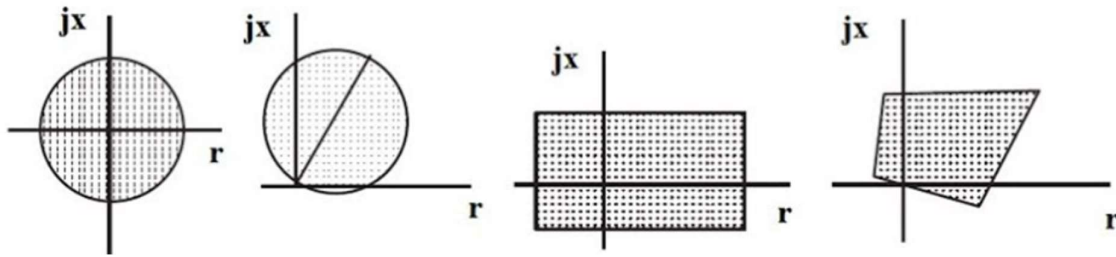
De acordo com Edibon (2014):

“Lewis e Tippett (1932) demonstraram que, para medições de tensão e corrente de linha, o alcance dos relés de distância é o mesmo para faltas trifásicas, fase-fase ou fase-fase-terra, bastando apenas calcular o valor genérico  $Z_{falta}$  para garantir a proteção do sistema contra todos os tipos de falta envolvendo fase.”

### 2.1. DIAGRAMAS R-X

De acordo com Andrichak *et al.* (2014), é conveniente mostrar as características de um relé de distância através de diagramas de impedância R-X, onde os valores de resistência pertencem ao eixo das abcissas e os valores de reatância ao eixo das ordenadas. A área interna de cada diagrama delimita a região de atuação do relé de distância, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Diagrama R-X de impedância, admitância, reatância e quadrilateral, respectivamente.



Fonte: Andrichak *et al*, (2014).

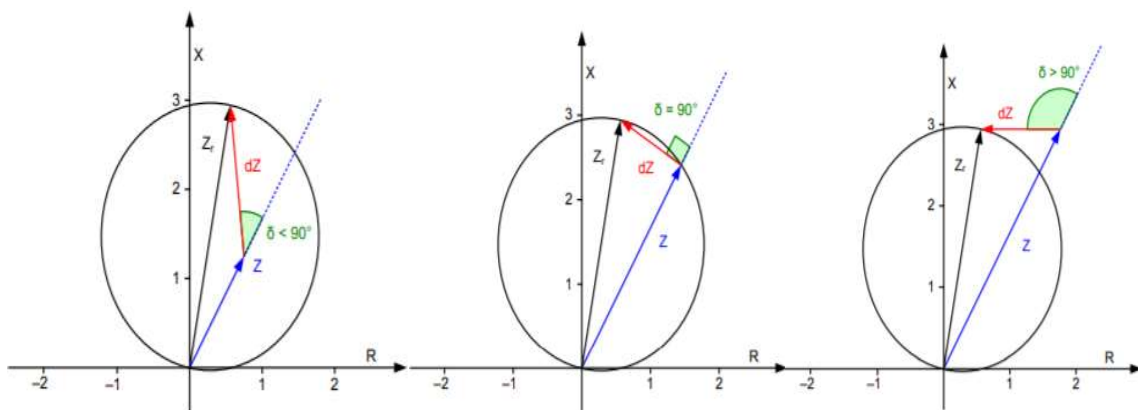
A circunferência partindo da origem (segunda imagem), chamada de função de admitância ou mho, tem larga aplicação em proteção de linhas de transmissão. Por estar concentrada no primeiro quadrante, ela tem capacidade direcional. Além disso, é mais sensível a curtos-circuitos defasados de  $60^\circ$  a  $85^\circ$  - característicos de defeitos em LT - em comparação a condições de altas correntes de carga defasadas entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$ .

## 2.2. O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE DISTÂNCIA MHO

Fentie (2016) descreveu com detalhes a operação de relés digitais com função mho. Esses dispositivos testam o ângulo entre o parâmetro de impedância de alcance do relé  $Z_r$  e a impedância medida no momento da falta,  $Z$ . O que observamos nos diagramas R-X é uma impedância de falta deslocada da reta  $Z_r$ , devido à impedância de arco elétrico (predominantemente resistiva) somada à impedância da linha.

O vetor  $dZ = Z_r - Z$  é a diferença entre os vetores de alcance do relé e impedância de falta medida. O valor do ângulo  $\delta = \theta_{dZ} - \theta_Z$  irá determinar a tomada de decisão do relé, como mostra a Figura 2:

Figura 2: Relações do vetor  $dZ$ .



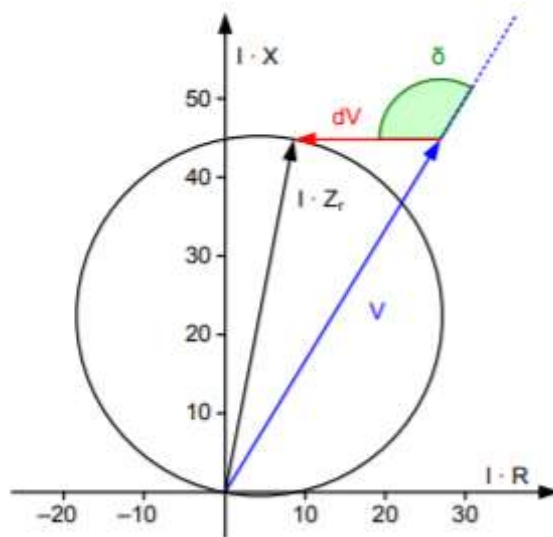
Fonte: Fentie (2016).

- a) Se  $-90 \leq \delta \leq 90$ , a impedância de falta pertence à circunferência demarcada pela função  $mho$  e o elemento de proteção dispara (em inglês, se diz que houve um *pickup* do elemento de distância em questão);
- b) Se  $90 < \delta < -90$ , a impedância de falta não pertence à circunferência demarcada pela função  $mho$  e o relé continua segue em operação normalmente.

Na prática, relés de distância não utilizam impedância como referência do ponto de operação e nem calculam o valor de  $\delta$  para determinar a presença de falta. Um método computacionalmente mais eficiente será demonstrado nos próximos parágrafos, e consiste em realizar os cálculos em termos da tensão medida pelo transformador de potencial (Figura 3):

$$\arg\left(\frac{dZ}{Z}\right) = \arg\left(\frac{Z_r - Z}{Z}\right) = \arg\left(\frac{IZ_r - V}{V}\right)$$

Figura 3: função  $mho$  em termos da tensão medida.



Fonte: Fentie (2016).

Além disso, o uso de comparadores de fase reduz o tempo da tomada de decisão. A diferença angular entre os vetores  $dZ$  e  $Z$  pode ser escrita como:

$$\arg(|dZ| \angle \theta_{dZ} \cdot |Z| \angle \theta_Z^*) = \theta_{dZ} - \theta_Z = \delta$$

A função cosseno é positiva no intervalo  $[-90, 90]$  e, portanto, nos fornece uma boa relação de comparação para o ângulo  $\delta$ , de modo que:

$$\operatorname{Re}[dZ \cdot Z^*] = |dZ||Z| \cos(\delta) \geq 0$$

Ou, em termos da tensão medida:

$$\operatorname{Re}[(Z_r I - V)V^*] \geq 0$$

É a condição de ocorrência de um *pickup* do elemento de distância em questão.

Podemos simplificar ainda mais os esforços computacionais projetando a impedância de falta  $Z$  sobre a reta  $Z_r$ , como observa-se na Figura 4. Ao igualar a equação  $\text{Re}[dZ \cdot Z^*]$  a zero, definimos uma circunferência de diâmetro  $Z$  que intercepta o ponto  $Z$  e a origem.

Isolando o módulo de  $Z_r$  na equação, definimos o comprimento do vetor projeção de  $Z$  sobre a reta  $Z_r$ :

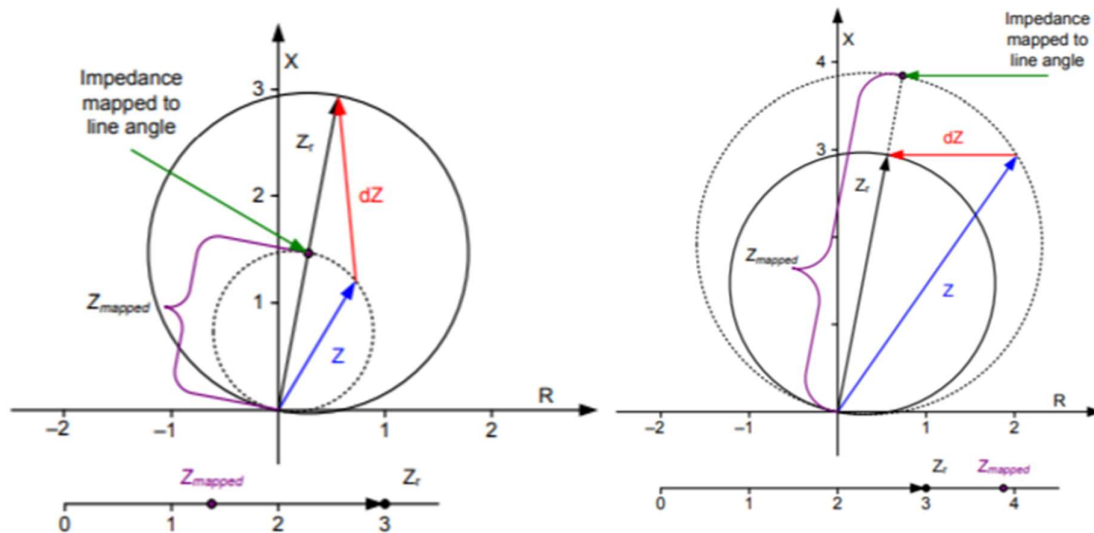
$$|Z_{mapped}| = \frac{\text{Re}(Z \cdot Z^*)}{\text{Re}(1 \angle \theta_{Z_r} \cdot Z^*)}$$

E finalmente, em termos das leituras de corrente e tensão:

$$|Z_{mappe}| = \frac{\text{Re}(V \cdot V^*)}{\text{Re}(1 \angle \theta_{Z_r} \cdot I \cdot V^*)}$$

O *pickup* ocorre quando  $|Z_{mapped}| \leq |Z_r|$ . Essa equação reduz o número de operações com comparador para um.

Figura 4: Projeção do vetor  $Z$  sobre  $Z_r$ .



Fonte: Fentie (2016).

### 2.3. A GRANDEZA DE REFERÊNCIA DA FUNÇÃO MHO

O termo  $dV = IZ_r - V$ , denominado grandeza de operação, é comparado com a grandeza de referência (ou de polarização)  $V$  de acordo com o mecanismo explicado na seção anterior. Quando a grandeza de polarização é a própria tensão de falta, o elemento de proteção de distância se caracteriza como auto-polarizado. Durante uma falta, é desejável que o ângulo da grandeza de polarização se mantenha relativamente constante para que se garanta a confiabilidade da proteção (Fentie, 2016).

Nesse sentido, a auto-polarização não é uma característica desejada para detecção de faltas que ocorrem próximo ao ponto de medição do relé. Isso é verdade, pois os valores vistos pelo TP são muito baixos para serem medidos com precisão. Relés modernos contornam esse problema

utilizando diferentes grandezas de referência a depender do tipo e localização do defeito. Por exemplo, um elemento mho de falta bifásica BC pode utilizar o vetor de fase medido  $V_A$  atrasado em  $90^\circ$ , como referência. Essa técnica é denominada polarização cruzada (Andrichak, 2014).

Para o caso de faltas trifásicas próximas do relé, onde a tensão de todas as fases é próxima de zero, nem a auto-polarização ou a polarização cruzada são capazes de fornecer uma leitura de referência confiável. Para esse tipo de falta, o relé utiliza uma referência de memória no algoritmo de polarização, onde o valor armazenado decai ao longo do tempo. Geralmente a grandeza armazenada é a tensão de sequência positiva do elemento em questão, antes da ocorrência de falta. Na Tabela 1 mostram-se as grandezas de memória para cada elemento:

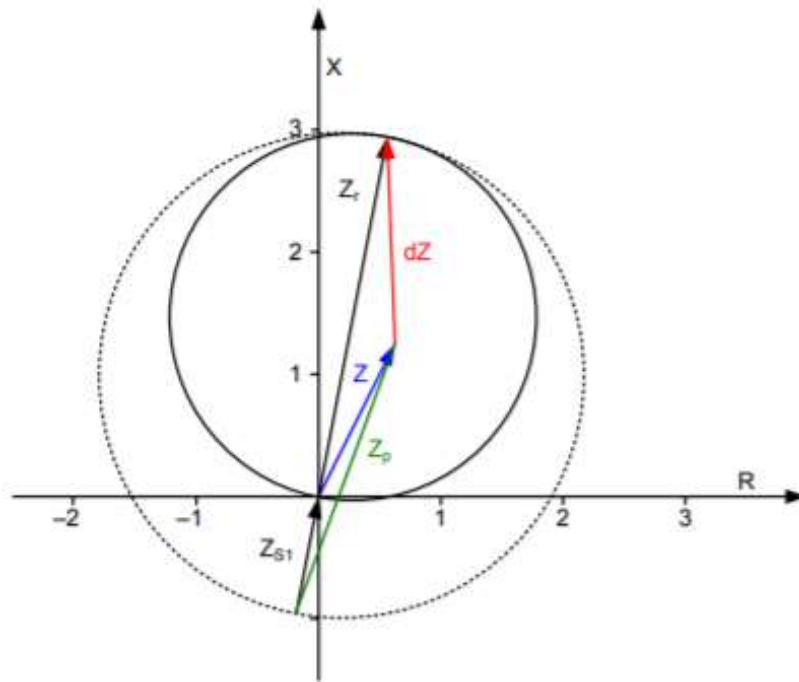
**Tabela 1: Grandezas de polarização.**

<b>Elemento de distância</b>	<b>Grandeza de auto-polarização</b>	<b>Memória de sequência positiva</b>
AG	$V_A$	$V_{A1MEM}$
BG	$V_B$	$V_{B1MEM}$
CG	$V_C$	$V_{C1MEM}$
AB	$V_{AB}$	$V_{AB1MEM}$
BC	$V_{BC}$	$V_{BC1MEM}$
CA	$V_{CA}$	$V_{CA1MEM}$

**Fonte: Autoria própria.**

Durante uma falta de curta distância, a grandeza de auto-polarização é reduzida a valores próximos de zero, enquanto a grandeza de memória decai, partindo de sua leitura pré-falta. Isso faz com que a função mho de memória também varie no tempo e seja maior que a função mho de auto-polarização no instante seguinte ao defeito, decaindo para um valor de regime permanente. Esse efeito de expansão dinâmica da função mho tem o benefício de promover um aumento inicial na cobertura resistiva da circunferência sem que seja alterado o alcance do relé (Figura 5). Em contrapartida, o engenheiro de proteção deve considerar os coeficientes de expansão ao projetar o sistema, de modo a evitar *trips* desnecessários. O cálculo dos coeficientes de expansão mho são discutidos detalhadamente por Fentie (2016), porém não são o objetivo principal deste trabalho.

Figura 5: Expansão da função mho.



Fonte: Fentie (2016).



### 3. EQUIPAMENTO AVALIADO

A unidade de teste de proteção ERP-UB é uma versátil bancada de testes para esquemas de proteção de SEPs. O ERP-UB é dotado de um conveniente módulo de instrumentação, saídas e entradas bem definidas e interface de usuário amigável, tornando-o um excelente equipamento para uso didático.

Além disso, os relés digitais que compõem o sistema são dispositivos amplamente consolidados na indústria de proteção de SEPs, fazendo com que o conhecimento adquirido com o ERP-UB transcenda o laboratório.

Sua estrutura modular garante versatilidade e escalabilidade ao equipamento, sendo possível a aquisição de novos módulos, combinação de relés com diferentes funções de proteção, e até mesmo a integração da unidade a outros equipamentos externos.

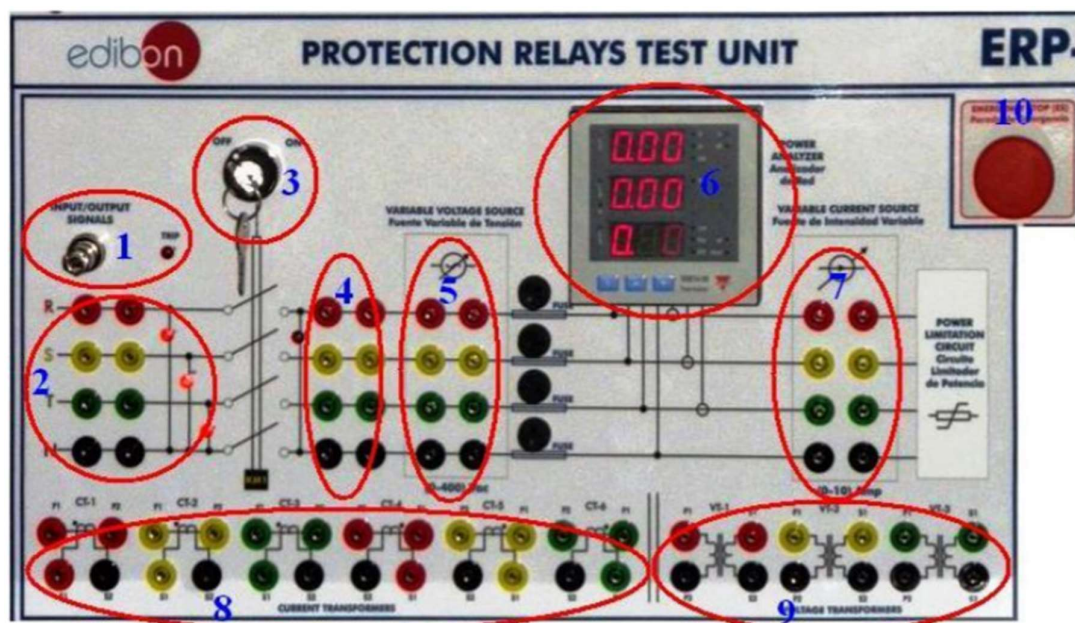
Esta seção se propõe a descrever cada um dos módulos essenciais para a realização deste trabalho.

**ATENÇÃO:** O ERP-UB possui proteção térmica para condições de carga elevada. Em caso de disparo da proteção térmica, aguardar 10 a 20 minutos antes de religar a bancada. Se esse tempo não for respeitado, há risco de danificar os dispositivos da bancada.

#### 3.1. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE CONTROLE E MEDIÇÕES

Este módulo é composto por duas partes, com um botão de parada de emergência comum entre ambas. As Figuras 6 e 7 representam os lados esquerdo e direito do módulo, respectivamente:

Figura 6: Lado esquerdo do módulo de controle e medições.

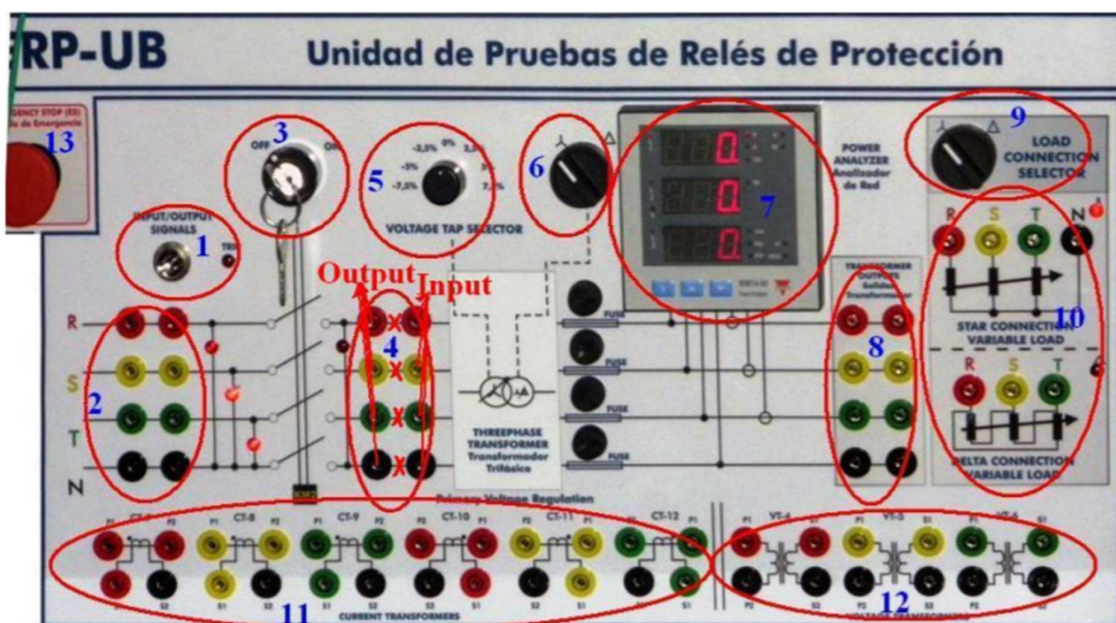


Fonte: Edibon, (2014).

Elementos da figura:

1. Indicador de *TRIP* e conector do cabo de comunicação com os relés;
2. Saída da geração de tensão trifásica;
3. Chave de segurança da fonte;
4. Segunda saída da geração de tensão trifásica;
5. *Taps* de variação da tensão de saída;
6. Interface de medições;
7. Saída da geração de corrente trifásica;
8. Transformadores de corrente com relação  $CTR = 50/5 = 10$ ;
9. Transformadores de potencial com relação primária  $400/\sqrt{3}$  e secundária  $110/\sqrt{3}$ .  
 $PTR = 3,64$ ;
10. Botão de parada de emergência.

Figura 7: Lado direito do módulo de controle e medições.



Fonte: Edibon, (2014).

Elementos da figura:

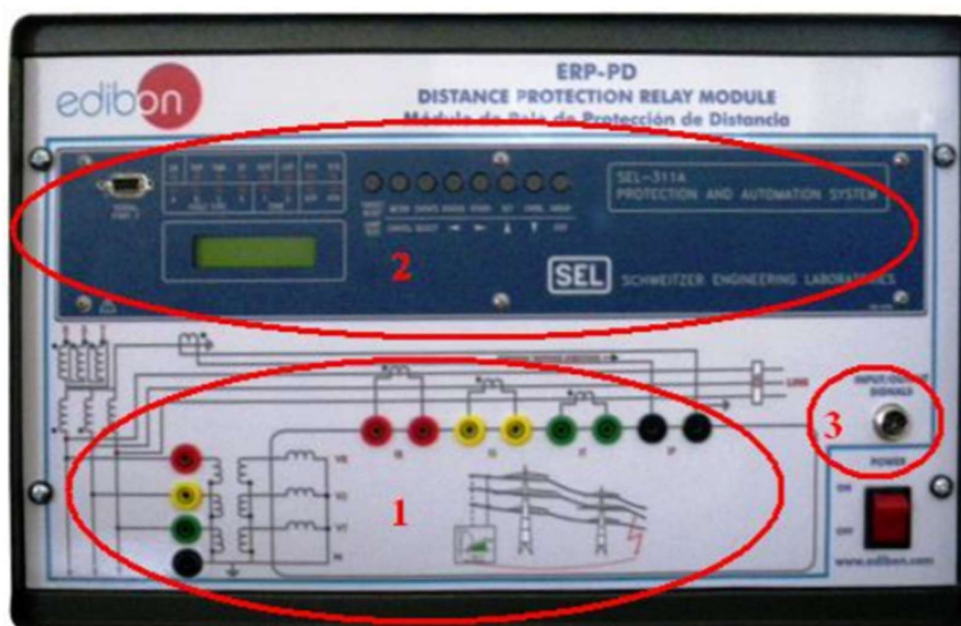
1. Indicador de *TRIP* e conector do cabo de comunicação com os relés;
2. Primário da primeira saída da geração de tensão trifásica;
3. Chave de segurança da fonte;
4. Secundário da primeira saída da geração de tensão trifásica;
5. *Taps* de variação da tensão de saída primária;
6. Seleção de tipo de conexão do secundário;
7. Interface de medições;
8. Segunda saída da geração de tensão trifásica;
9. Seleção do tipo de carga;
10. Terminais de conexão da carga;
11. Transformadores de corrente com relação  $CTR = 50/5 = 10$ ;

12. Transformadores de potencial com relação primária  $400/\sqrt{3}$  e secundária  $110/\sqrt{3}$ .  
 $PTR = 3,64$ ;
13. Botão de parada de emergência.

### 3.2. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

O SEL-311C é um Relé de Proteção Multifunção para Linhas de Transmissão. Esse módulo já tem as entradas analógicas do relé convenientemente conectadas ao painel frontal. A figura 8 demonstra o painel frontal do módulo.

Figura 8: Módulo de proteção de distância com o SEL311-C.



Fonte: Edibon, (2014).

1. Contatos de leitura dos TC e TP;
2. Painel frontal do dispositivo;
3. Conector do cabo de comunicação com módulo de controle.

Principais características do SEL311-C:

“Proteção de distância:

Aumente o carregamento da linha de transmissão, reduza os danos aos equipamentos e melhore a estabilidade do sistema com elementos de distância de fase e terra. O relé de proteção SEL-311C fornece quatro zonas de elementos de distância de fase e terra do tipo mho, além de quatro zonas de elementos de distância quadrilateral de terra.

Proteção de distância subcíclica:

Adicione até três zonas de elementos de distância de fase e terra tipo mho de alta velocidade com o SEL-311C-3, para obter tempos de atuação menores do que um ciclo.

Detecção de falha do disjuntor:

Detecte rapidamente uma falha no disjuntor com um elemento de alta velocidade que reseta em menos de um ciclo após a operação com sucesso do disjuntor, mesmo com a presença de uma corrente residual de decaimento (“*subsidence current*”).

Religamento:

Restabeleça o serviço após faltas temporárias usando o religamento automático com até quatro tentativas programáveis e lógicas de supervisão para verificação de sincronismo e tensão. A função de checagem de sincronismo é capaz de compensar o tempo de fechamento do disjuntor e as diferenças de frequência, magnitude e ângulo entre as duas fontes de tensão.

Localização de faltas:

Calcule com as medições da distância até a falta usando o localizador de faltas baseado em impedância.

Rejeição de carga:

Opere seis níveis de elementos de frequência, tanto como elemento de subfrequência quanto de sobrefrequência. Os elementos de frequência são adequados para aplicações como sistemas de controle de restabelecimento e rejeição de carga por subfrequência.

Esquemas de abertura assistidos por comunicação:

Configure a proteção para linhas de transmissão sem necessidade de quaisquer dispositivos de coordenação externos. O SEL-311C inclui ajustes para os esquemas de transferência de trip por sobre alcance permissivo (POTT: “*Permissive Overreaching Transfer Trip*”), desbloqueio por comparação direcional (DCUB: “*Directional Comparison Unblocking*”) e bloqueio por comparação direcional (DCB: “*Directional Comparison Blocking*”).

Trip e bloqueio por perda de sincronismo:

Detecte oscilações de potência estáveis ou instáveis usando a lógica de detecção de perda de sincronismo. Melhore a segurança com o bloqueio por perda de sincronismo para bloquear os elementos de distância durante condições de oscilações estáveis. Ou, implemente o *trip* por perda de sincronismo durante condições de oscilações de potência instáveis para manter um equilíbrio entre carga e geração.

Lógica de perda de potencial para uma operação segura:

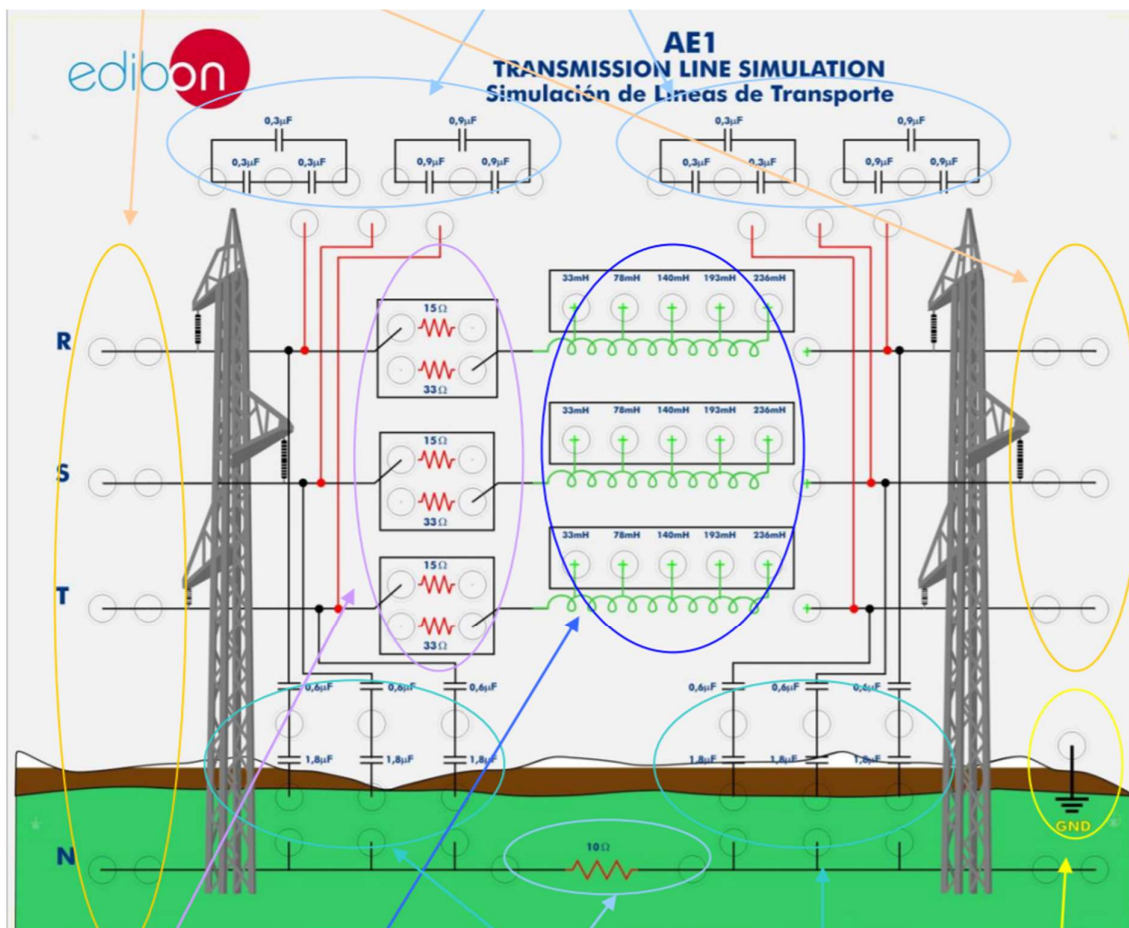
Use a lógica de perda de potencial para detectar fusíveis queimados no transformador de potencial (TP) e desativar os elementos de distância e direcionais que são afetados pela tensão. Identifique os transitórios do transformador de potencial com acoplamento capacitivo (CCVT: “*Coupling Capacitor Voltage Transformer*”) durante faltas na Zona 1 através da lógica incorporada. Temporize o elemento de distância durante transitórios do CCVT para evitar um sobre alcance do elemento de distância da Zona 1 e melhorar sua sensibilidade.” (*Schweitzer Engineering Laboratories, 2014*)

### 3.3. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE LINHA DE TRANSMISSÃO (LT)

Esse módulo representa um modelo de linha de transmissão trifásica de alta tensão, configuráveis para três linhas condutoras (R, S e T) e neutro (N) (Figura 9).

Cada uma das fases é representada de acordo com o modelo de parâmetros concentrados, composta por uma resistência em série com uma indutância, e capacitâncias associadas a cada par de condutores, bem como capacitâncias associadas a cada condutor com a terra.

Figura 9: Módulo LT.



Fonte: Edibon, (2014).

1. A parte resistiva é composta por resistores de valor  $15\Omega$  e  $33\Omega$ , e podem ser conectados como desejar-se;
2. A parte indutiva é composta por um único enrolamento de resistência desprezível, com terminações que variam entre 33, 78, 140, 193, e 236mH;
3. A parte capacitiva permite que se conecte os valores de  $0,5\mu\text{F}$  ou  $1\mu\text{F}$  entre condutores, e  $1\mu\text{F}$  ou  $2\mu\text{F}$  entre condutor e terra. As capacitâncias estão disponíveis no início e fim da linha e também podem ser conectadas como desejar-se.

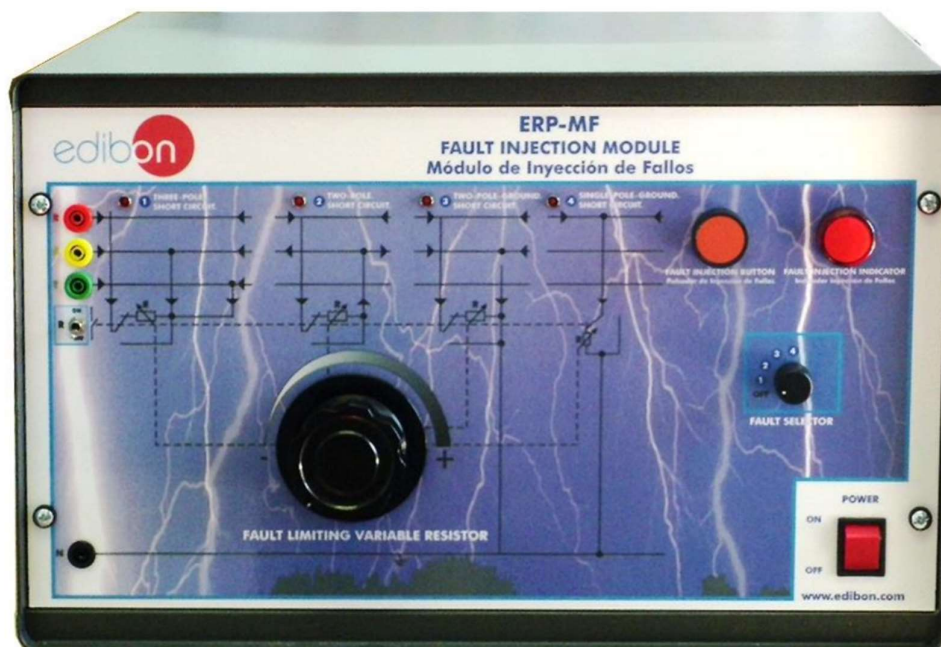
Dessa forma, é possível testar uma variedade de configurações, como linhas desequilibradas, diferentes distâncias de LT simulação de transientes (com o auxílio do módulo de injeção de faltas), etc.

O módulo é protegido por uma conexão com a terra através da caixa metálica. Esse ponto é acessível através de um terminal em seu painel frontal.

### 3.4. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE INJEÇÃO DE FALTAS

O módulo permite que sejam aplicados os principais tipos de curto-circuito em qualquer ponto do sistema. Pode-se definir se a falta é de impedância nula, ou com resistência que pode ser alterada através de um potenciômetro (0~150Ω) no painel frontal. Isso é útil para analisarmos como atuam diferentes configurações de proteção, para diferentes intensidades de falta. Na Figura 10 demonstra-se o módulo de injeção de faltas.

Figura 10: Módulo de injeção de faltas.



Fonte: Edibon, (2014).

Os tipos de falta disponibilizados pelo módulo ERP-MF são:

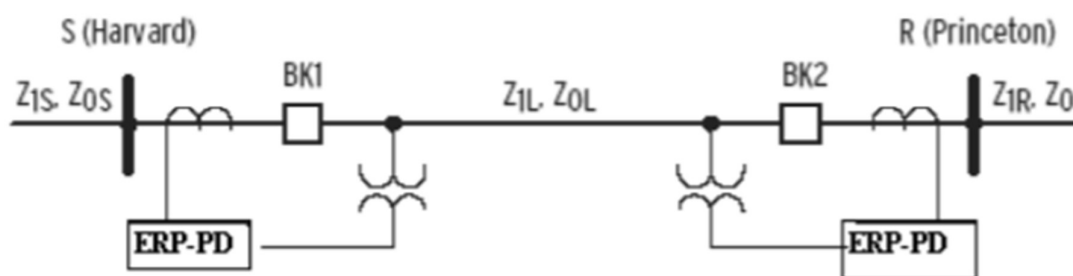
1. Curto-circuito trifásico;
2. Curto-circuito fase-fase;
3. Curto-circuito fase-fase-terra;
4. Curto-circuito fase-terra.

#### 4. ESTUDO DE CASO - PARÂMETROS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Esta seção explicará como encontrar os parâmetros de proteção de distância a partir das características do sistema. O estudo de caso a seguir serve de referência para nos familiarizarmos com os cálculos, e como auxílio para as suas próprias configurações de proteção de distância.

A figura 11 mostra uma LT de 230kV com dois relés de proteção de distância, um em cada terminação da linha. Este exemplo mostrará como calcular os parâmetros do relé na barra S, de modo a proteger a LT de S a R.

Figura 11: Diagrama unifilar do exemplo 1.



Fonte: Edibon, (2014).

Iremos calcular os parâmetros para um esquema de proteção que atue instantaneamente nos primeiros 80% da linha, e com um atraso de tempo no restante da linha com um sobre alcance de 20%. Essas porcentagens são amplamente utilizadas em esquemas de proteção de linhas de transmissão, pois levam em consideração os erros de medição da parte de instrumentação do sistema (Edibon, 2014).

Na tabela 2 descrevem-se as características do sistema:

Tabela 2: Características do sistema do exemplo.

Parâmetro	Valor
Tensão nominal de linha	230 kV
Corrente nominal do relé	5 A secundário
Frequência nominal	60 Hz
Comprimento da linha	50 mi (80,47 km)
Impedância de linha ( $Z_{1L}$ , $Z_{0L}$ )	$39 \Omega < 84^\circ$ , $124 \Omega < 81,5^\circ$
Impedância da fonte S ( $Z_{1S} = Z_{0S}$ )	$50 \Omega < 86^\circ$
Impedância da fonte R ( $Z_{1R} = Z_{0R}$ )	$50 \Omega < 86^\circ$
PTR (número de voltas do transformador de potencial)	$230 \text{ kV} / 115 \text{ V} = 2000$
CTR (número de voltas do transformador de corrente)	$500 \text{ A} / 5 \text{ A} = 100$
Sequência de fases	ABC

Fonte: Autoria própria.

Para calcular os parâmetros de proteção (Tabela 3), é necessário converter os valores de impedância primários para o lado secundário dos instrumentos de medição.

Isso é feito definindo-se o parâmetro  $k = \text{CTR}/\text{PTR}$  que nos dá a relação:

$$Z_{\text{secundario}} = kZ_{\text{primario}}$$

**Tabela 3: Impedâncias de secundário calculadas.**

<b>Parâmetro secundário</b>	<b>Valor</b>
Impedância de linha ( $Z_{1L}, Z_{0L}$ )	$1,95 \Omega < 84^\circ, 6,20 \Omega < 81,5^\circ$
Impedância da fonte S ( $Z_{1S} = Z_{0S}$ )	$2,50 \Omega < 86^\circ$
Impedância da fonte R ( $Z_{1R} = Z_{0R}$ )	$2,50 \Omega < 86^\circ$

**Fonte: Autoria própria.**

Dessa forma, para definir as zonas de proteção desejadas, configuramos os parâmetros expostos na Tabela 4 no software AcSELEator, que é o ambiente de programação dos dispositivos da SEL:

**Tabela 4: Parâmetros de proteção do relé para o exemplo.**

<b>Característica de proteção</b>	<b>Valor</b>
Alcance da proteção de fase da Zona 1 (Z1P)	$0,8Z_{1L} = 1,56 \Omega$
Alcance da proteção de fase da Zona 2 (Z2P)	$1,2Z_{1L} = 2,34 \Omega$
Alcance da proteção de terra da Zona 1 (Z1MG)	$0,8Z_{1L} = 1,56 \Omega$
Alcance da proteção de terra da Zona 2 (Z2MG)	$1,2Z_{1L} = 2,34 \Omega$
Atraso do disparo da Zona 1 (Z1D)	0
Atraso do disparo da Zona 2 (Z2D)	20 ciclos
Fator de compensação de sequência zero	$0,7270 < -3,65^\circ$

**Fonte: Autoria própria.**

Como queremos que o alcance da Zona 1 seja de 80% da linha de transmissão, calculamos os respectivos parâmetros (Z1P e Z1MG) de maneira direta. Para a Zona 2, onde desejamos proteger os 20% restantes da linha, recomenda-se estender o alcance em 20% além da linha de transmissão, isso explica a multiplicação pelo fator 1,2.

Para entender por que geralmente é aplicado um atraso de tempo na Zona 2, basta considerar que o sistema a jusante da linha de transmissão em questão certamente possui seus próprios dispositivos de proteção, que serão programados de forma a atuar mais rapidamente que a proteção da Zona 2.

O fator de compensação de sequência zero é responsável por equalizar o alcance das zonas de proteção de fase e terra. É necessário aplicar o fator de compensação quando queremos que as proteções de fase e de terra operem com o mesmo alcance ( $Z1P = Z1MG$ ). Esse valor, denominado  $k_0M1$  nos equipamentos SEL, pode ser calculado com os parâmetros já encontrados do sistema:

$$k_0M1 = \frac{(Z_0 - Z_1)}{3Z_1}$$



## 5. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

O experimento proposto consiste em um esquema de proteção clássico de LT que será chamado de configuração 80-120. A zona 1 da função mho é regulada para um alcance de 80% do comprimento da linha, enquanto a zona 2 apresenta alcance de 120%, ambas em sentido direto.

Foi verificada a atuação dos elementos de proteção de distância do relé de proteção SEL-311C, bem como o funcionamento geral da unidade de testes ERP-UB e seus respectivos módulos. A Figura 12 demonstra o equipamento no momento da realização dos experimentos.

Figura 12: Experimento pronto para ser realizado.



Fonte: Autoria própria.

**IMPORTANTE:** Aplique faltas apenas no terminal 193mH do AE1, pois a máxima corrente suportada pelo módulo é de 2A em operação nominal.

**ATENÇÃO:** Jamais conecte as entradas de medição do relé diretamente no sistema de potência. Sempre utilize os instrumentos de medição (transformadores de corrente e potencial).

### 5.1. MÓDULOS UTILIZADOS

- 1 ERP-UB (Unidade de testes de relés de proteção);
- 1 ERP-PD (Relé de proteção de distância);
- 1 ERP-MF (Módulo de injeção de faltas);
- 1 AE1 (Módulo de linha de transmissão).

### 5.2. CÁLCULO DOS PARÂMETROS

De maneira análoga ao estudo de caso apresentado na seção 4, devemos encontrar os parâmetros de proteção de acordo com as características conhecidas do sistema:

**Tabela 5: Características do sistema do exercício prático.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tensão nominal de linha	220 V
Corrente nominal do relé	5 A secundário
Frequência nominal	60 Hz
Comprimento da linha	100 mi (160,93 km)
Resistência de linha ( $R_{IL}$ )	15 $\Omega$
Reatância de linha ( $X_{IL}$ )	236 mH
PTR (número de voltas do transformador de potencial)	440 V/120 V = 3.64
CTR (número de voltas do transformador de corrente)	10 A/5 A = 2
Sequência de fases	ABC

**Fonte: Autoria própria.**

Um simples método desenvolvido em MATLAB calcula os parâmetros de proteção de distância desejados (Ver Apêndice B). Os valores encontrados foram:

**Tabela 6: Parâmetros de proteção do relé para o exercício prático.**

<b>Característica de proteção</b>	<b>Valor</b>
Alcance da proteção de fase da Zona 1 (Z1P)	0,8 $Z_{IL}$ = 39,68 $\Omega$
Alcance da proteção de fase da Zona 2 (Z2P)	1,2 $Z_{IL}$ = 59,52 $\Omega$
Alcance da proteção de terra da Zona 1 (Z1MG)	0,8 $Z_{IL}$ = 39,68 $\Omega$

Alcance da proteção de terra da Zona 2 (Z2MG)	$1,2Z_{1L} = 59,52\Omega$
Atraso do disparo da Zona 1 (Z1D)	0 ciclos
Atraso do disparo da Zona 2 (Z2D)	0 ciclos
Fator de compensação de sequência zero	$0,11 < -80,4^\circ$

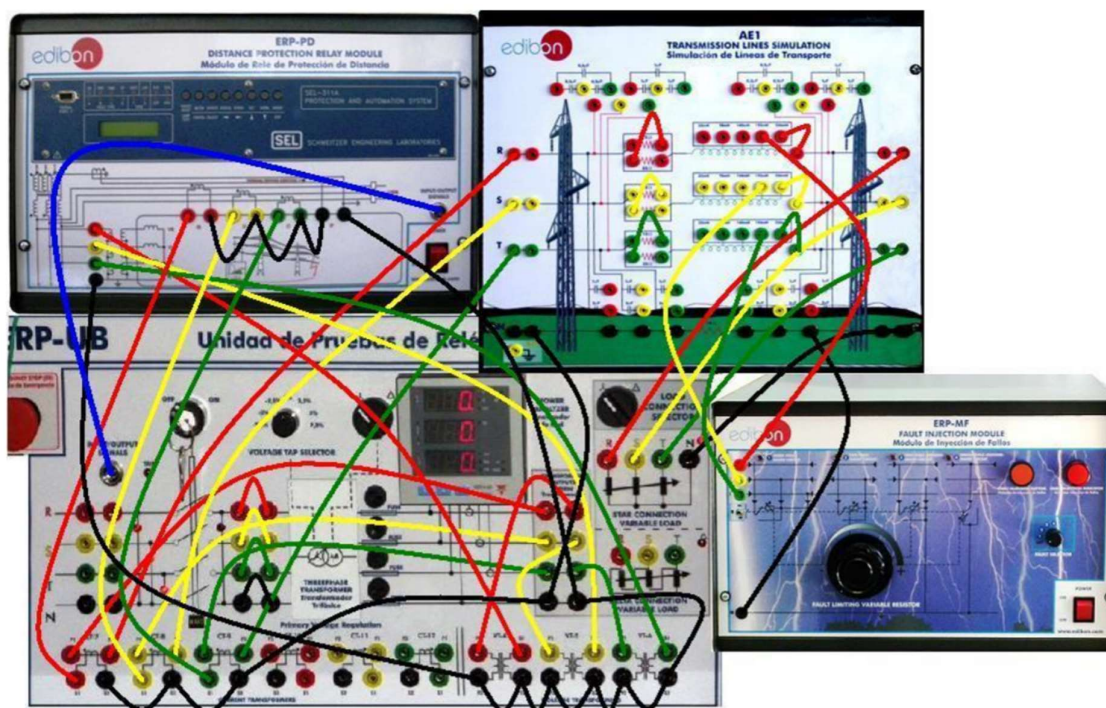
Fonte: Autoria própria.

### 5.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO

O circuito consiste numa fonte de tensão, disjuntor, LT e carga trifásica equilibrada conectada em estrela. O relé recebe as leituras de corrente e tensão dos dispositivos de medição em tempo real, e se comunica com o disjuntor através de um cabo coaxial que troca comandos *trip/close*, bem como a condição atual do disjuntor. Para testar a proteção de distância, o módulo de injeção de faltas aplica corrente de falta através de uma impedância menor do que a impedância de linha nominal.

Na Figura 13 mostram-se as conexões para realização do experimento.

Figura 13: Conexões para realização do experimento prático.

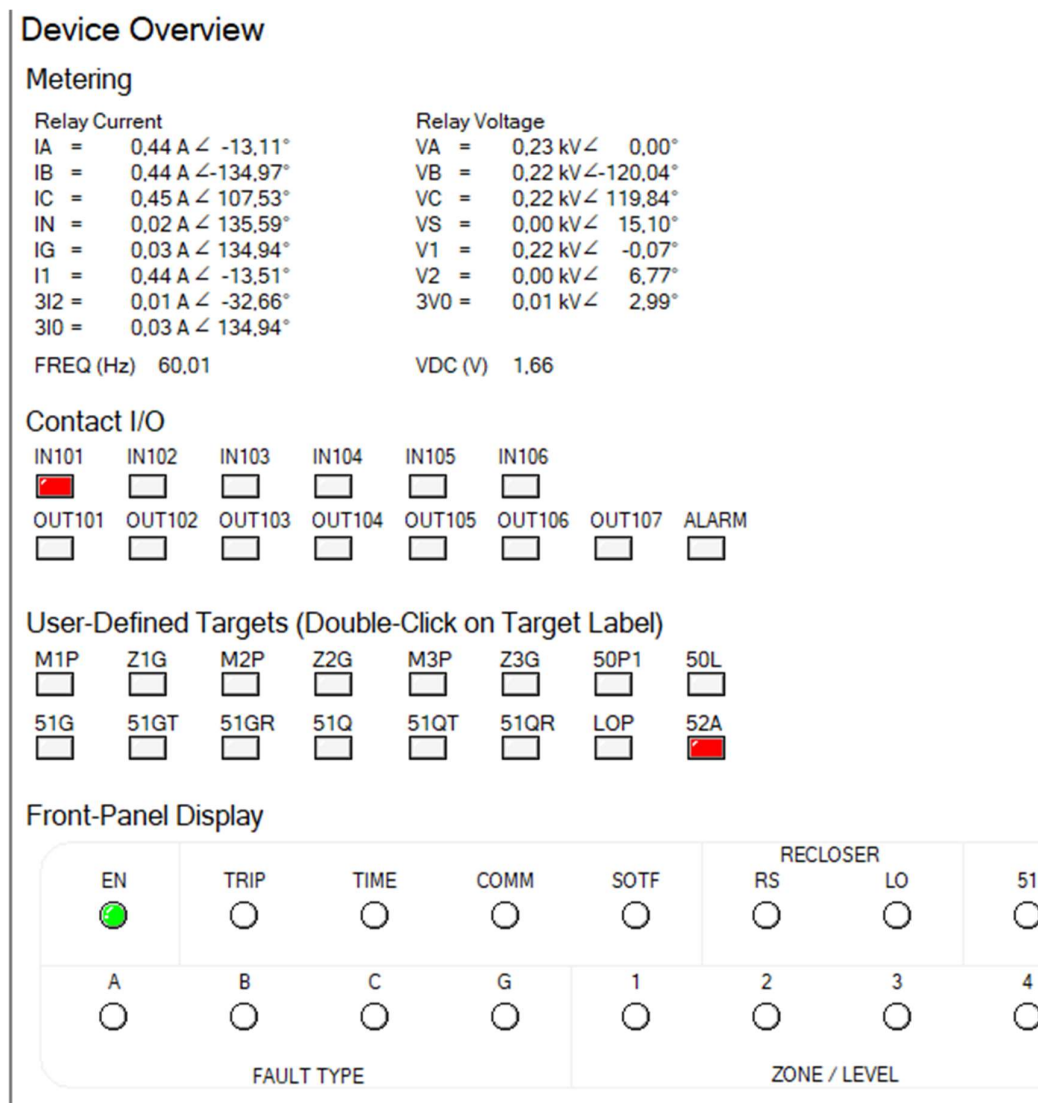


Fonte: Edibon (2014).

Após a atualização das configurações do relé e montagem do circuito experimental, a bancada pode ser energizada através da chave de segurança do módulo de controle e medições. O mostrador digital fornece as leituras de tensão, corrente e carga do sistema. Podemos abrir a

*Human-machine Interface* do relé (HMI) no software AcSELERator para verificar se as leituras do relé coincidem com as leituras do módulo de controle e medições (Figura 14):

Figura 14: HMI do SEL311-C.



Fonte: Autoria própria.

Com o módulo de injeção de faltas, demonstrado na Figura 15, foram aplicados no sistema diversos tipos de defeito: trifásico, bifásico, fase-fase-terra e fase-terra. O relé atuou para todos os casos, enviando um comando de *trip* para o disjuntor. O dispositivo foi capaz de caracterizar a falta, mostrando em seu painel frontal a zona de atuação e o tipo de falta detectada. O relé também gerou relatório sequencial de eventos para todos os defeitos aplicados. Os resultados obtidos serão discutidos na seção seguinte.

Figura 15: Módulo de injeção de faltas energizado e pronto para uso.



Fonte: Autoria própria.

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O *software* da SEL, SynchroWAVE Event Analyzer é uma ferramenta de análise de eventos para os relés de proteção digital da SEL. Nele podemos ler os eventos gerados por disparo definido na equação de geração de SER do relé de proteção, que foi configurada de acordo com a Figura 46, no Apêndice A.

O SynchroWAVE Event Analyzer nos permite ler as entradas analógicas dos instrumentos de medição, os diversos sinais lógicos de interesse do operador, e também plota as funções mho dinâmicas do sistema. A seguir analisaremos os resultados para cada tipo de falta injetada no exercício prático.

### 6.1. FALTA TRIFÁSICA

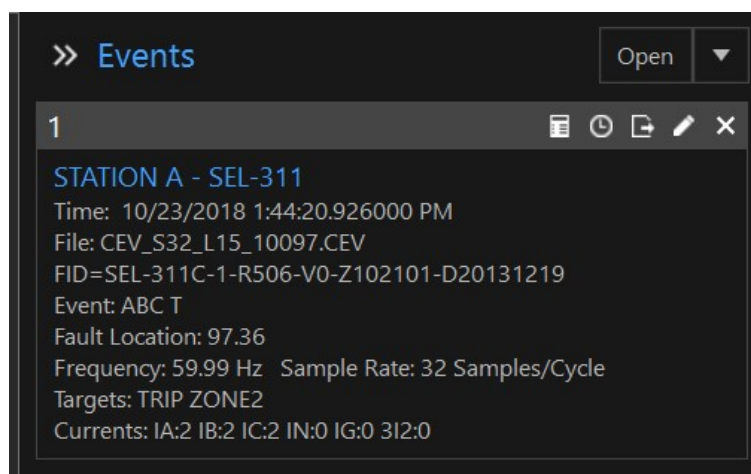
A primeira falta aplicada ao sistema do exercício prático foi do tipo trifásica, como mostrado na Figura 16. De fato, ao visualizarmos o evento gerado pelo *trip* obtido (Figura 17), observamos que todas as correntes de linha disparam antes da ocorrência do *pickup*.

Figura 16: Detecção de falta trifásica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17: Descrição do evento gerado, falta trifásica.

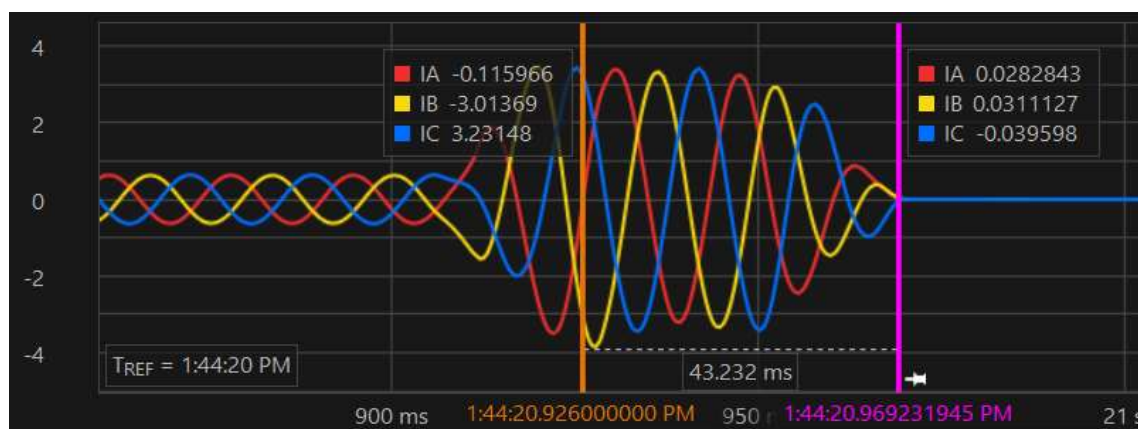


Fonte: Autoria própria.

Como esperado para as configurações do relé, a zona de *pickup* para uma falta localizada em 97,36% da linha é a zona 2.

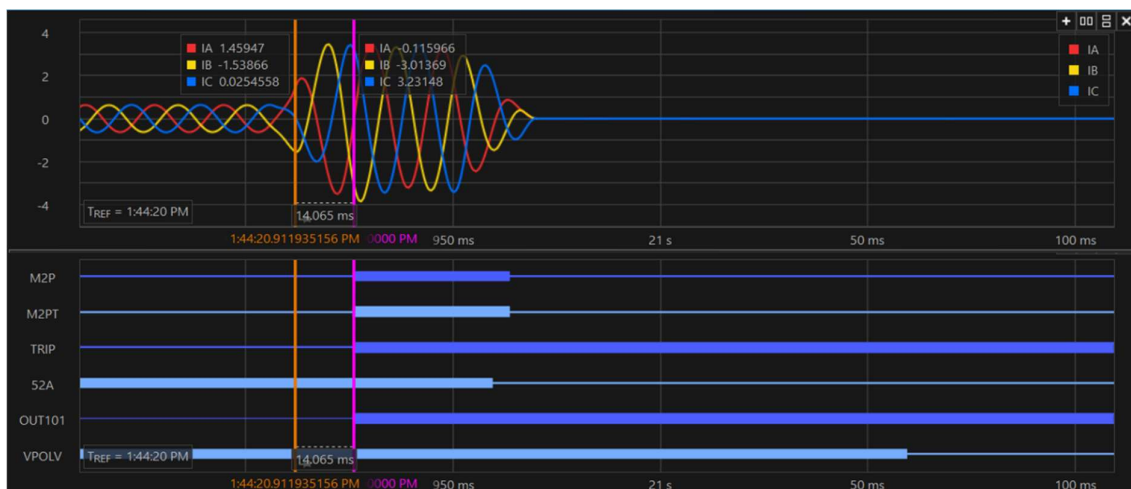
Nota-se a rápida atuação da proteção de distância no intervalo de extinção da corrente de falta. A partir do *pickup* da zona 2, a falta é extinguida em 43,232ms, ou 2,5939 ciclos (Figura 18).

Figura 18: Extinção da corrente de falta, falta trifásica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Intervalo de injeção da falta ao pickup, falta trifásica.



Fonte: Autoria própria.

O sinal lógico VPOLV indica a presença de referência de memória, como discutido na seção 2.3 do trabalho. Observe que ainda há grandeza de referência mesmo após a extinção das tensões e correntes do sistema (Figura 19).

O *software* também plota a evolução do diagrama R-X ao longo do tempo, como mostra a Figura 20:

Figura 20: Diagrama R-X, falta trifásica.



Fonte: Autoria própria.

## 6.2. FALTA FASE-TERRA

A segunda falta aplicada foi entre a fase A e a terra (Figura 21). A falta foi localizada em 111,32% da LT é extinta em 41,694ms, ou 2,5939 ciclos, como mostram as Figuras 22 e 23. Observe que os elementos de *pickup* para esta falta foram os elementos de proteção de distância de terra da zona 4 (Z4G, Z4GT, Z4T). De fato, a falta envolveu uma conexão com a terra, e a zona 4 foi configurada para operar com o mesmo alcance da zona 2 da falta anterior (120% da LT).

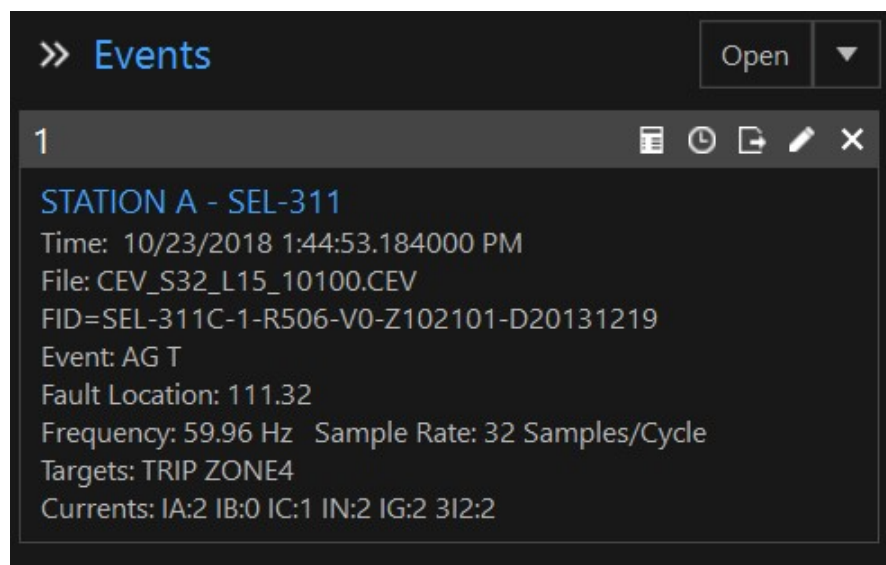


Figura 21: Detecção de falta fase-terra.



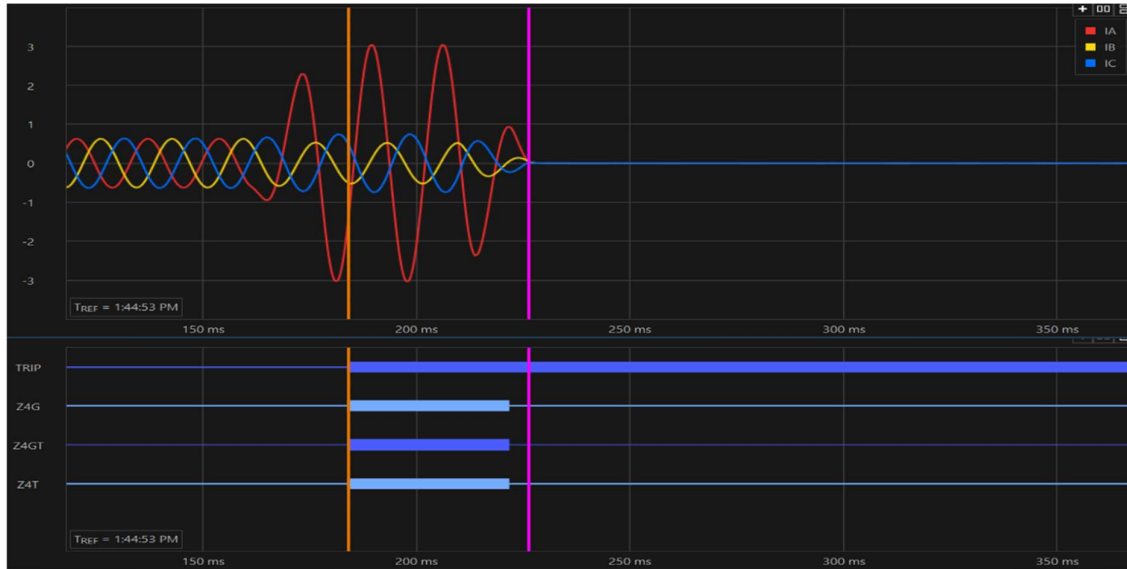
Fonte: Autoria própria.

Figura 22: Descrição do evento gerado, falta fase-terra.



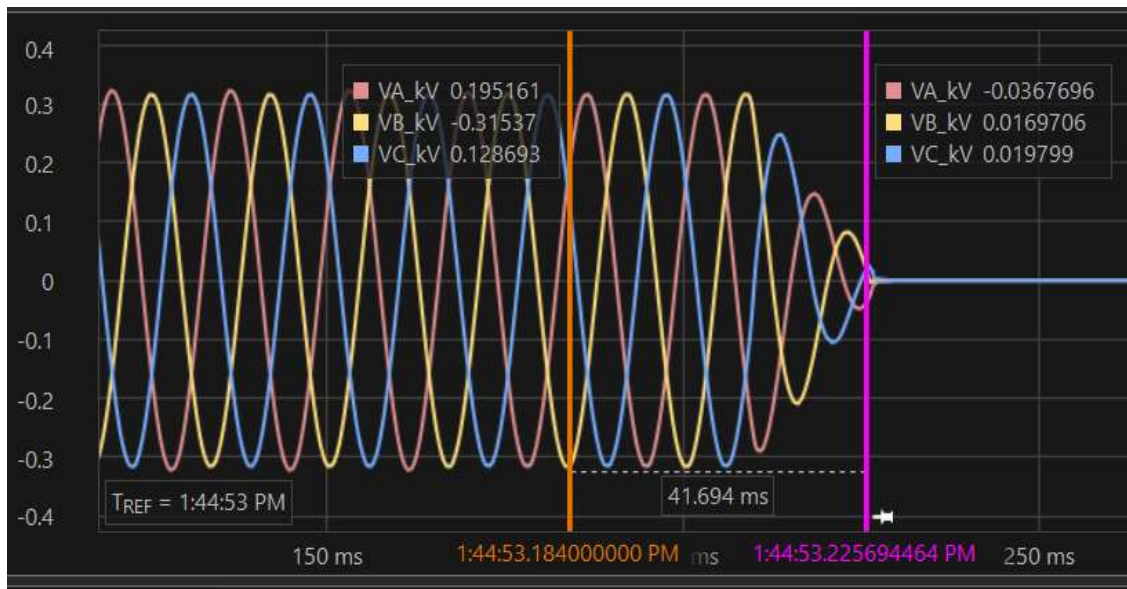
Fonte: Autoria própria.

Figura 23: pickup de elementos da zona 4, falta fase-terra.



Fonte: Autoria própria.

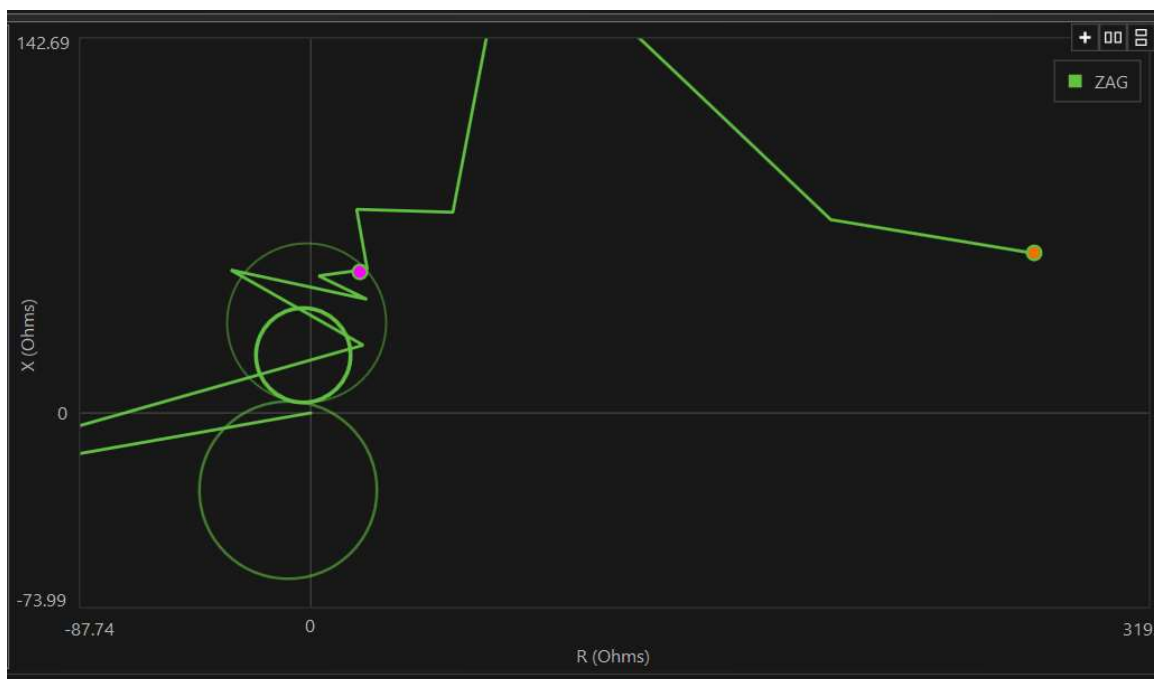
Figura 24: Leitura de tensão proveniente dos TP, falta fase-terra.



Fonte: Autoria própria.

A figura 25 verifica a progressão da impedância de uma condição pré-falta até o momento do *pickup*.

Figura 25: Diagrama R-X, falta fase-terra.

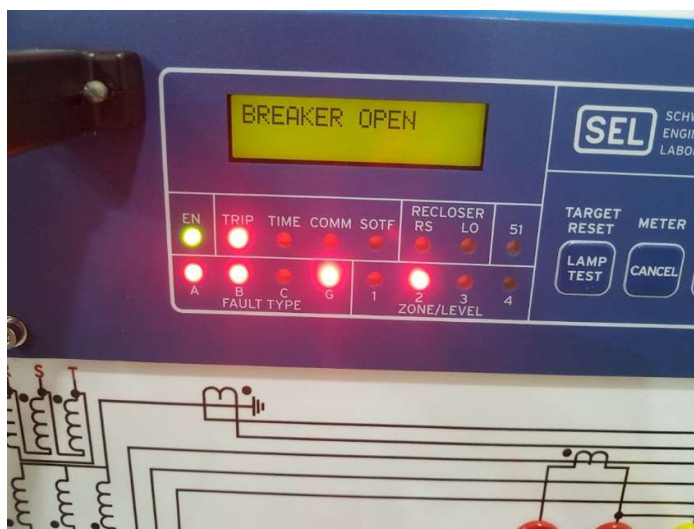


Fonte: Autoria própria.

### 6.3. FALTA FASE-FASE-TERRA

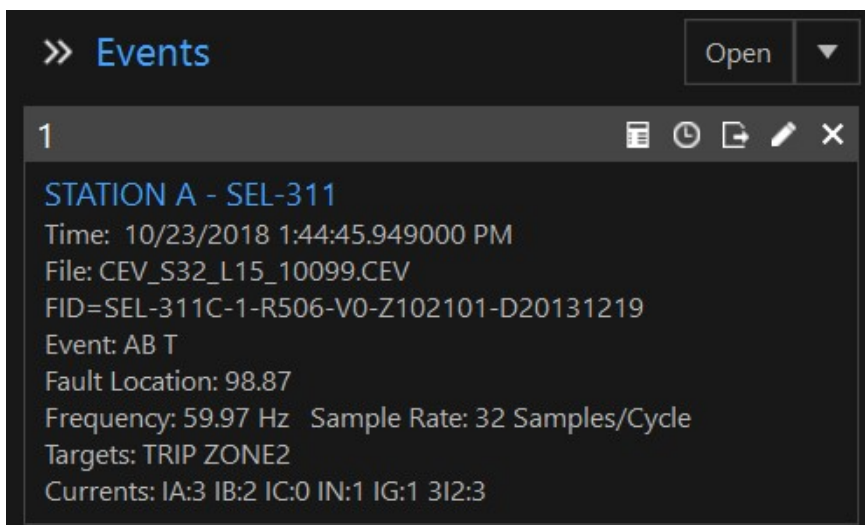
O relé detectou o defeito fase-fase-terra a 98,87% do comprimento da LT (Figura 27) e, portanto, disparou os elementos da zona 2 de proteção, como se verifica no LED da Figura 26.

Figura 26: Detecção de falta fase-fase-terra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Descrição do evento gerado, falta fase-fase-terra.



Fonte: Autoria própria.

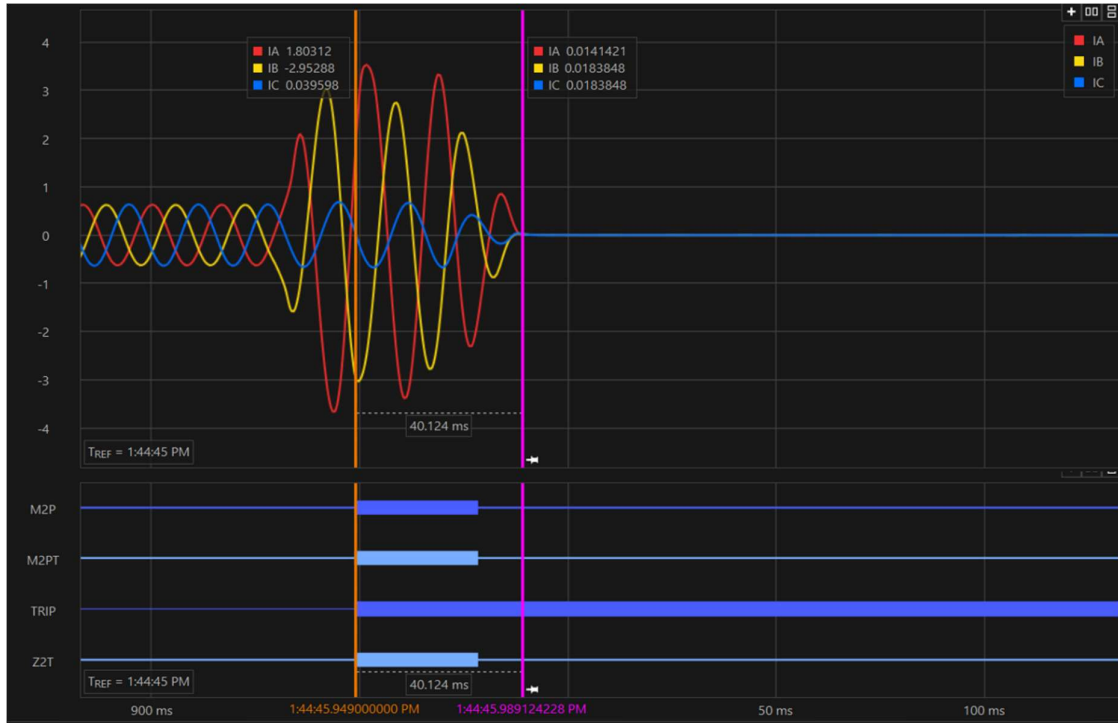
A Figura 28 indica a presença de corrente de defeito pela terra, como esperado. A extinção da corrente de falta levou 40,124ms, ou 2,4074 ciclos (Figura 29). Novamente, o diagrama de impedância está demonstrado na Figura 30.

Figura 28: Corrente de terra IG, falta fase-fase-terra.



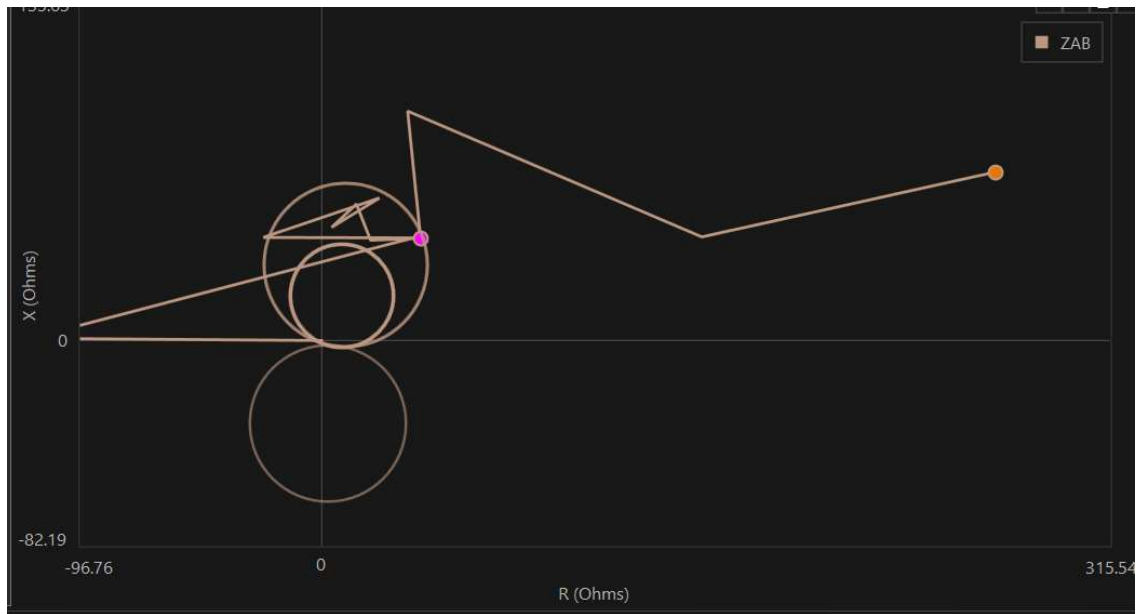
Fonte: Autoria própria.

Figura 29: Extinção da corrente de falta e pickup dos elementos, falta bifásica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Diagrama R-X, falta fase-fase-terra.



Fonte: Autoria própria.

#### 6.4. FALTA FASE-FASE

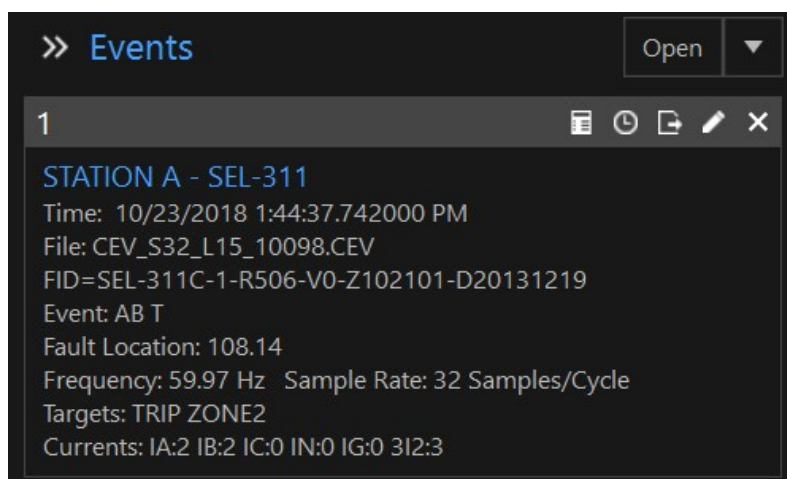
A falta bifásica foi detectada a 108,14% do comprimento da LT, como demonstrado na Figura 32. A corrente foi extinta em 42,204ms, ou 2,5322 ciclos (Figura 33). Os elementos disparados foram os elementos da zona 2 relacionados a proteção de fase (M2P e M2PT). A Figura 34 traz o ponto de operação do relé no momento do *pickup*.

Figura 31: Detecção de falta fase-fase.



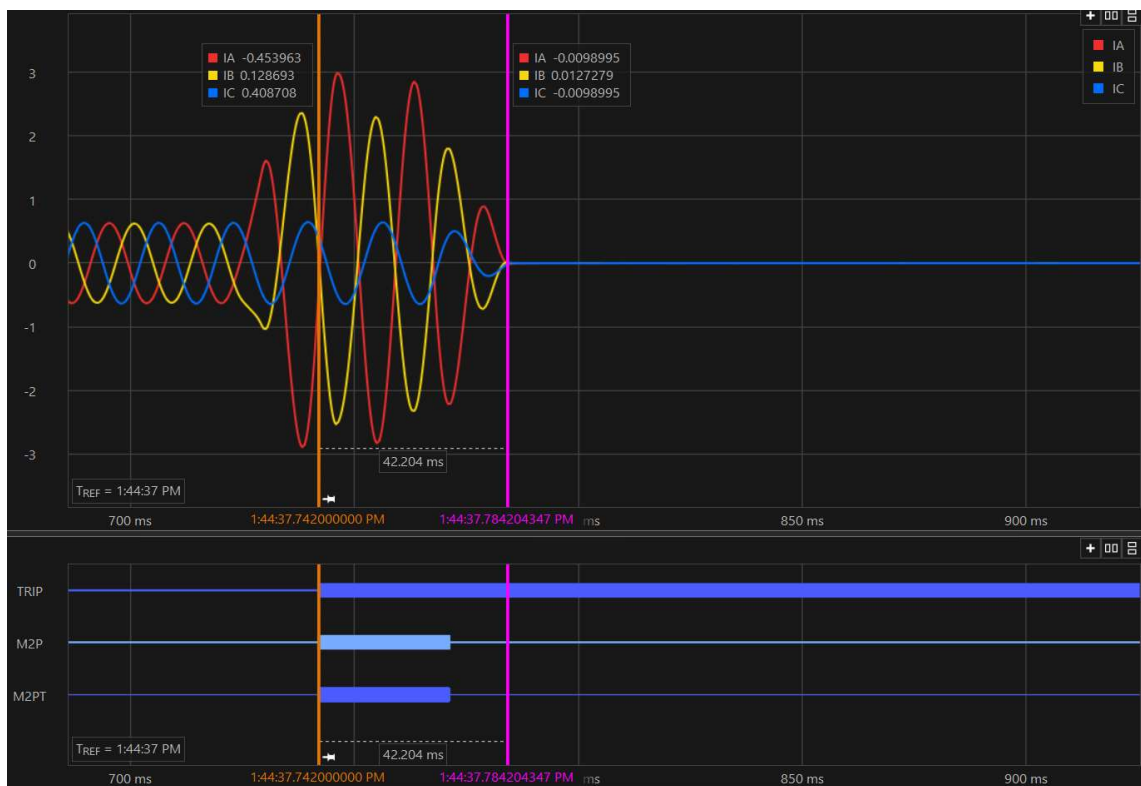
Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Descrição do evento gerado, falta bifásica.



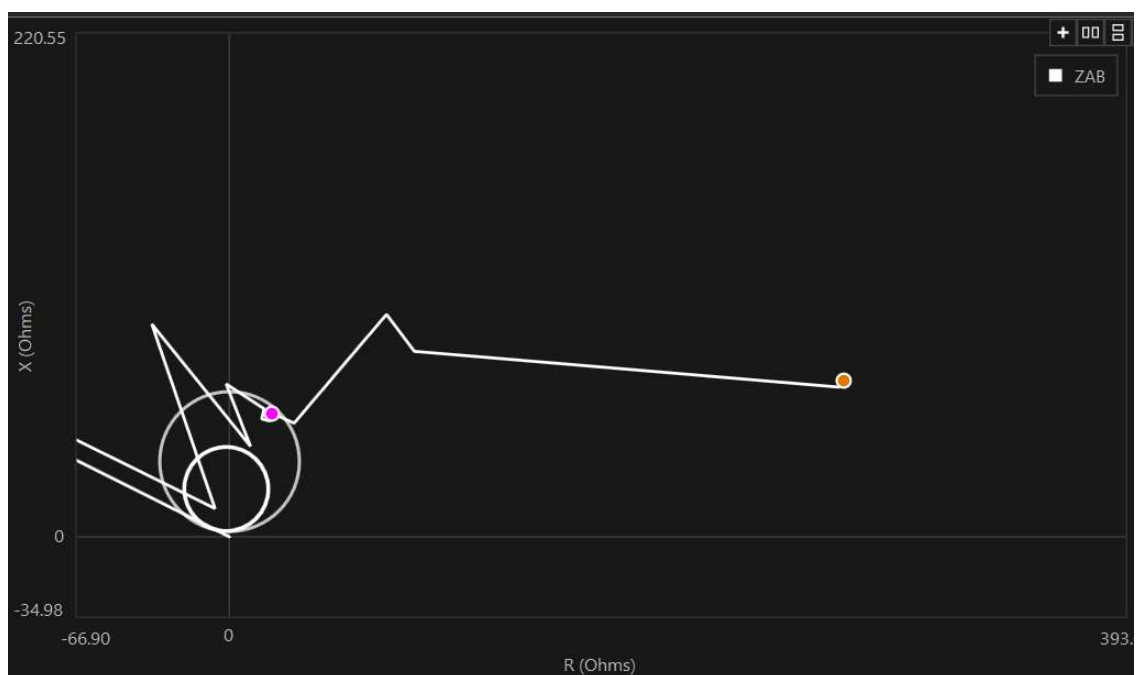
Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Extinção da corrente de falta e pickup dos elementos, falta bifásica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Diagrama R-X, falta bifásica.



Fonte: Autoria própria.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estágio realizado no LSP foi de extrema importância acadêmica e profissional, visto que as áreas de proteção de sistemas elétricos de potência, relés digitais, automação da transmissão e distribuição, e *smart grids* são de grande interesse pessoal do autor desse trabalho.

Durante o estágio, os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação com ênfase em eletrotécnica foram essenciais. A conclusão do trabalho só foi possível graças a conceitos aprendidos em disciplinas como: Circuitos Elétricos I e II, Sistemas Elétricos, Proteção de Sistemas Elétricos, Instalações Elétricas, etc.

O tempo investido em aprender os conceitos de proteção de distância, bem como no estudo da nova unidade de teste de proteção ERP-UB, e na realização de testes em equipamentos utilizados amplamente na indústria de proteção de sistemas elétricos foi extremamente proveitoso.

O SEL311-C atuou como esperado, enviando um comando de abrir para o disjuntor – sempre em intervalo de tempo menor que três ciclos – e gerando um rico relatório de evento para cada uma das faltas aplicadas à linha de transmissão. Os exercícios práticos realizados com a unidade de testes ERP-UB validaram a teoria de elementos de proteção de distância mho disponível na literatura e discutida na seção 3 desse trabalho. Portanto, conclui-se que o objetivo do estágio foi alcançado.



## REFERÊNCIAS

FENTIE, D. “*Understanding the Dynamic Mho Distance Characteristic*”. IEEE 42nd Annual Western Protective Relay Conference. Abril, 2016.

ANDRICHAK, J. G., ALEXANDER, G. E. “*Distance Relay Fundamentals*”. General Electric Co. 2014.

WILKINSON, S. B., MATHEWS, C. A. “*Dynamic Characteristics of Mho Distance Relays*”. General Electric Co.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. “*Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*”. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2014.

PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. “*Fundamentals of Power System Protection*”. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007.

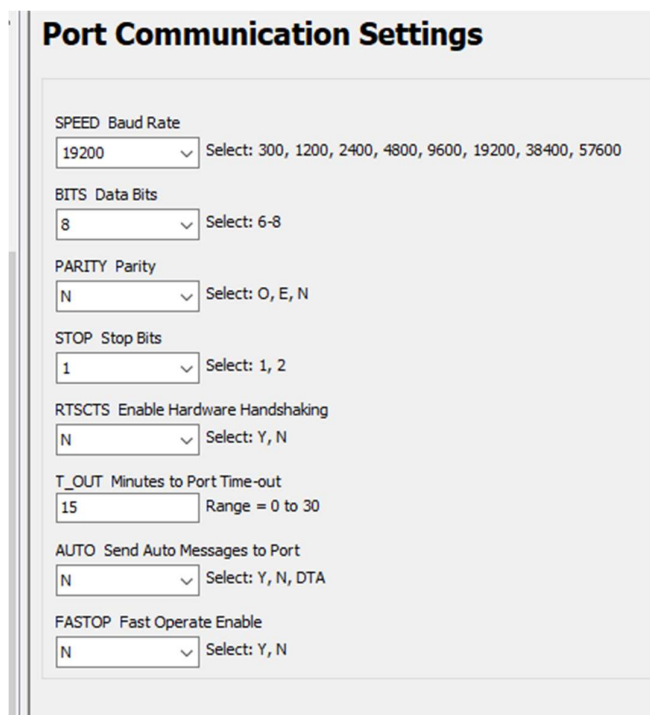
EDIBON: ENGINEERING AND TECHNICAL TEACHING EQUIPMENT. “*ERP-UB Practical Exercises Manual*”. Março, 2014.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. “*SEL-311C Transmission Protection System: Instruction Manual*”. 2014.

## APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DO SEL311-C

Este apêndice aborda a etapa de configuração do relé digital utilizado no exercício prático. A configuração do relé de distância é realizada através do software AcSELERator. Para tal, conecta-se a porta serial F do relé a um computador que tenha o AcSELERator instalado. A comunicação entre computador e relé de distância se dá com as seguintes configurações (Figura 35):

**Figura 35: Port Communication Settings.**



**Port Communication Settings**

SPEED Baud Rate  
 Select: 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600

BITS Data Bits  
 Select: 6-8

PARITY Parity  
 Select: O, E, N

STOP Stop Bits  
 Select: 1, 2

RTSCTS Enable Hardware Handshaking  
 Select: Y, N

T\_OUT Minutes to Port Time-out  
 Range = 0 to 30

AUTO Send Auto Messages to Port  
 Select: Y, N, DTA

FASTOP Fast Operate Enable  
 Select: Y, N

**Fonte: Autoria própria.**

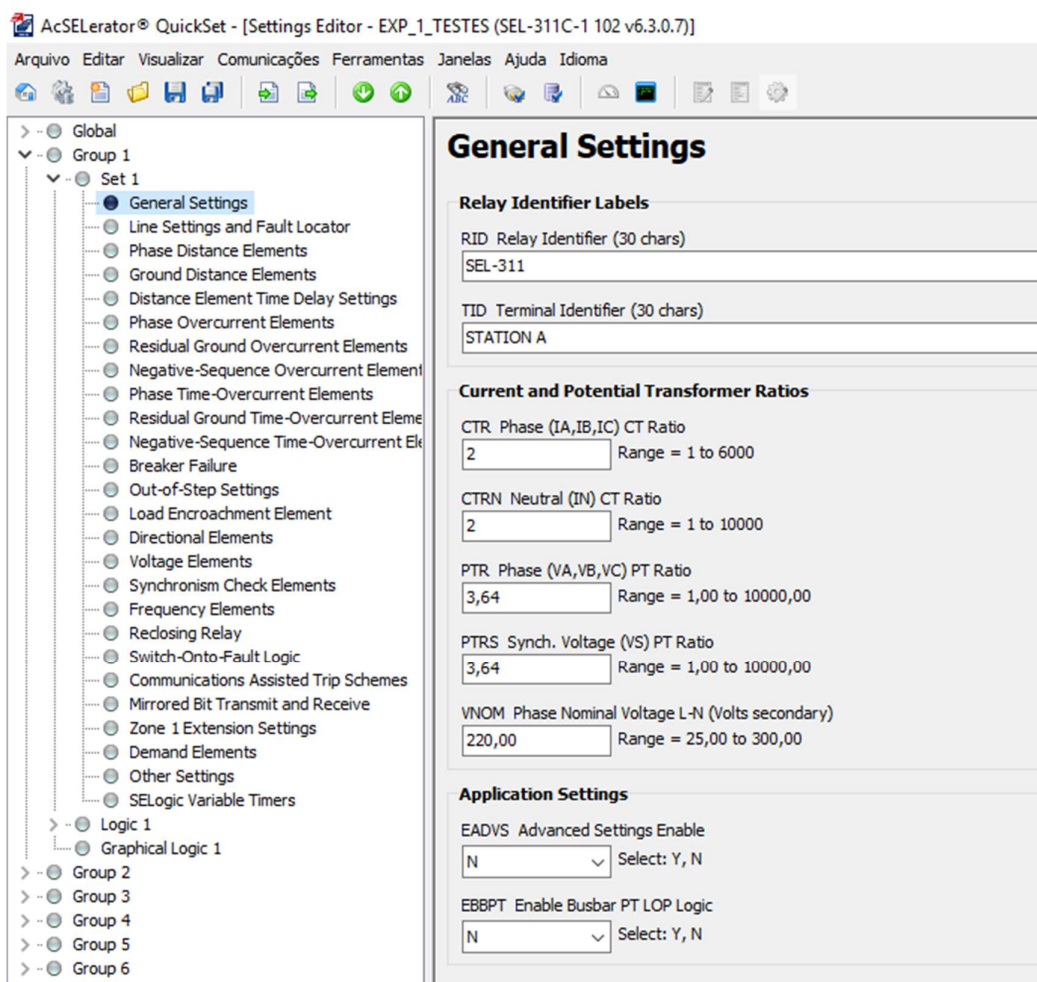
É possível verificar que a conexão teve sucesso no canto inferior esquerdo do AcSELERator, como mostra a Figura 36:

**Figura 36: Confirmação da conexão.**



**Fonte: Autoria própria.**

Em seguida deve-se configurar o dispositivo de proteção para a aplicação desejada. As figuras adiante foram retiradas das configurações ativas do relé de proteção para o experimento em questão. Discutiremos os parâmetros relevantes para o experimento prático.

Figura 37: *General Settings*.

Fonte: Autoria própria.

*General Settings*, ou configurações gerais (Figura 37), é uma das principais abas de configuração do dispositivo. Nela iremos especificar a relação de transformação dos equipamentos de medição utilizados no sistema (TC e TP), bem como a tensão nominal do sistema. Com valores incorretos nessa aba, as leituras de corrente e tensão em tempo real estarão incorretas, fazendo com que o dispositivo de proteção atue de forma indevida ou deixe de atuar quando necessário.

Figura 38: *General.*

AcSElerator® QuickSet - [Settings Editor - EXP\_1\_TESTES (SEL-311C-1 102 v6.3.0.7)]

Arquivo Editar Visualizar Comunicações Ferramentas Janelas Ajuda Idioma

Global

- General
- Optoisolated Input Timers
- Breaker Monitor
- Front Panel LEDs
- Synchronized Phasor Measurement Settings
- DNP Settings
- Time and Date Management Settings

Group 1

- Set 1
  - General Settings
  - Line Settings and Fault Locator
  - Phase Distance Elements
  - Ground Distance Elements
  - Distance Element Time Delay Settings
  - Phase Overcurrent Elements
  - Residual Ground Overcurrent Elements
  - Negative-Sequence Overcurrent Elements
  - Phase Time-Overcurrent Elements
  - Residual Ground Time-Overcurrent Elements
  - Negative-Sequence Time-Overcurrent Elements
  - Breaker Failure
  - Out-of-Step Settings
  - Load Encroachment Element
  - Directional Elements
  - Voltage Elements
  - Synchronism Check Elements
  - Frequency Elements
  - Reclosing Relay
  - Switch-Onto-Fault Logic
  - Communications Assisted Trip Scheme
  - Mirrored Bit Transmit and Receive
  - Zone 1 Extension Settings
  - Demand Elements
  - Other Settings
  - SELogic Variable Timers
- Logic 1
  - Trip/Communication-Assisted Trip Logic
  - Close/Reclose Logic
  - Latch Bits Set/Reset
  - Torque Control
  - Breaker Failure Equations
  - Logic Variable Equations
  - SELogic Variable Timer Inputs
  - Output Contacts
  - LED Equations
  - Display Points
  - Setting Group Selection
  - Other Equations
  - Mirrored Bits Transmit Equations
  - Reset Equations
  - PMU Trigger Equations
  - Graphical Logic 1

Group 2

Group 3

Group 4

## General

**Connection Types**

PTCONN Phase PT Connection  
 WYE Select: DELTA, WYE

VSCONN VS Channel Input  
 VS Select: VS, 3V0

**Setting Group Change Delay**

TGR Group Change Delay (cycles in 0.25 increments)  
 0,00 Range = 0,00 to 16000,00

**Power System Configuration**

NFREQ Nominal Frequency (Hz)  
 60 Select: 50, 60

PHROT Phase Rotation  
 ABC Select: ABC, ACB

**Date Format**

DATE\_F Date Format  
 MDY Select: MDY, YMD

**Front-Panel Display Operation**

FP\_TO Front Panel Timeout (minutes)  
 15 Range = 1 to 30, OFF

SCROLL Display Update Rate (seconds)  
 5 Range = 1 to 60

FPNGD Front Panel Neutral / Ground Display  
 IG Select: OFF, IN, IG

**Event Report Parameters**

LER Length of Event Report (cycles)  
 15 Select: 15, 30, 60, 180

PRE Cycle Length of Prefault in Event Report (cycles)  
 4 Range = 1 to 14

**Station DC Battery Monitor**

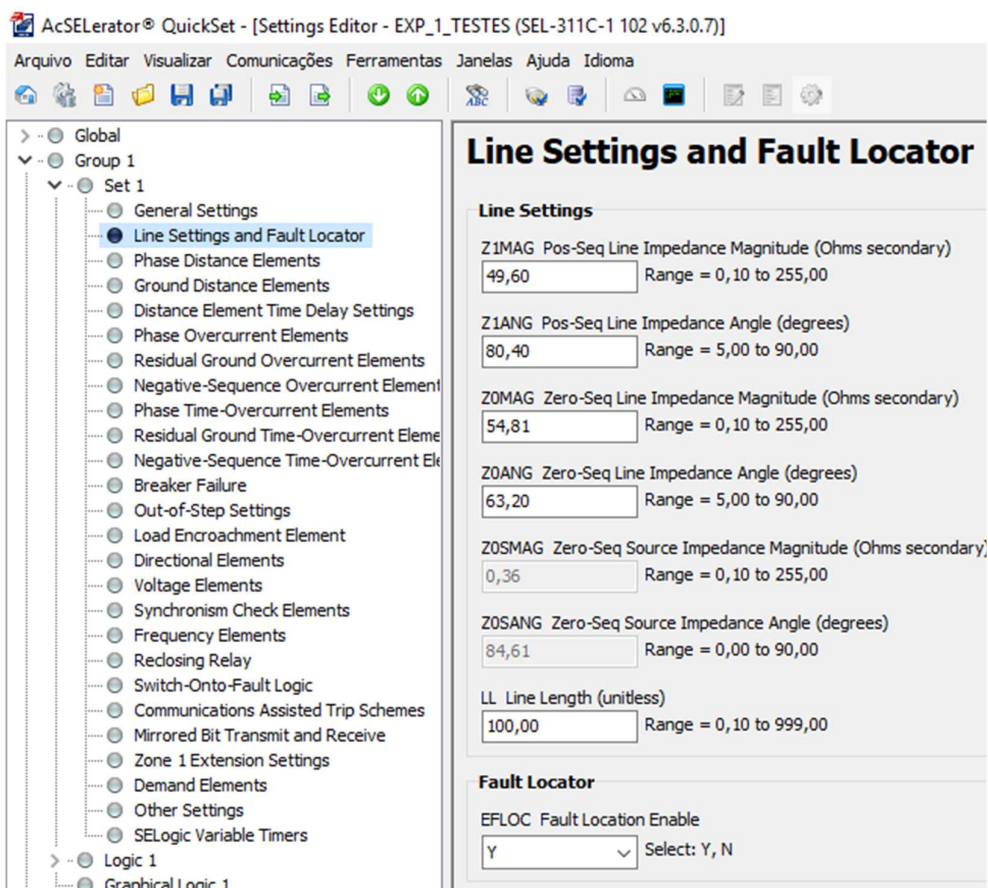
DCLOP DC Battery LO Voltage Pickup (Vdc in 0.02 increments)  
 OFF Range = 20,00 to 300,00, OFF

DCHIP DC Battery HI Voltage Pickup (Vdc in 0.02 increments)  
 OFF Range = 20,00 to 300,00, OFF

Fonte: Autoria própria.

Na aba global informamos o tipo de conexão dos TP, a frequência do sistema, a sequência de fases, algumas configurações do painel frontal do dispositivo, bem como algumas configurações do relatório de eventos (Figura 38).

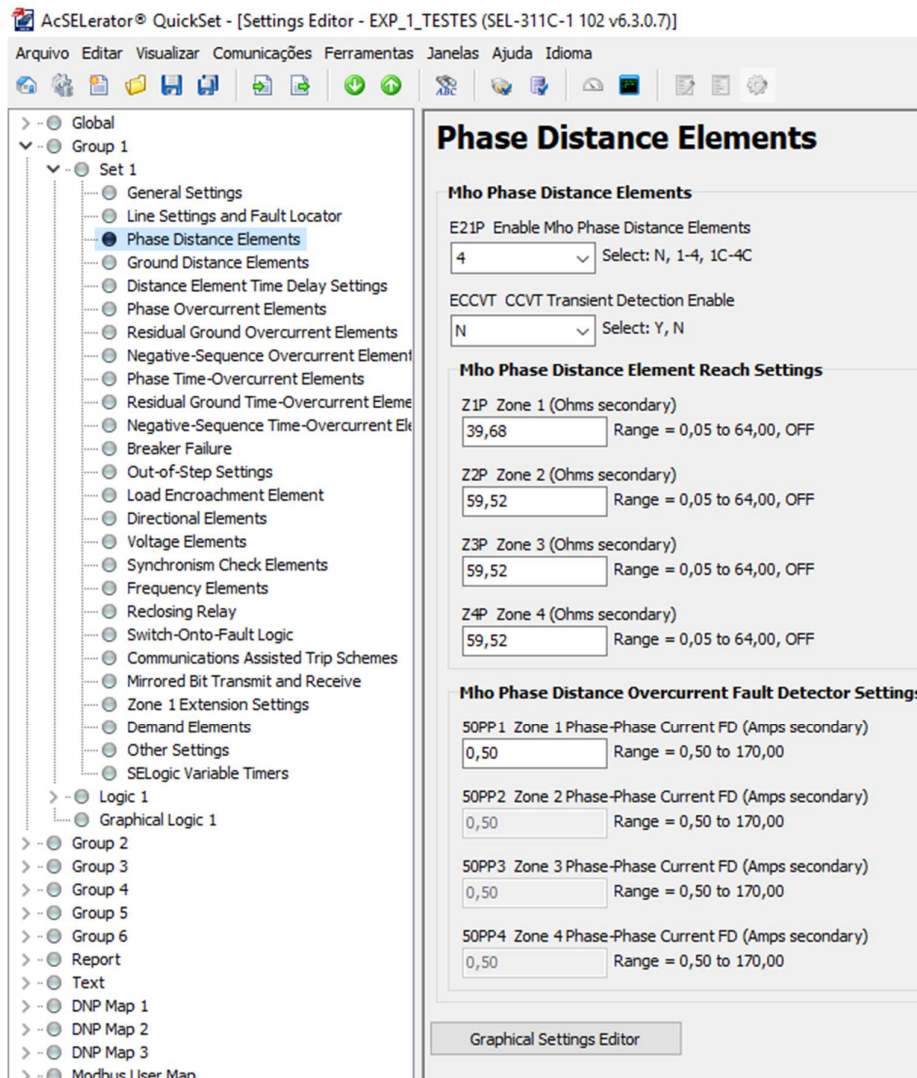
**Figura 39: Line Settings and Fault Locator.**



Fonte: Autoria própria.

Na aba de configurações da linha colocados os parâmetros de impedância refletidos para o secundário dos dispositivos de medição, como mostra a Figura 39. Esses valores são os mesmos que encontramos no método do MATLAB.

**Figura 40: Phase Distance Elements.**



**Fonte: Autoria própria.**

Aqui definiremos o alcance das zonas de proteção de distância de fase, de acordo com o funcionamento desejado para o esquema de proteção. Observe que as zonas três e quatro foram configuradas com o mesmo alcance da Zona 2. Na prática isso é o mesmo que dividir a proteção em duas zonas (Figura 40).

**Figura 41: Ground Distance Elements.**

AcSElerator® QuickSet - [Settings Editor - EXP\_1\_TESTES (SEL-311C-1 102 v6.3.0.7)]

Arquivo Editar Visualizar Comunicações Ferramentas Janelas Ajuda Idioma

**Ground Distance Elements**

**Mho Ground Distance Elements**

E21MG Enable Mho Ground Distance Elements  
4 Select: N, 1-4

Z1MG Zone 1 (Ohms secondary)  
39,68 Range = 0,05 to 64,00, OFF

Z2MG Zone 2 (Ohms secondary)  
59,52 Range = 0,05 to 64,00, OFF

Z3MG Zone 3 (Ohms secondary)  
59,52 Range = 0,05 to 64,00, OFF

Z4MG Zone 4 (Ohms secondary)  
59,52 Range = 0,05 to 64,00, OFF

**Quad Ground Distance Elements**

E21XG Enable Quad Ground Distance Elements  
N Select: N, 1-4

XG1 Zone 1 Reactance (Ohms secondary)  
6,24 Range = 0,05 to 64,00, OFF

XG2 Zone 2 Reactance (Ohms secondary)  
9,36 Range = 0,05 to 64,00, OFF

XG3 Zone 3 Reactance (Ohms secondary)  
1,87 Range = 0,05 to 64,00, OFF

XG4 Zone 4 Reactance (Ohms secondary)  
OFF Range = 0,05 to 64,00, OFF

RG1 Zone 1 Resistance (Ohms secondary)  
2,50 Range = 0,05 to 50,00

RG2 Zone 2 Resistance (Ohms secondary)  
5,00 Range = 0,05 to 50,00

RG3 Zone 3 Resistance (Ohms secondary)  
6,00 Range = 0,05 to 50,00

RG4 Zone 4 Resistance (Ohms secondary)  
0,05 Range = 0,05 to 50,00

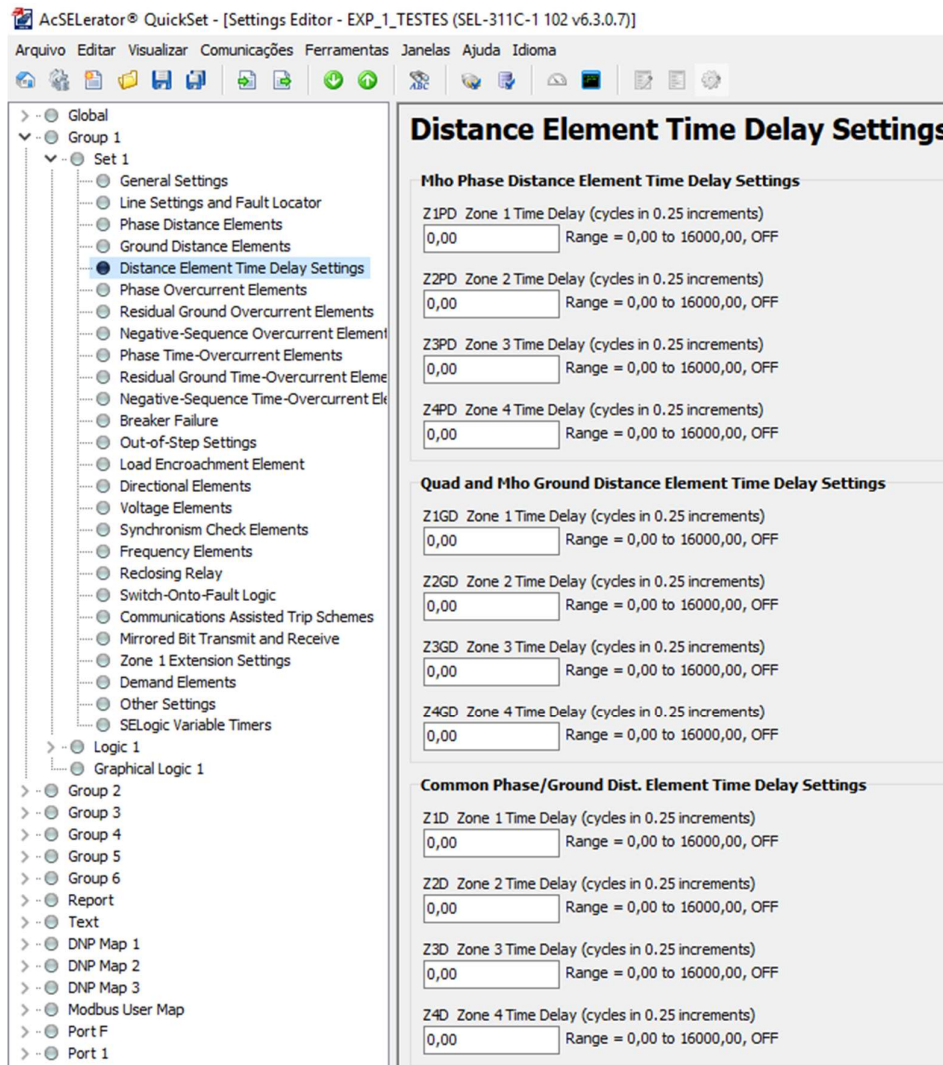
XGPOL Quad Ground Polarizing Quantity  
I2 Select: I2, IG

TANG Non-Homogeneous Correction Angle (degrees)  
-3,0 Range = -45,0 to 45,0

**Fonte: Autoria própria.**

A aba acima define o alcance dos elementos de proteção de distância de terra. Na mesma aba também definimos o parâmetro de compensação de sequência zero, como verificado na Figura 41.

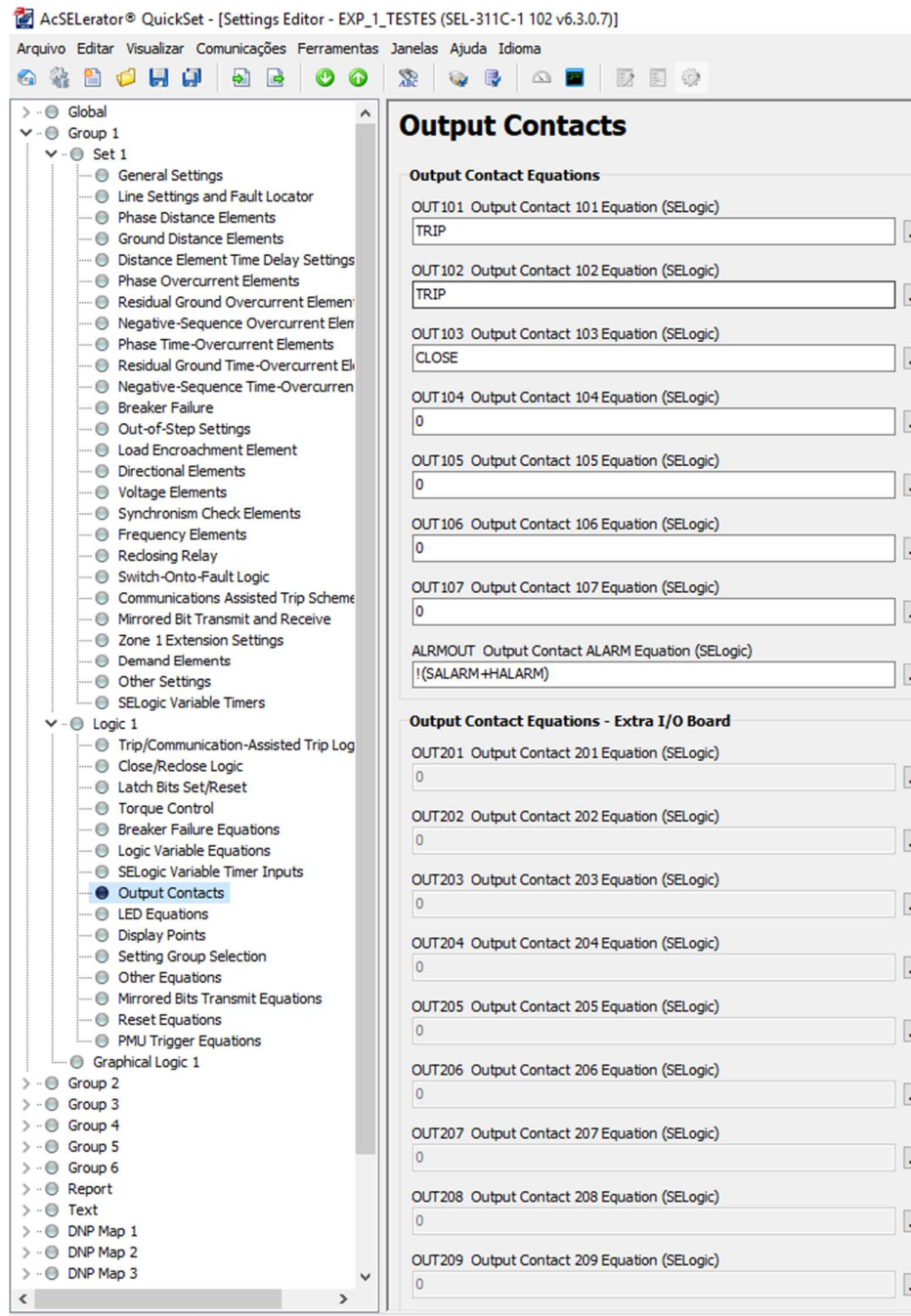
Figura 42: *Distance Element Time Delay Settings.*



Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 traz as configurações de atraso do elemento de distância. Aqui podemos definir o atraso no disparo dos elementos de proteção de distância, em termos de ciclos. No nosso caso,  $1 \text{ ciclo} = \frac{1}{60} \text{ s}$ .

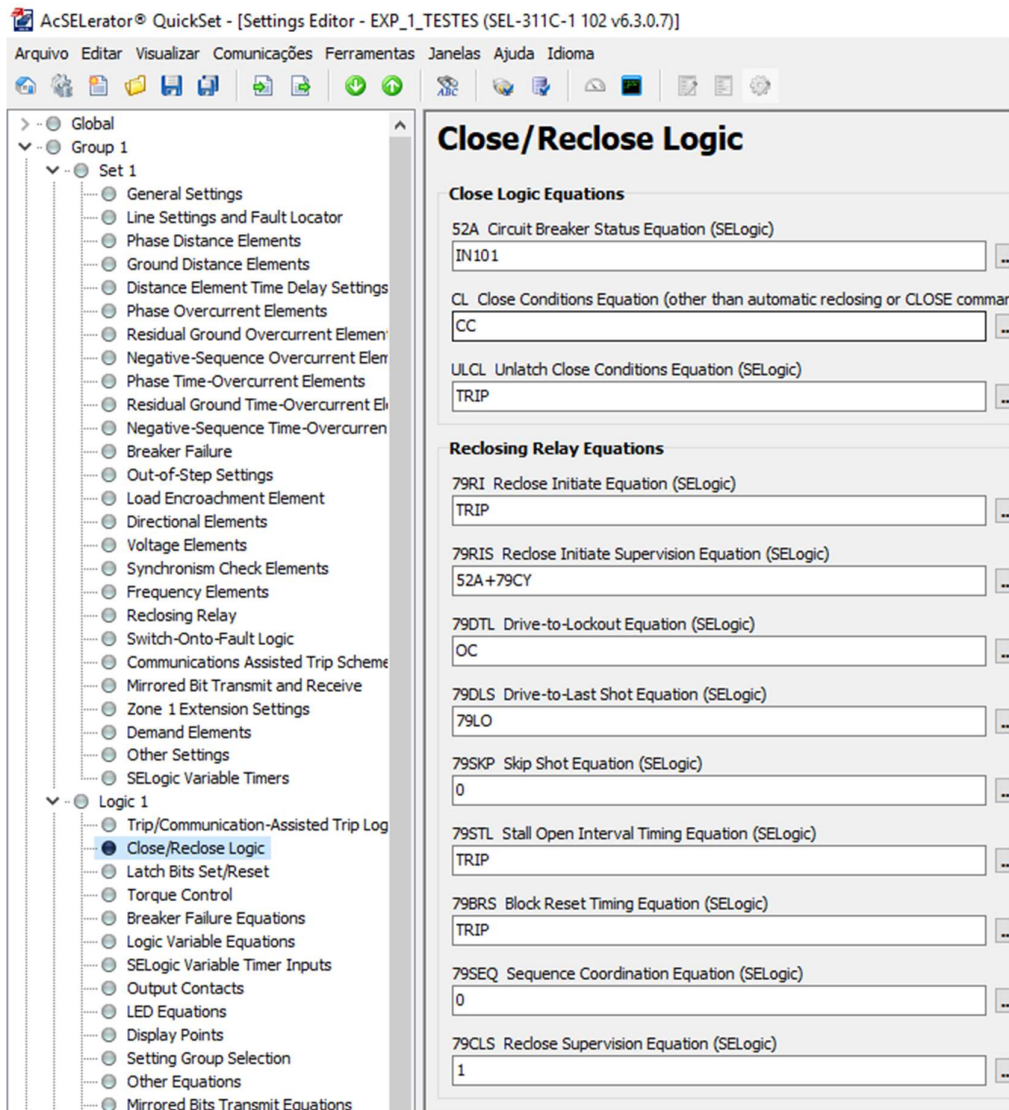


Figura 43: *Output Contacts*.

Fonte: Autoria própria.

*Output Contacts*, ou Contatos de saída (Figura 43), são as saídas lógicas do dispositivo, que podem se comunicar com outros equipamentos. Para a bancada ERP-UB, as portas de saída OUT101 e OUT102 conectam-se à entrada do disjuntor, dando um sinal para o disjuntor abrir na ocorrência de nível lógico alto. OUT103 dá o comando de fechar para o disjuntor.

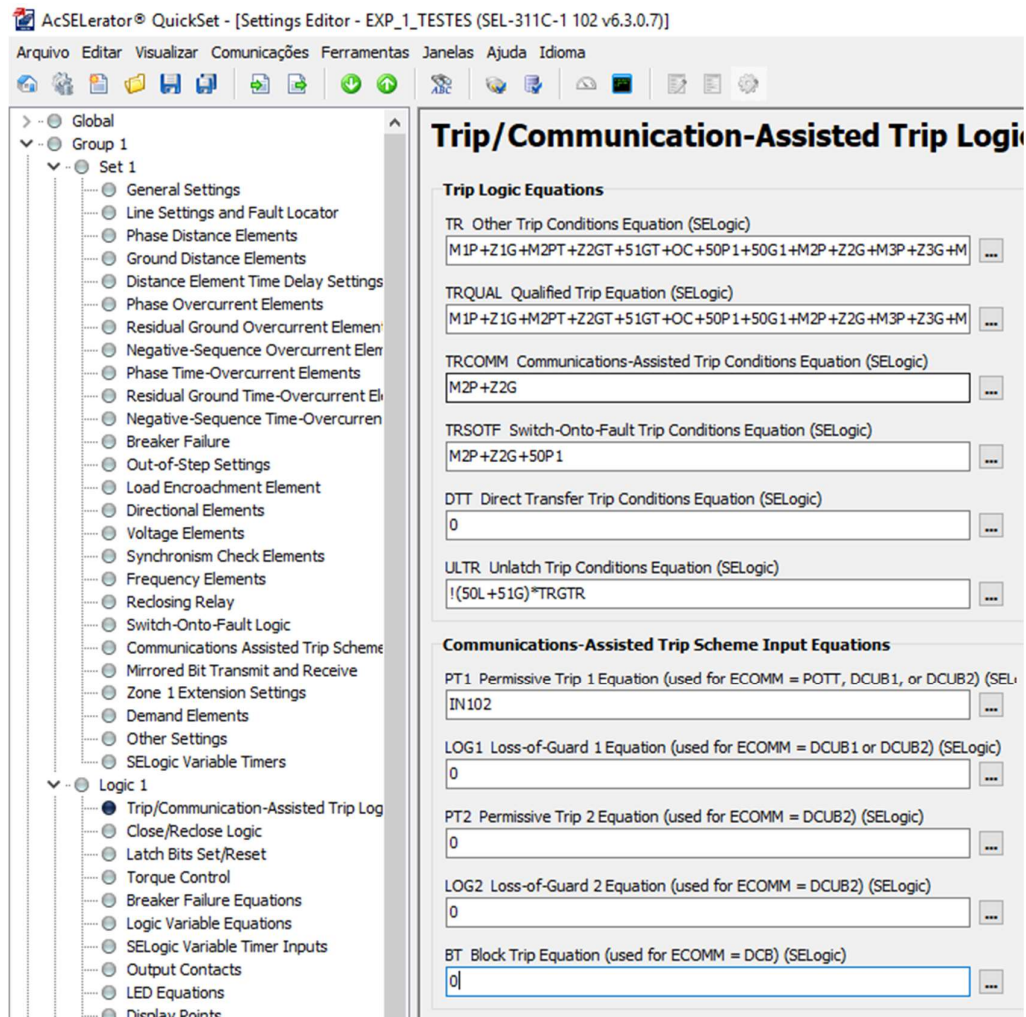
**Figura 44: Close/Reclose Logic.**



**Fonte: Autoria própria.**

*Close/Reclose Logic* é a aba que define as equações lógicas de status do disjuntor (IN101), fechamento do disjuntor, e religamento. Observa-se essa aba na Figura 44.

Figura 45: Trip Logic.

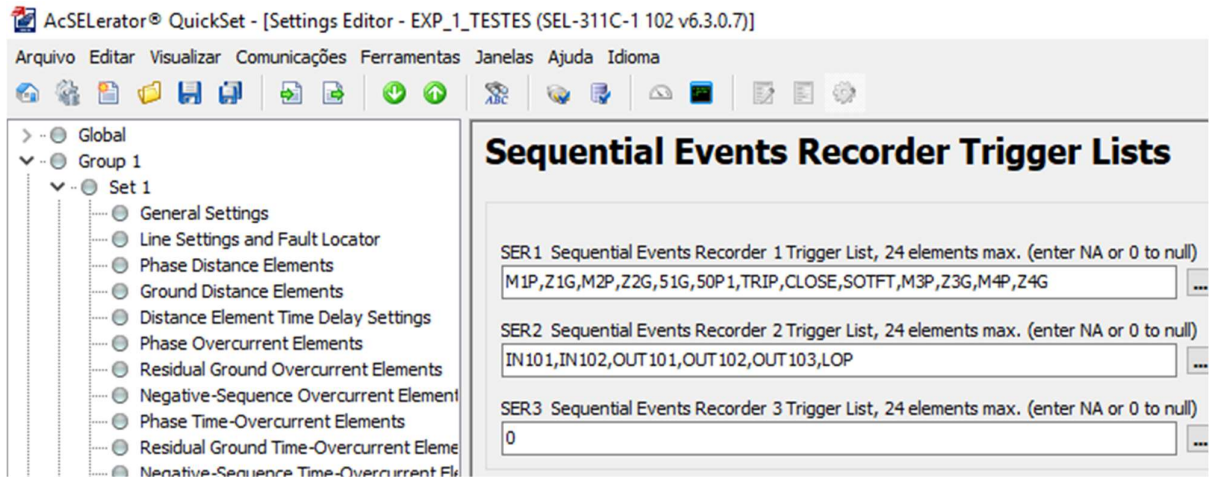


Fonte: Autoria própria.

A aba acima (Figura 45) define a equação lógica que gera os sinais de *TRIP* do relé. Para o nosso caso, os elementos de interesse são os relacionados à proteção de distância: M1P, Z1G, M2P, Z2G. Os outros elementos estão relacionados à outras funções de proteção disponíveis pelo relé.

Note que o elemento OC, ou *Open Command*, muda para o nível alto no momento de execução do comando de abertura do disjuntor. Isso significa que o relé mantém a condição *trip* enquanto o disjuntor mantiver sua posição aberta.

**Figura 46: SER Trigger Lists.**



**Fonte: Autoria própria.**

Na aba de disparo do relatório de eventos, mostrada na Figura 46, definimos a equação lógica que permite a geração dos relatórios sequenciais de evento (SER). Observe que marcamos os elementos de distância, bem como comandos de abertura e fechamento do disjuntor.

## APÊNDICE B – CÁLCULO DOS PARÂMETROS EM MATLAB

```

%RTC e RTP
RTC=10/5;
RTP=(400/sqrt(3))/(110/sqrt(3));
K=RTC/RTP; %relação para o cálculo do secundário

%Resistência e reatância
R=15;
L=236/1000;
XL=2*3.14*60*L; %cálculo da reatância

%Impedância no primário
Z1MAG=R+j*XL;
Zn=10; %impedância de neutro
Z0MAG=Z1MAG+3*Zn;

%Impedância no secundário
Z1MAGs=Z1MAG*K;
moduloZ1MAGs=abs(Z1MAGs);
faseZ1MAGs=angle(Z1MAGs)*180/pi;

Z0MAGs=Z0MAG*K;
moduloZ0MAGs=abs(Z0MAGs);
faseZ0MAGs=angle(Z0MAGs)*180/pi;

%Proteção de distância
Z1P=0.8*moduloZ1MAGs; %zonal = 80%
Z1MG=Z1P;
Z2P=1.2*moduloZ1MAGs; %zona2 = 120%
Z2MG=Z2P;
Z3P=1.2*moduloZ1MAGs; %zonal = 120%
Z3MG=Z3P;

%Fator de compensação de sequência zero
K0=(Z0MAG-Z1MAG)/(3*Z1MAG);
moduloK0=abs(K0);
faseK0=angle(K0)*180/pi;

fprintf('*Z1MAGs = %.2f/_%.1f ohms\n\n', moduloZ1MAGs, faseZ1MAGs)
fprintf('*Z0MAGs = %.2f/_%.1f ohms\n\n', moduloZ0MAGs, faseZ0MAGs)
fprintf('*Zonal: P1Z = P1MG = %.2f ohms\n\n', Z1P)
fprintf('*Zona 2: P2Z = P2MG = %.2f ohms\n\n', Z2P)
fprintf('*Zona 3: P2Z = P2MG = %.2f ohms\n\n', Z3P)
fprintf('*Módulo e fase do fator de compensação de seq0, K0 =
%.2f/_%.1f\n', moduloK0, faseK0)

```