

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATHEUS PIVA GONÇALVES DA SILVA

**INTERFACE DAS CARACTERÍSTICAS DE ZONAS DE ATUAÇÃO DA
PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

MATHEUS PIVA GONÇALVES DA SILVA

**INTERFACE DAS CARACTERÍSTICAS DE ZONAS DE ATUAÇÃO DA
PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Bacharel em Engenharia Elétrica”.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Piva Gonçalves da Silva

Interface das características das zonas de atuação da proteção de distância em linhas de transmissão

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:50hs do dia 22/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

Prof(a). Me(a). João Cesar de Paula Salve - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família e principalmente aos meus pais, por terem proporcionado todo o suporte necessário para que eu pudesse concluir a graduação. Sou grato pelo incentivo e princípios passados durante toda a minha vida e, além disso, os exemplos de responsabilidade, trabalho e dedicação que são para mim.

Agradeço ao Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza pela orientação deste trabalho, pela confiança e apoio depositados em mim para execução do mesmo.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus colegas de universidade, que com certeza facilitaram muito todos estes anos longe de casa e da minha família. Agradeço os amigos de longa data e os que conquistei durante essa caminhada. Obrigado pelas conversas, risadas e momentos de seriedade que passamos juntos. Estes momentos compartilhados certamente estarão para sempre em minha memória, assim como todos vocês.

RESUMO

SILVA, Matheus P. G.. **Interface das características de zonas de atuação da proteção de distância em linhas de transmissão**. 2017. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Neste trabalho é desenvolvida uma interface gráfica que permiti analisar as zonas de atuação de relés de proteção de distância para diferentes características. Os dados da linha de transmissão, os ajustes de proteção das zonas de atuação, configurados de acordo com o tipo de característica selecionada, bem como a impedância oriunda de uma situação faltosa, são informados pelo usuário em uma interface de visualização, desenvolvida no software *Matlab*. A interface pode ser utilizada de várias formas, sendo uma delas no ensino, onde o aluno pode observar o comportamento de diferentes características de relés de proteção de distância para uma determinada falta.

Palavras-chave: Relés de proteção. Zonas de operação. Função de distância.

ABSTRACT

Silva, Matheus P.G.. **Interface of the operation areas of distance protection in transmission lines**. 2017. 48 f. Final paper – Electrical Engineering Graduate Program, Federal University of Technology - Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

In this work was developed an interface that allowed to analyze the zones of operation of relays of distance protection with different characteristics. The transmission line data, protection settings of the actuation zones, configured according to the type of characteristic selected, as well as the impedance arising from a fault situation, are informed by the user in a visualization interface, developed in Matlab software . The interface can be used in several ways, one of them in teaching, where the student can observe the behavior of different characteristics of distance protection relays for a given fault.

Keywords: Protection relays. Operating zones. Distance function.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Sistema Interligado Nacional	11
FIGURA 2 – Zonas de atuação de IED's	12
FIGURA 3 – Impedância aparente da linha de transmissão disposta graficamente	16
FIGURA 4 – Característica da proteção de distância do relé ABB (REL-670) - falta fase-fase	17
FIGURA 5 – Característica da proteção de distância do relé ABB (REL-670) - falta fase-terra	17
FIGURA 6 – Característica MHO da proteção de distância do relé SEL (421)	18
FIGURA 7 – Característica quadrilateral da proteção de distância do relé SEL(421)	20
FIGURA 8 – Característica da proteção de distância do relé Siemens (7SA)	21
FIGURA 9 – Interface de inicialização	24
FIGURA 10 – Entrada RTC e RTP	24
FIGURA 11 – Layout entrada característica da linha	25
FIGURA 12 – Layout de entrada SEL-421 MHO	25
FIGURA 13 – Layout de entrada SEL-421 QUAD	26
FIGURA 14 – Layout de entrada REL-670	27
FIGURA 15 – Layout de entrada 7SA	28
FIGURA 16 – Layout de entrada dos pontos faltosos	29
FIGURA 17 – Advertência de identificação das zonas reversas	30
FIGURA 18 – Sistema elétrico de potência analisado	31
FIGURA 19 – Visualização SEL-421 MHO	40
FIGURA 20 – Visualização SEL-421 QUAD	40
FIGURA 21 – Visualização REL-670 Fase-Fase	41
FIGURA 22 – Visualização REL-670 Fase-Terra	41
FIGURA 23 – Visualização 7SA	42
FIGURA 24 – Pontos faltosos - vista SEL-421 MHO	43
FIGURA 25 – Pontos faltosos - vista SEL-421 QUAD	43
FIGURA 26 – Pontos faltosos - vista REL-670 (F-F)	44
FIGURA 27 – Pontos faltosos - vista REL-670 (F-T)	44
FIGURA 28 – Pontos faltosos - vista 7SA	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Parâmetros REL-670	16
TABELA 2 – Parâmetros SEL-421 MHO	19
TABELA 3 – Parâmetros SEL-421 Quadrilateral	19
TABELA 4 – Parâmetros 7SA	22
TABELA 5 – Resumo dos casos de curto circuito estudados	32
TABELA 6 – Resumo dos ajustes definidos	34
TABELA 7 – Pontos de falta	35
TABELA 8 – Parâmetros de teste REL-670	37
TABELA 9 – Parâmetros de teste SEL-421 / MHO	37
TABELA 10 – Parâmetros de teste SEL-421 / QUAD	38
TABELA 11 – Parâmetros de teste 7SA	39

LISTA DE SIGLAS

IEDs	Intelligent electronics devices
LT	Linha de transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RFPE	Reactive Power Phase Earth
RFPP	Reactive Power Phase Phase
RTC	Relação de transformação de corrente
RTP	Relação de transformação de potência
SEP	Sistema elétrico de potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DA FALTA	14
2.2	IED'S COM FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	15
2.2.1	IED ABB (REL-670)	16
2.2.2	IED Schweitzer (SEL-421)	18
2.2.3	IED Siemens (7SA)	21
3	DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE	23
3.1	DISPOSIÇÃO DA INTERFACE	24
3.1.1	RTC e RTP	24
3.1.2	Característica da linha de transmissão	25
3.1.3	RELÉ SEL - 421 MHO	25
3.1.4	RELÉ SEL - 421 QUAD	26
3.1.5	RELÉ REL - 670	27
3.1.6	RELÉ SIEMENS - 7SA	28
3.1.7	Pontos faltosos	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	DETERMINAÇÃO DOS AJUSTES DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	32
4.1.1	Primeira zona	32
4.1.2	Segunda zona	33
4.1.3	Terceira zona - Reversa	34
4.1.4	Quarta zona	34
4.1.5	Pontos de falta	34
4.2	AJUSTES DOS PARÂMETROS	36
4.2.1	REL - 670	36
4.2.2	Relé SEL - 421	36
4.2.3	Relé Siemens - 7SA	38
4.3	VISUALIZAÇÃO GRÁFICA	39
4.3.1	Resultado do IED SEL-421	39
4.3.2	Resultado do IED REL-670	40
4.3.3	Resultado do IED 7SA	41
4.3.4	Resultados com os pontos de falta	42
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Para que a energia elétrica chegue ao consumidor final, esta deve passar pela geração, transmissão (feita por meio de linhas) e distribuição (conjunto de postes, cabos e transformadores), formando assim um sistema elétrico de potência (SEP). Para melhorar a estabilidade e confiabilidade deste sistema, são realizadas interligações entre alguns sistemas ([OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.A, 2015](#)).

Estas interligações podem ocorrer entre grandes ou pequenas regiões, diminuindo riscos de apagões, por exemplo. No Brasil, esse sistema é de grande porte e é conhecido como Sistema Interligado Nacional (SIN), que é composto em sua maior parte com geração de usinas hidroelétricas. Porém, há ainda sistemas isolados, como os da região Norte, que representam 1,7% da energia requerida para todo o país ([OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.B, 2015](#)).

Um mapa do SIN pode ser visto na Figura 1 onde, segundo dados do SIN, fornecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), possui uma extensão das linhas de transmissão de 116.767,7 km, estando sujeitos à sobrecarga elétrica, acidentes, queima de transformadores, explosão de reatores, falhas na chave seccionadora, defeitos nas linhas de transmissão, sub ou sobre frequência, falhas no sistema de proteção, entre outros problemas que ocasionam a queda do sistema de fornecimento de energia ([OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.D, 2013](#); [GUARINI, 2007](#)).

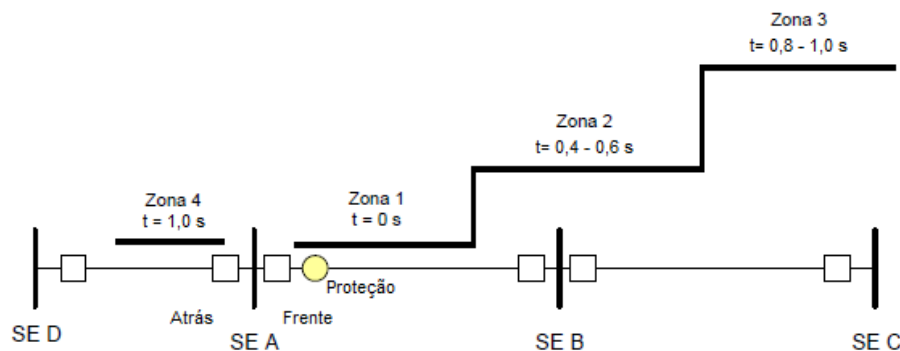
A fim de diminuir ou evitar riscos de vida e danos materiais, bem como aumentar a disponibilidade no suprimento de energia elétrica às cargas, na ocorrência de situações anormais, realiza-se a proteção do sistema elétrico. A proteção adequada de um sistema elétrico deve apresentar características importantes, tais como confiabilidade, seletividade e velocidade de atuação. Entende-se por confiabilidade, quando a proteção permitir o funcionamento seguro e correto do sistema elétrico, sob todas as circunstâncias. Já a seletividade, quando o sistema de proteção reconhecer e selecionar as condições em que deve operar, para evitar operações desnecessárias. E por velocidade de atuação, a velocidade de desligamento do trecho ou equipamento defeituoso no menor tempo possível, a fim de evitar que o problema se propague ([SANTOS, 2007](#)).

A realização da lógica de atuação dos sistemas de proteção é comandada por um relé de proteção, que pode ser um dispositivo eletromecânico, estático ou digital, conectado em uma determinada posição do sistema elétrico, após a transdução dos sinais pertinentes, realizada pelos transformador de corrente (TC) e transformador de potencial (TP), que reduzem os níveis de corrente e tensão para valores secundários, 1 ou 5 A para corrente e 115 ou $115\sqrt{3}$ V para tensão ([SANTOS, 2007](#)).

das zonas de proteção, pode haver casos em que, para aquele sistema elétrico protegido, uma determinada característica da zona de atuação possua melhor desempenho quando comparada à outra, interferindo não só no tempo de resposta desta proteção quanto também na sua seletividade.

A primeira zona de operação tem por base, cobrir 80% a 90% do comprimento da linha com atuação instantânea; a segunda zona de operação é responsável por 130% a 150% do comprimento da linha, com resposta de 0,4 a 0,6 s; a terceira zona tem por finalidade garantir a proteção de backup da 2ª zona, alcançando cerca de 120% do comprimento da linha para defeitos bifásicos e trifásicos e de 130% para defeitos monopolares a partir com relação a segunda zona, assim sendo, responsável por 280% a 350% do comprimento da linha, com tempo de atuação entre 0,8 e 1,0 s; a quarta zona de operação, conhecida por zona reversa, é responsável por 50% do comprimento da linha, atuando sobre a linha anterior a localização do dispositivo, com tempo de atuação de 1,0 s. (FILHO, 2010). Na Figura 2 pode-se ver as zonas de proteção.

Figura 2 – Zonas de atuação de IED's



Fonte: Autor próprio.

Deste modo, a percepção da atuação dos dispositivos da proteção de distância em uma linha de transmissão, não se dá de maneira intuitiva, mas por meio de cálculos a serem realizados, considerando as filosofias de proteção de cada agente de transmissão ou distribuição.

1.2 JUSTIFICATIVA

Mostra-se eficiente e de grande importância para estudos de proteção de distância, uma plataforma que demonstre, graficamente, informações e o comportamento de atuação das zonas da proteção de distância, considerando diferentes características, a serem inseridas pelo usuário. Assim, possibilita um melhor entendimento do comportamento por meio da observação.

Desta forma, este trabalho propõe uma nova abordagem, no que tange a compreensão das zonas de proteção de distância, desenvolvendo uma interface gráfica permitindo a visualiza-

ção do desempenho das diversas curvas características, diante dos dados de entrada fornecidos por um usuário, os quais representam as diversas condições possíveis de falta sob a linha de transmissão em análise, auxiliando na didática e entendimento da proteção de distância.

1.3 OBJETIVOS

Esta seção é dedicada a apresentar os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Implementar um sistema de simulação de diferentes características de zonas de atuação da proteção de distância, permitindo uma melhor compreensão de seu funcionamento, frente a diferentes condições de ajustes e situações de faltas inseridas pelo usuário.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre a importância da proteção de distância.
- Realizar pesquisa bibliográfica sobre as zonas de atuação dos relés a serem utilizados.
- Realizar ensaios verificando a funcionalidade do sistema.
- Verificar a filosofia da proteção de distância.
- Desenvolver um sistema que ilustre o comportamento das zonas de atuação com características de proteção de distância distintas, administrado por uma interface de entrada de dados e visualização de resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será realizada a explanação teórica dos conceitos envolvidos no desenvolvimento do trabalho, envolvendo os cálculos e as diferentes características das áreas de proteção. Cabe destacar que neste trabalho serão considerados apenas relés de proteção de distância digitais, conhecidos como Intelligent electronics devices (IEDs).

A utilização de relés de distância em linhas de transmissão pode prover a proteção efetiva destas. Por meio de comparadores e várias combinações de tensões e correntes, advindas dos TPs e TCs, que refletem em pequenas proporções as grandezas das linhas de transmissão (LT), são implementadas as características do relé de proteção de distância, podendo ser estas MHO, quadrilateral, entre outras (GUZMAN; ROBERTS; SCHWEITZER, 1993).

Um circuito trifásico está vulnerável a ocorrência de alguns tipos de falta, sendo que os relés de distância devem estar disponíveis para responder às tensões e correntes associadas a seis diferentes circuitos ("loops") de falta (AB, BC, CA, AN, BN e CN) (GUZMAN; ROBERTS; SCHWEITZER, 1993).

A quantidade de elementos de medição necessários para esquemas completos, normalmente, são grandes e o número de comparadores, ainda maiores, dependentes das características e da quantidade de zonas de atuação. A impedância aparente, $Z = V/I$, é o enfoque para implementar um relé de distância com um processador de sinais, e, então, verificar se essa impedância localiza-se no interior de alguma forma geométrica, como um círculo ou um quadrilátero. A expectativa é de que um cálculo de impedância (por "loop" de falta) possa ser útil para todas as zonas (GUZMAN; ROBERTS; SCHWEITZER, 1993).

2.1 MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DA FALTA

A implementação de um relé de distância se dá pelo cálculo da impedância aparente, posteriormente, a comparação com alguma forma geométrica. Este método é atraente quando se é necessário apenas um cálculo de impedância por "loop" de falta. Múltiplas zonas requerem mais testes geométricos da impedância calculada. O cálculo da impedância aparente de uma falta fase-terra é obtida na equação (1).

$$Z = \frac{V_M}{I_M + k_0 I_R} \quad (1)$$

Onde:

V_M : tensão da fase M

I_M : corrente da fase M

I_R : corrente residual medida na barra próxima a falta

k_0 : dada pela equação (2)

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \quad (2)$$

Tendo que:

Z_{1L} : impedância de sequência positiva da linha

Z_{0L} : impedância de sequência zero da linha

A equação (3) mostra como calcular a impedância aparente de uma falta fase-fase.

$$Z = \frac{V_R - V_S}{I_R + I_S} \quad (3)$$

Onde:

V_R : tensão da fase R

I_R : corrente da fase R

V_S : tensão da fase S

I_S : corrente da fase S

Para analisar a impedância da linha até o ponto da falta utiliza-se a equação (4).

$$Z = mZ_{1L} + R_F \frac{I_F}{I} \quad (4)$$

Para:

m : distância (em p.u.) da barra até o ponto da falta

I_F : corrente total que flui por R_F

Z_{1L} : impedância de sequência positiva da linha

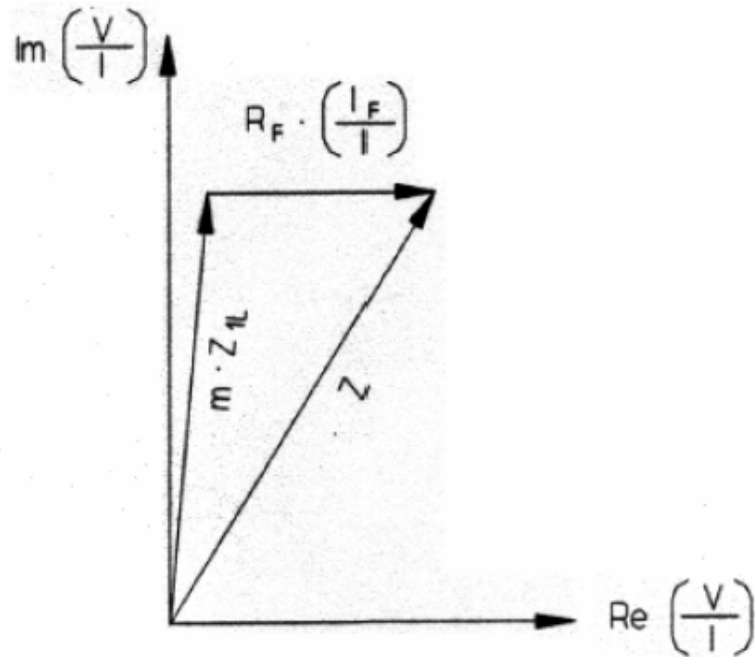
R_F : resistência de falta

A impedância encontrada, que possui partes real e imaginária, é disposta em um gráfico como na Figura 3, onde a reta Z é a impedância da falta. Neste gráfico será representado, posteriormente, as características de cada relé, e o ponto final da reta Z indicará em que zona a falta cairá.

2.2 IED'S COM FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Neste trabalho serão considerados três tipos de IED's, sendo estes, comumente utilizados na proteção das linhas de transmissão, com suas respectivas zonas de atuação de proteção de distância característica, como segue:

Figura 3 – Impedância aparente da linha de transmissão disposta graficamente



Fonte: (GUZMAN; ROBERTS; SCHWEITZER, 1993).

2.2.1 IED ABB (REL-670)

Este dispositivo realiza a proteção de distância com até cinco zonas independentes, contendo três "loops" para faltas fase-fase e três para faltas fase-terra para cada zona independente. Configurações reativas e resistivas, individuais para cada zona, possibilita a proteção da linha não importando seu comprimento (ABB, 2006).

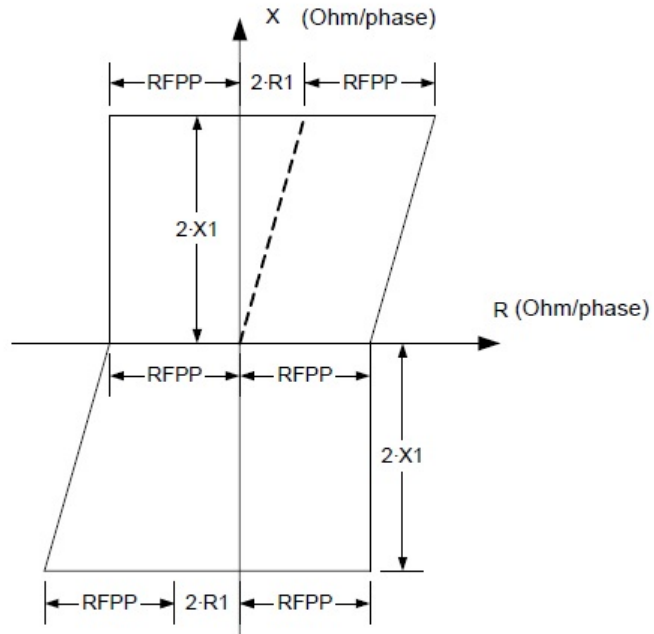
A característica da área de proteção é quadrilateral, como pode ser notada nas Figuras 4 e 5. Para que se possa obter tal representação é necessária a obtenção de diversos parâmetros que estão dispostos na Tabela 1 (ABB, 2006).

Tabela 1 – Parâmetros da função de proteção de distância

	Range	Unidade
X1	0,10-3000,00	ohm/fase
R1	0,10-1000,00	ohm/fase
X0	0,10-9000,00	ohm/fase
R0	0,50-3000,00	ohm/fase
RFPP	1,00-3000,00	ohm/loop
RFPE	0,10-9000,00	ohm/loop

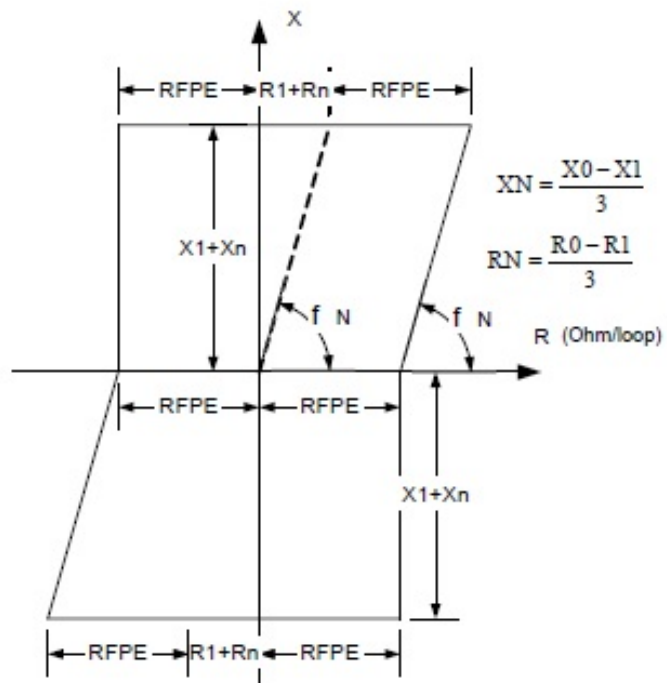
Fonte: ABB, 2006.

Figura 4 – Característica quadrilateral para proteção fase-fase



Fonte: ABB, 2006.

Figura 5 – Característica quadrilateral para proteção fase-terra



Fonte: ABB, 2006.

Onde:

X1: reatância de sequência positiva

R1: resistência de sequência positiva

X0: reatância de sequência zero

R0: resistência de sequência zero

RFPP: resistência de falta fase-fase

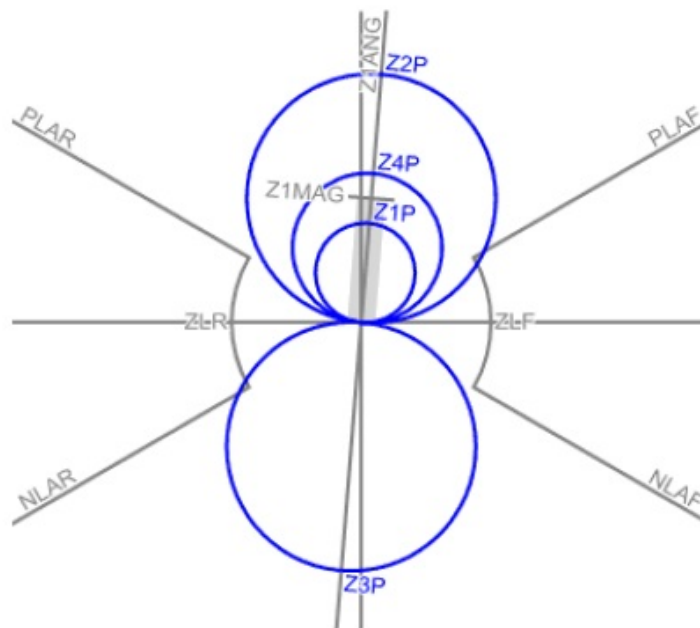
RFPE: resistência de falta fase-terra

Os parâmetros apresentados são os mesmos a serem apresentados para obtenção das zonas 1, 2, 3, 4 e 5, porém, cada zona de proteção terá o seu valor definido diante da filosofia de proteção a ser adotada nos cálculos.

2.2.2 IED Schweitzer (SEL-421)

O relé de proteção a distância SEL-421 possui característica MHO e quadrilateral, Figuras 6 e 7, respectivamente. Assim, para cada uma dessas características, os parâmetros envolvidos são distintos. Para ambas características, este IED pode ter até cinco zonas de proteção distintas, as duas primeiras podendo ser definidas apenas para compreensão da linha à frente e as três restantes dispostas a cobrir faltas à frente ou atrás, dependendo de como foi programada. Os parâmetros para a característica MHO do SEL-421 está presente na Tabela 2. Já na Tabela 3 podem ser vistos os dados necessários para obtenção das áreas de proteção quadrilateral (SEL, 2010).

Figura 6 – Característica MHO do IED SEL-421



Fonte: SEL, 2010.

Onde:

Tabela 2 – Parâmetros da propriedade mho de proteção de distância

	Range	Unidade
Z1P	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
Z2P	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
Z3P	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
Z4P	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
Z5P	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm

Fonte: SEL, 2010.

ZiP: elemento MHO de distância da respectiva zona (sendo i referente a cada zona de atuação)

A característica MHO é representada por uma circunferência de raio ZiP (sendo i referente a cada zona de atuação), com as coordenadas do centro definidas pelas equações (5) e (6).

$$cyi = ZiP - (ZiP * \text{sen}(\phi)) \quad (5)$$

$$cxi = ZiP * \text{cos}(\phi) \quad (6)$$

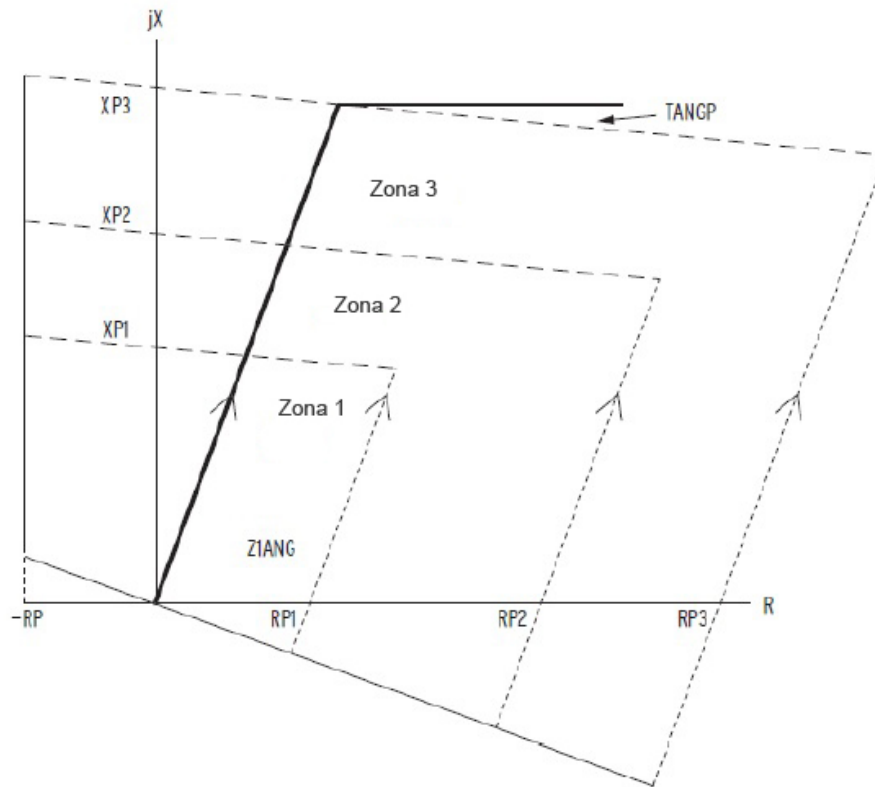
Tendo ϕ como ângulo da LT.

Tabela 3 – Parâmetros da propriedade quadrilateral de proteção de distância

	Range	Unidade
XP1	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
RP1	$(0,25-250,00)/I_{nom}$	ohm
XP2	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
RP2	$(0,25-250,00)/I_{nom}$	ohm
XP3	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
RP3	$(0,25-250,00)/I_{nom}$	ohm
XP4	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
RP4	$(0,25-250,00)/I_{nom}$	ohm
XP5	$(0,25-320,00)/I_{nom}$	ohm
RP5	$(0,25-250,00)/I_{nom}$	ohm
TangP	$(-40,00-40,00)$	°

Fonte: SEL, 2010.

Figura 7 – Característica quadrilateral do dispositivo SEL-421



Fonte: SEL, 2010.

Onde:

XP_i : reatância da respectiva zona (sendo i referente a cada zona de atuação)

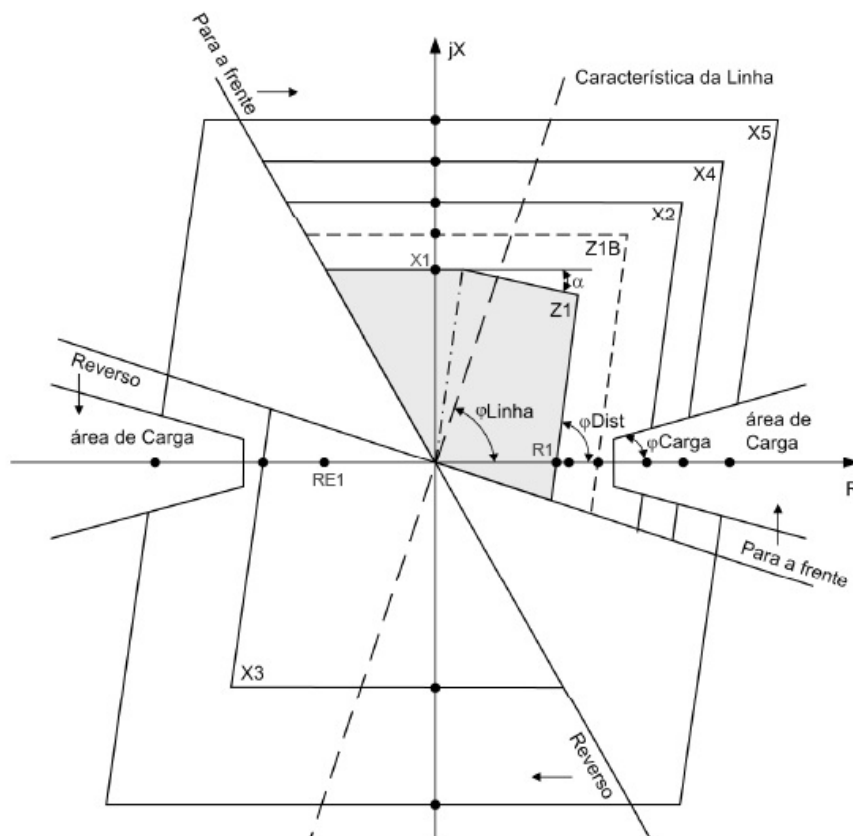
RP_i : resistência de falta fase-terra da respectiva zona (sendo i referente a cada zona de atuação)

$TangP$: ângulo de correção não homogênea

2.2.3 IED Siemens (7SA)

O relé de proteção de distância Siemens 7SA pode possuir até cinco zonas de proteção independentes, que são definidas por um polígono tal como demonstra a Figura 8. Para que se encontre este polígono, é necessário a compreensão dos parâmetros encontrados na Tabela 4. A zona 1B, é uma zona de sobre alcance controlada, normalmente usada em combinação com religamento automático e/ou sistemas de teleproteção (SIEMENS, 2005).

Figura 8 – Característica poligonal do dispositivo Siemens 7SA



Fonte: Siemens, 2005.

Onde:

$X(Z_i)$: reatância da respectiva zona (sendo i referente a cada zona de atuação)

$R(Z_i)$: resistência de falta fase-fase (sendo i referente a cada zona de atuação)

$RE(Z_i)$: resistência de falta fase-terra (sendo i referente a cada zona de atuação)

Desta forma, a interface a ser desenvolvida será baseada nos parâmetros típicos para cada tipo de característica de zona de proteção, dependendo do IED utilizado, de forma a permitir uma melhor compreensão da eficiência dos ajustes de proteção implementados.

Tabela 4 – Parâmetros do relé de proteção de distância 7SA

	Range	Unidade
R(Z1)	(0,01-120,00)	ohm
X(Z1)	(0,01-120,00)	ohm
RE(Z1)	(0,01-120,00)	ohm
R(Z2)	(0,01-120,00)	ohm
X(Z2)	(0,01-120,00)	ohm
RE(Z2)	(0,01-120,00)	ohm
R(Z3)	(0,01-120,00)	ohm
X(Z3)	(0,01-120,00)	ohm
RE(Z3)	(0,01-120,00)	ohm
R(Z4)	(0,01-120,00)	ohm
X(Z4)	(0,01-120,00)	ohm
RE(Z4)	(0,01-120,00)	ohm
R(Z5)	(0,01-120,00)	ohm
X(Z5)	(0,01-120,00)	ohm
RE(Z5)	(0,01-120,00)	ohm
R(Z1B)	(0,01-120,00)	ohm
X(Z1B)	(0,01-120,00)	ohm
RE(Z1B)	(0,01-120,00)	ohm

Fonte: Siemens, 2005.

3 DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE

Neste capítulo é apresentado todo o processo de desenvolvimento da interface elaborada neste trabalho.

No início do processo de desenvolvimento desta interface, a ideia era criar uma interface que contivesse abas para alternar entre as janelas de entrada de dados, ficando de tal modo, melhor distinguido os parâmetros de cada IED além de se tratar-se mais leve visualmente.

Seguindo o princípio de se criar uma interface mais limpa com a utilização de abas, o código começou a ser desenvolvido, pois a criação de uma interface com troca de janelas não é possível utilizar a ferramenta *GUIDE*, que auxilia na criação da parte gráfica.

Diante disso, a criação do esquema foi realizado com êxito, contudo, quando iniciou-se a elaboração do código que iria realizar as análises das características da função de distância, que leva em conta os dados informados por um usuário, a entrada destes dados passou a ser um empecilho, pois, mesmo que cada aba fosse responsável pela geração de gráficos distintos, havia a necessidade da exportação de alguns dados entre elas, como no caso, os valores de impedância da LT e os pontos de faltas, que são os mesmos para todas as características a serem visualizadas.

A tentativa de se manter o modelo criado e realizar a exportação e importação dos dados inseridos demandou de longas pesquisas que por fim não obtiveram sucesso.

Com o intuito de evitar que o usuário forneça informações idênticas a cada janela que realizará a entrada de dados, o que tornaria o processo massante, o layout da interface foi reformulado, chegando ao resultado que pode ser observado na Figura 9.

Como exposto na Figura 9, a interface criada não foi dividida em diferentes janelas que seriam alternadas por abas dispostas na janela principal. O novo modelo consta apenas com uma janela, onde é possível realizar a entrada de todos os dados necessários para visualização e, quando pedido, para visualizar, a resposta gráfica se dá em janelas diferentes, sendo uma para cada característica.

O novo formato da interface permitiu que a mesma fosse criada por meio da ferramenta *GUIDE*, que possibilita, de maneira simples e ágil, a criação da parte gráfica do projeto. Tipos de inserção, como as caixas de entradas, botão de visualização, suas determinadas posições e tamanho não foram realizados diretamente por linhas de código.

Criado a parte visual da janela, foi possível realizar a lógica de programação em linhas de comando e atribuí-los aos botões criados com a ferramenta do software já citada. E assim, todo o trabalho foi desenvolvido, onde para cada botão disponível foi aplicado uma lógica e comandos diferentes.

A interface final ficou constituída por diversas caixas para que fosse distinguidos os

Figura 9 – Interface de inicialização

Fonte: Autor próprio.

diferentes parâmetros de cada característica ou dados que sejam necessários.

3.1 DISPOSIÇÃO DA INTERFACE

Nesta seção é apresentada separadamente o conjunto de dados que serão informados pelo usuário.

3.1.1 RTC e RTP

Na região apresentada na Figura 10 o usuário deverá informar os valores de entrada de relação de transformação de corrente (RTC) e relação de transformação de potencial (RTP), que serão necessários para transformar os parâmetros dos relés que têm sua entrada em valores de nível secundário a níveis primários a fim de utilizá-los para criação do gráfico com as características da linha e pontos de falta.

Figura 10 – Entrada RTC e RTP

Fonte: Autor próprio.

3.1.2 Característica da linha de transmissão

O próximo campo para preenchimento deve conter a impedância de sequência positiva e zero da linha, ambos estão respectivamente apresentados na Figura 11.

Figura 11 – Layout entrada característica da linha

The image shows a software interface window titled "Características da Linha". Inside the window, there are four input fields arranged in a 2x2 grid. The top row contains "R1: Ohm" and "X1: Ohm". The bottom row contains "R0: Ohm" and "X0: Ohm". Below these fields is a single button labeled "Visualizar".

Fonte: Autor próprio.

O valor de impedância de sequência positiva é o valor que resultará na visualização gráfica da LT em todas as imagens geradas. A partir deste valor, é obtido o ângulo da linha, que é utilizado para o cálculo do limite de algumas das características estudadas.

Já a impedância de sequência zero é necessário para o cálculo dos limitantes das zonas de atuação para o loop fase-terra.

3.1.3 RELÉ SEL - 421 MHO

Os parâmetros referentes ao IED SEL - 421, em sua característica MHO devem ser inseridos na região denotada na Figura 12.

Figura 12 – Layout entrada SEL-421 MHO

The image shows a software interface window titled "SEL - 421 MHO". Inside the window, there are five input fields stacked vertically on the left side. The labels are "Z1P: Ohm", "Z2P: Ohm", "Z3P_r: Ohm", "Z4P: Ohm", and "Z5P: Ohm". To the right of these fields is a single button labeled "Visualizar".

Fonte: Autor próprio.

Os ajustes destes parâmetros são inseridos em valores secundários e, então, quando apresentado graficamente, o resultado aparece em valores primários levando em consideração as relações do RTP e RTC.

3.1.4 RELÉ SEL - 421 QUAD

De maneira similar ao item anterior, mas para a característica quadrilateral do dispositivo SEL-421, foi configurada a inserção dos dados na caixa de texto como pode ser observada na Figura 13.

Figura 13 – Layout de entrada SEL-421 QUAD

The image shows a software interface window titled "SEL - 421 QUAD". It contains a grid of input fields for resistance values. The fields are arranged in two columns: the left column contains RP1, RP2, RP3_r, RP4, and RP5; the right column contains XP1, XP2, XP3_r, XP4, and XP5. Each field is a text box with the value "Ohm" entered. Below the grid is a button labeled "Visualizar".

RP1:	Ohm	XP1:	Ohm
RP2:	Ohm	XP2:	Ohm
RP3_r:	Ohm	XP3_r:	Ohm
RP4:	Ohm	XP4:	Ohm
RP5:	Ohm	XP5:	Ohm

Visualizar

Fonte: Autor próprio.

Como ainda trata-se do mesmo IED, os valores informados também são inseridos em valores secundários.

3.1.5 RELÉ REL - 670

No dispositivo da ABB, a entrada dos parâmetros é realizada na região apresentada na Figura 14. Pode-se notar que este IED requer um número maior de parâmetros, que foram mencionados na sessão 2.2.1, sendo os ajustes configurados em valores primários.

Figura 14 – Layout de entrada REL-670

The image shows the configuration interface for the ABB REL-670 relay. It is titled "ABB REL-670" and contains the following elements:

- Zona 1:** $R1 + j X1$, $R0 + j X0$, RFPP: Ohm, RFPE: Ohm
- Zona 2:** $R1 + j X1$, $R0 + j X0$, RFPP: Ohm, RFPE: Ohm
- Zona 3_r:** $R1 + j X1$, $R0 + j X0$, RFPP: Ohm, RFPE: Ohm
- Zona 4:** $R1 + j X1$, $R0 + j X0$, RFPP: Ohm, RFPE: Ohm
- Zona 5:** $R1 + j X1$, $R0 + j X0$, RFPP: Ohm, RFPE: Ohm
- Tipo de falta:**
 - fase-fase
 - fase-terra
- Direcionalidade:**
 - Dir:
 - Neg:
- Visualizar** button

Fonte: Autor próprio.

Deve-se também entrar com os valores de direcionalidade, que delimitam quanto aos quadrantes de valor positivo e negativo. Além da já mencionada correlação com a impedância de sequência zero da LT.

Embora sejam similar geometricamente, este relé possui representações diferentes para os loops falta fase-fase e fase-terra, diferenciando-se na abrangência de cada zona. A seleção dos casos são feitas na janela mostrada pela Figura 14.

Nesta seção é possível gerar dois gráficos independentes que mostraram as características de acordo com a seleção feita.

3.1.6 RELÉ SIEMENS - 7SA

Na Figura 15 é destinado ao dispositivo da Siemens. Este relé pode ter seus parâmetros de entrada em valores primários ou secundários, sendo este o motivo da existência de uma região onde deve-se informar de qual valores se tratam para que a resposta gráfica seja correta.

Figura 15 – Layout de entrada 7SA

The image shows a software interface for configuring a Siemens 7SA relay. The interface is titled 'Siemens 7SA' and contains several sections:

- Zona 1:** R: Ohm, X: Ohm, RE: Ohm
- Zona 1B:** R: Ohm, X: Ohm, RE: Ohm
- Zona 2:** R: Ohm, X: Ohm, RE: Ohm
- Zona 3_r:** R: Ohm, X: Ohm, RE: Ohm
- Zona 4:** R: Ohm, X: Ohm, RE: Ohm
- Zona 5:** R: Ohm, X: Ohm, RE: Ohm
- Escala:**
 - Primário
 - Secundário
- Visualizar** button

Fonte: Autor próprio.

3.1.7 Pontos faltosos

A última região presente na interface é onde se deve realizar a entrada de pontos característicos de situações de falta, possibilitando a entrada de 10 pontos distintos, para que possam ser visualizados nas características já apresentadas. Esses valores podem ser inseridos nos campos ilustrados na Figura 16.

Os valores inseridos aqui devem ser na forma retangular, logo, com valor real e imaginário, e em valores primários.

Figura 16 – Layout de entrada dos pontos faltosos

Pontos de falta

P1 Z:	<input type="text" value="R1"/>	+j	<input type="text" value="X1"/>
P2 Z:	<input type="text" value="R2"/>	+j	<input type="text" value="X2"/>
P3 Z:	<input type="text" value="R3"/>	+j	<input type="text" value="X3"/>
P4 Z:	<input type="text" value="R4"/>	+j	<input type="text" value="X4"/>
P5 Z:	<input type="text" value="R5"/>	+j	<input type="text" value="X5"/>
P6 Z:	<input type="text" value="R6"/>	+j	<input type="text" value="X6"/>
P7 Z:	<input type="text" value="R7"/>	+j	<input type="text" value="X7"/>
P8 Z:	<input type="text" value="R8"/>	+j	<input type="text" value="X8"/>
P9 Z:	<input type="text" value="R9"/>	+j	<input type="text" value="X9"/>
P10 Z:	<input type="text" value="R10"/>	+j	<input type="text" value="X10"/>

Fonte: Autor próprio.

Cada relé possui uma da zona de atuação reversas e, neste trabalho, as zonas reversas são fixas para cada IED. As diferenciações são claramente expostas na interface, sendo identificada pelo símbolo "_r", seguida de uma advertência como exemplificado na Figura 17. Também, o usuário pode definir quais zonas deseja analisar apenas informando ou não os parâmetros das mesmas, pois só serão plotadas as características informadas.

O usuário tem a possibilidade de realizar a entrada dos parâmetros de todos os dispositivos disponíveis e manter as janelas gráficas abertas para que possa fazer uma análise comparativa dos resultados obtidos.

Figura 17 – Advertência de identificação das zonas reversas

Zona 3_r

R: Ohm RE: Ohm

X: Ohm

Zona 4

R: Ohm RE: Ohm

X: Ohm

Zona 5

R: Ohm RE: Ohm

X: Ohm

Escala

Primário

Secundário

Visualizar

P6 Z: R6 + j X6

P7 Z: R7 + j X7

P8 Z: R8 + j X8

P9 Z: R9 + j X9

P10 Z: R10 + j X10

_. Zona reversa

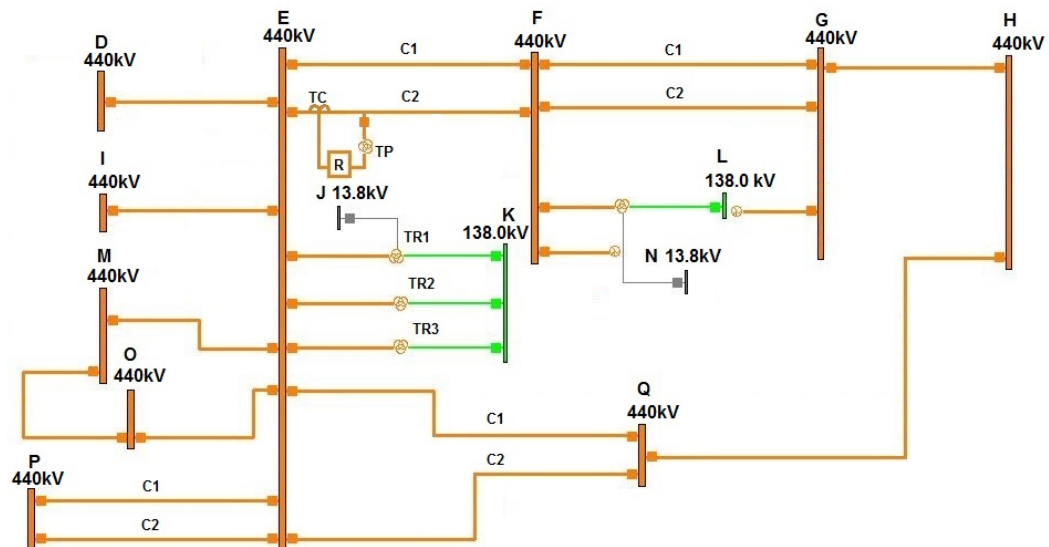
Fonte: Autor próprio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos com a simulação de casos na interface das características de zonas de atuação da proteção de distância em linhas de transmissão.

As premissas utilizadas para realização de testes, a fim de averiguar a funcionalidade da interface desenvolvida, foi utilizado um sistema elétrico de potência real pertencente a rede básica, $V \geq 230\text{kV}$, conforme apresentado na Figura 18, retirado da base de dados de curto-circuito da ONS (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.E, 2017).

Figura 18 – Sistema elétrico de potência analisado



Fonte: Adaptado de ONS, 2017.

Do sistema apresentado, iremos analisar o circuito C2 entre as barras E e F, sendo a barra E o ponto onde está instalado o Relé (R), os TCs e TPs, como mostra a Figura 18. Da LT mencionada tem-se a impedância de sequência positiva, $Z1 = 2,31 + j 28,072$ ohms primários, a impedância de sequência zero, $Z0 = 27,685 + j 126,614$ ohms primários e que seu comprimento é de 91 Km.

Na situação, o TC utilizado é de 2000:5A, logo sua RTC é 400, enquanto o TP é $460000\sqrt{3}:115\sqrt{3}\text{V}$, logo o RTP é igual a 4000.

Os valores apresentados anteriormente são inseridos diretamente na interface programada. Já para se encontrar os parâmetros de cada característica é preciso determinar os ajustes da proteção de distância de cada zona para LT estudada, e posteriormente, determinar cada um dos parâmetros.

4.1 DETERMINAÇÃO DOS AJUSTES DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Para calcular os ajustes da LT é necessário ter um estudo de casos de curto circuito, o qual ilustrará os valores medidos pelo relé instalado para as diversas situações de curto circuito. Os casos apresentados na Tabela 5 foram simulados através do software ANAFAS. Os valores destacados na Tabela 5 serão utilizados posteriormente na determinação dos ajustes de cada região de atuação ([CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, versão acadêmica, 2017](#)).

Tabela 5 – Resumo dos casos de curto circuito estudados

CURTO CIRCUITO	Trifásico				Fase Terra				ZRA (Ω)	
	IA (A)		ZRA (Ω)		IA (A)		IN (A)		ZRA (Ω)	
	Mod	Ang.	Mod	Ang.	Mod	Ang.	Mod	Ang.	Mod	Ang.
SE K BAY F (Close in)	22272	-86			13793	-80	12857	-80		
SE J BAY F (Close in), SEM 1 CIRC	21291	-86			12748	-80	12352	-80		
SE E BAY F (Close in), SEM D-E	18919	-85			10842	-80	10964	-80		
BARRA F	4769	-86	28,2	85,7	2174	-81	1753	-78	39,9	84
BARRA 440 kV SE F, COM CIRCUITO PARALELO ABERTO	6168	-86	28,2	85,7	3259	-81	2865	-79	28,2	85,7
BARRA 440 kV SE F, COM CIRCUITO PARALELO ATERRADO	6168	-86	28,2	85,7	3939	-84	4037	-84	19,5	91
NO FINAL DA LT E-F, ABERTO EM F	6601	-86	28,2	85,7	3994	-83	3994	-83	22,7	89
A 50 % DA LT F-G, ABERTO EM G	1711	-86	123,9	85,6	849	-82	465	-77	160,1	84
A 50 % DO OUTRO CIRCUITO G-E 440 KV, ABERTO EM E	3672	-86	56,2	85,7	2482	-83	2691	-83	37,2	89
A 50 % DA LT F-G 440 KV, ABERTO EM G COM 1 CIRC. E-F ATERRADO	2630	-86	83,9	85,7	1501	-83	1037	-80	82,6	86
BUCHA 138 KV DO TRANSFORMADOR DA SE F, ABERTO EM F	777	-88	302	88	652	-86	448	-83	194	89
A 100 % DA LT F-G 440 KV, ABERTO EM G	1040	-86	220	85,6	555	-84	176	-72	310	84
A 100 % DO OUTRO CIRCUITO F-E 440 KV, ABERTO EM E	2614	-86	84,2	85,7	2207	-85	2769	-86	37	93
A 50% LT E- D (Dir. Reversa)	909	94	152	-94	487	101	379	100	159	-97

Fonte: Adaptado de ANAFAS, 2017.

Apresentaremos a seguir a filosofia adotada e o cálculo dos alcances das zonas da proteção de distância.

4.1.1 Primeira zona

A primeira zona deverá ser ajustada em 70% da impedância da LT, em função dos erros dos TP's e TC's, eventuais imprecisões nos parâmetros de linhas e considerando o efeito do carregamento.

Para LT's de circuitos duplos, deverá ser verificada a influência do circuito adjacente aberto e aterrado em ambas as extremidades. Nestas condições deverá ser adotado o menor

valor entre 90% da impedância medida pelo relé, presente na equação equação (5), e 70% da impedância da LT, somente para o loop fase-terra, presente na equação (6), para faltas na barra remota (F).

A temporização desta zona deverá ser instantânea.

Para defeitos a terra na barra de F com o circuito paralelo aterrado, a impedância medida é $19,4 \Omega$, devemos salientar que foi levado em consideração o valor da impedância na forma retangular na definição de todos os ajustes.

$$AjusteZona1 = 0,9 * 19,4 = 17,46 \quad (5)$$

$$AjusteZona1 = 0,7 * 28,2 = 19,74 \quad (6)$$

Portanto será adotado ajuste da primeira zona em 17,5 ohms, corresponde a 62,16% da LT.

4.1.2 Segunda zona

A segunda zona deverá ser ajustada com o objetivo de se garantir o alcance de 100% da linha de transmissão protegida, com margem de segurança adequada. O alcance desta zona também deverá estar limitado ao menor valor calculado (impedância vista pelo relé), para faltas a 50% das LT's conectadas à barra remota, no caso de falha dos respectivos disjuntores da barra remota.

Também deverá ser verificado que o valor encontrado não alcance o barramento de alta/baixa tensão dos transformadores conectados à barra remota.

A temporização desta zona deverá ser ajustada em 0,4 segundos.

Para faltas 50% nas linhas após a barra F, o menor valor de impedância medido é de 56Ω primários e ocorre para falta fase terra a 50% do outro circuito F-E com o disjuntor da extremidade de E aberto.

A menor impedância medida pelo relé para faltas na SE L 138 kV é de $84,8 \Omega$ primários para curto fase terra.

A segunda zona deve se ajustada para cobrir faltas na barra do terminal remoto com margem de segurança, porém não deverá alcançar faltas fase terra ao final do outro circuito ($Z=36,7 \Omega$ primários).

Logo a 2ª zona será ajustada em 33Ω prim., que corresponde a 90% do valor medido ($0,9 * 36,7=33$), que corresponde a 117,22% da LT.

4.1.3 Terceira zona - Reversa

A terceira zona deverá ser ajustada com o objetivo de se garantir como retaguarda a barra local. O alcance desta zona também deverá estar limitado ao menor valor calculado (impedância vista pelo relé), para faltas a 50% da menor linha de transmissão na direção reversa.

A temporização desta zona deverá ser ajustada em 2,5 segundos.

O menor valor de impedância para faltas na direção reversa ocorre para defeitos trifásicos a 50% da LT E-D com impedância de 154 Ω primários.

Considerando os elevados valores para curto na direção reversa, será adotado ajuste para a zona reversa em 34 Ω , que corresponde a 120,77% da impedância da LT, e impedância medida a 10% da menor linha reversa (E-D).

4.1.4 Quarta zona

O alcance desta zona deverá estar limitado ao menor valor calculado (impedância vista pelo relé), para faltas a 100% da menor LT conectada à barra remota, no caso de falha dos respectivos disjuntores da barra remota.

Também deverá ser verificado que o valor encontrado não alcance, se possível, o barramento de baixa/alta tensão dos transformadores conectados à barra remota.

Para faltas 100% nas linhas após a barra F, o menor valor de impedância medido é de 84,2 Ω primários para faltas trifásicas ao final do outro circuito F-E, aberto em E.

A impedância medida pelo relé para faltas na SE L 138 kV é de 84,8 Ω primários para curto fase terra.

A quarta zona será ajustada em 92,6 Ω primários, que corresponde a 110% (1,1 x 84,2) da impedância medida ao final do circuito paralelo, com disjuntor de E aberto.

Os ajustes definidos nesta seção estão expostos resumidamente na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos ajustes definidos

Zonas	Ajustes (Ω primários)	Cobertura LT
1 ^a	17,5	62,16%
2 ^a	33	117,22%
3 ^a	34	120,77% Reversa
4 ^a	92,6	328,92%

Fonte: Autor próprio.

4.1.5 Pontos de falta

Além dos ajustes das 4 zonas, apresentados anteriormente, a interface possibilita a entrada de 10 pontos faltosos para visualização nos diferentes IED's.

A fim de analisar alguns casos, foram utilizados 6 pontos de faltas, retirados de uma simulação do SEP real, já apresentado neste trabalho, por meio do software ANAFAS.

Os pontos de falta que serão abordados estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – Pontos de falta

Falta	FASE	SE BARRA E BAY BARRA F ? C2 - 440 KV										Localização	Legenda
		Tensão (V SEC.)		Corrente (A SEC.)		Impedância		Impedância		KM	% LT		
		MOD	ANG	MOD	ANG	(Ohms PRIM.) MOD	ANG	(Ohms PRIM.) R	X				
Trifásica 10% LT Z1	A	12,157	0	43,181	-85,66								
	B	12,157	-120	43,181	154,34	2,815	85,66	0,21	2,81	9,1	10	P1	
	C	12,157	120	43,181	34,34								
Trifásica 50% LT Z1	A	30,645	0	21,771	85,66								
	B	30,645	-120	21,771	325,66	14,076	85,66	1,07	14,04	45,5	50	P2	
	C	30,645	120	21,771	205,66								
Monofásica 90% LT Z2	A	41,608	0	6,67	-79,89								
	B	66,605	-125,36	0,324	88,53	29,92	84,57	2,83	29,79	96,6	106,1	P3	
	C	68,198	125,28	0,324	88,53								
Monofásica >100% LT Z4	A	50,039	0	3,32	-79,5								
	B	65,026	-122,66	0,313	91,42	76,269	83,51	8,62	75,78	245,7	269,95	P4	
	C	65,905	123,04	0,313	91,42								
Monofásica Zona Reversa Z3	A	8,233	0	2,414	103,41								
	B	75,453	-132,43	0,2	-69,44	17,074	-97,59	-2,26	-16,92	-54,9	-60,29	P5	
	C	79,644	137,27	0,2	-69,44								
Monofásica 50% LT RF=200 Ohms	A	62,239	0	1,839	-5,2								
	B	65,186	-116,01	0,026	158,15	156,275	10,46	153,68	-28,37	92	101,1	P6	
	C	62,603	125,19	0,026	158,15								

Fonte: Autor próprio.

O ponto P1 será melhor explanado, a fim de exemplificar os demais pontos apresentados Tabela 7. Este, foi obtido através de uma simulação de uma falta trifásica, realizada no software ANAFAS, ocorrida a 10% do ponto de instalação do relé ([CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, versão acadêmica, 2017](#)).

A partir deste ponto, o dispositivo realizou a leitura dos valores de corrente e tensão de cada fase, também presente na tabela, permitindo, então, o cálculo da impedância deste ponto. Ao estabelecer uma relação, entre esta impedância e o a impedância da LT, foi possível saber a localização deste ponto na LT.

E, por fim, de acordo com a cobertura dos ajustes e a localização do ponto, é possível estabelecer uma prévia da zona de atuação em que o ponto está incluso.

Analisando o ponto P6, que após o relé levar em consideração os valores de corrente e tensão lidos, não se deu distante do ponto de instalação deste, contudo, não está em nenhuma zona de atuação. Para este caso, devido ao seu alto valor resistivo, a função de proteção de distância foi falha, logo, outra função de proteção deve atuar para este caso.

4.2 AJUSTES DOS PARÂMETROS

Determinado os ajustes de cada zona da proteção de distância, é o momento de se determinar os parâmetros de cada característica a ser apresentada. Os parâmetros usados no ensaio deste trabalho serão apresentados nesta seção.

4.2.1 REL - 670

Para se entender como foi obtido os parâmetros do dispositivo da ABB, utilizaremos as equações (7) e (8). Estas demonstram como encontrar a impedância de sequência positiva e zero para a primeira zona.

$$Z_{1_1} = 0,6216 * (2,130 + j28,072) = 1,32 + j17,45\Omega_{prim}. \quad (7)$$

$$Z_{0_1} = 0,6216 * (27,685 + j126,614) = 17,21 + j78,70\Omega_{prim}. \quad (8)$$

O valor que multiplica as impedâncias da linha, 0,6216, refere-se ao percentual que o ajuste da primeira zona cobre da LT. O percentual das demais zonas encontra-se na Tabela 6 e o cálculo se da mesma maneira para as zonas seguintes.

Os alcances resistivos para fases (RFPP) e de terra (RFPE), são práticos, segundo experiência dos engenheiros de proteção, onde, na prática prevem as condições de faltas com certa impedância, valores de até 120 ohms primários são considerados. Assim, para as simulações serão utilizados os valores apresentados na Tabela 8

Quando se trata do IED REL-670, deve-se também entrar com os valores da direcionalidade, que o delimitam lateralmente em relação aos quadrantes positivo e negativo, estes valores são pré fixados por 15% e 115% respectivamente, neste trabalho foi mantido esses valores.

Os demais parâmetros são apresentados na Tabela 8.

4.2.2 Relé SEL - 421

Como já dito nesse trabalho o IED da Schweitzer utiliza valores secundários para determinação de seus parâmetros. Logo, para determinação destes para característica MHO, os ajustes de cada zona só deve ser dividido pela relação RTP/RTC.

A equação (9), mostra como se deu o valor para a primeira zona.

$$Z_{1P} = 17,5/10 = 1,75\Omega_{sec}. \quad (9)$$

Os demais parâmetros podem ser observados na Tabela 9, que seguem os ajustes de

Tabela 8 – Parâmetros utilizados no teste do REL-670

	Valor	Zonas de atuação
X1	17,45	1
R1	1,32	1
X0	78,70	1
R0	17,21	1
RFPP	45	1
RFPE	80	1
X1	32,91	2
R1	2,50	2
X0	148,41	2
R0	32,45	2
RFPP	60	2
RFPE	100	2
X1	33,90	3 Reversa
R1	2,57	3 Reversa
X0	152,91	3 Reversa
R0	33,43	3 Reversa
RFPP	60	3 Reversa
RFPE	100	3 Reversa
X1	92,33	4
R1	7	4
X0	416,46	4
R0	91,06	4
RFPP	80	4
RFPE	120	4

Fonte: Autor próprio.

cada zona.

Tabela 9 – Parâmetros utilizados no teste do SEL-421/ MHO

	Valor	Zonas de atuação
Z1P	1,75	1
Z2P	3,3	2
Z3P	3,4	3 Reversa
Z4P	9,26	4

Fonte: Autor próprio.

Enquanto para característica quadrilateral, para lograr o alcance relativo do elemento de distância de terra quadrilateral, o princípio segue o aplicado à proteção de distância MHO de fase, logo, para a primeira zona, se da de acordo com a equação (9). Logo, $X1P = 1,75$, segue a essência para as demais zonas.

Para o alcance resistivo do elemento de distância de terra quadrilateral, foram utilizados os mesmos valores do IED da ABB, que foram apenas transformados para Ω secundários, como mostra a equação (10), para a primeira zona.

$$R1P = 80/10 = 8\Omega_{sec}. \quad (10)$$

Os demais parâmetros estão contidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados no teste do SEL-421/ QUAD

	Valor	Zonas de atuação
R1P	8	1
X1P	1,75	1
R2P	10	2
X2P	3,3	2
R3P	10	3 Reversa
X3P	3,4	3 Reversa
R4P	12	4
X4P	9,26	4

Fonte: Autor próprio.

4.2.3 Relé Siemens - 7SA

O IED da siemens pode receber os valores dos ajustes em valores primários ou secundários, sendo que neste trabalho, os valores de entrada foram referente ao secundário.

O alcance relativo de fase segue a mesma filosofia dos já apresentados, no entanto, como optamos pela entrada em valores secundários, o cálculo para a primeira zona é similar à equação (9).

Para a determinação do alcance resistivo de fase e de terra, foram utilizados os mesmos valores do IED da ABB, apenas refletidos para valores secundários. As equações (11) e (12) representam os valores para primeira zona.

$$R1 = 45/10 = 4,5\Omega_{sec}. \quad (11)$$

$$RE1 = 80/10 = 8,0\Omega_{sec}. \quad (12)$$

Todos os parâmetros encontram-se dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados no teste do 7SA

	Valor	Zonas de atuação
R	4,5	1
X	1,745	1
RE	8,0	1
R	6,0	2
X	3,29	2
RE	10,0	2
R	6,0	3 Reversa
X	3,39	3 Reversa
RE	10	3 Reversa
R	8,0	4
X	9,23	4
RE	12,0	4

Fonte: Autor próprio.

4.3 VISUALIZAÇÃO GRÁFICA

Após ter levantado os parâmetros de todas as características, dados da linha e as relações do TC e TP, a interface contém todos os dados necessários para ser rodada e apresentar as características de operação para cada tipo de relé estudado.

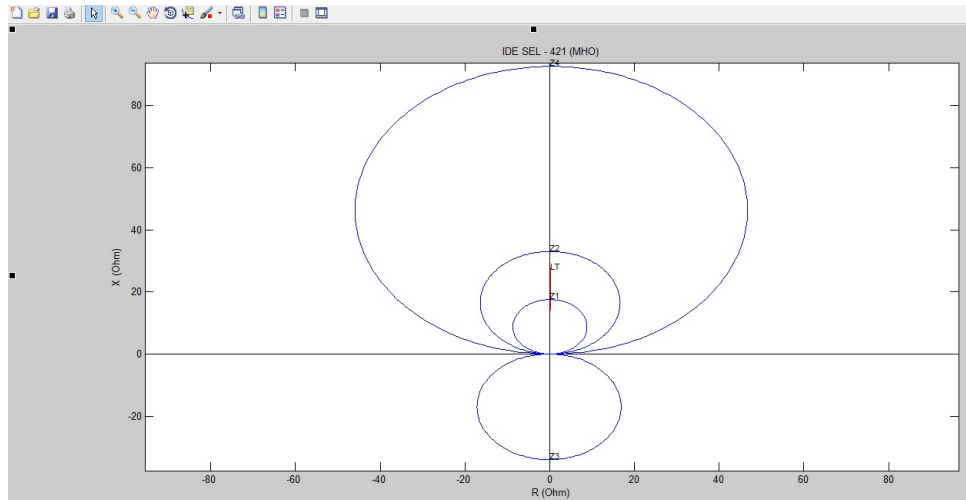
Como mencionado, os relés estudados apresentam parâmetros em escalas, assim, a fim de obter uma resposta gráfica na mesma escala, para melhor análise comparativa entre os diferentes IED's, todas as características de zonas de atuação foram geradas em Ohms primários.

4.3.1 Resultado do IED SEL-421

Quando solicitado para visualizar a características mho frente aos alcances já mencionados, tem-se uma resposta gráfica que está disposta na Figura 19.

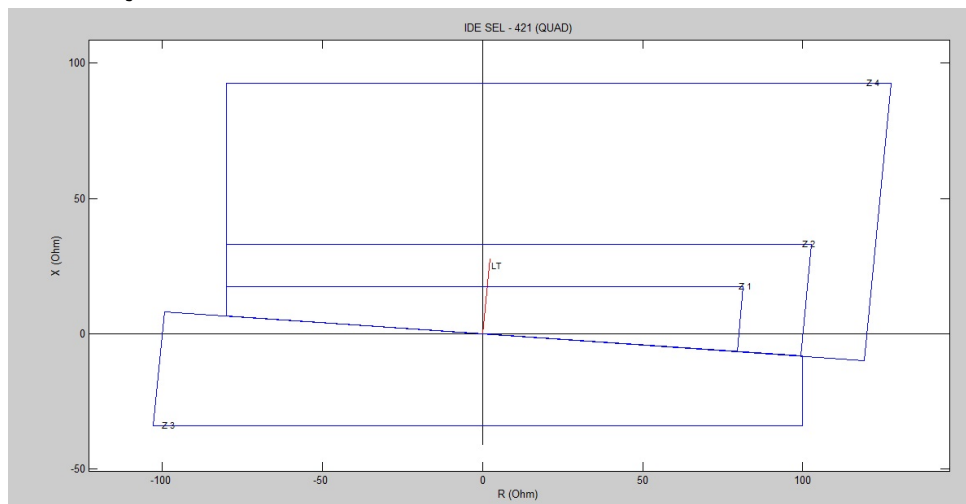
Já a imagem do comportamento quadrilateral pode ser visto na Figura 20.

Figura 19 – Visualização SEL-421 MHO



Fonte: Autor próprio.

Figura 20 – Visualização SEL-421 QUAD

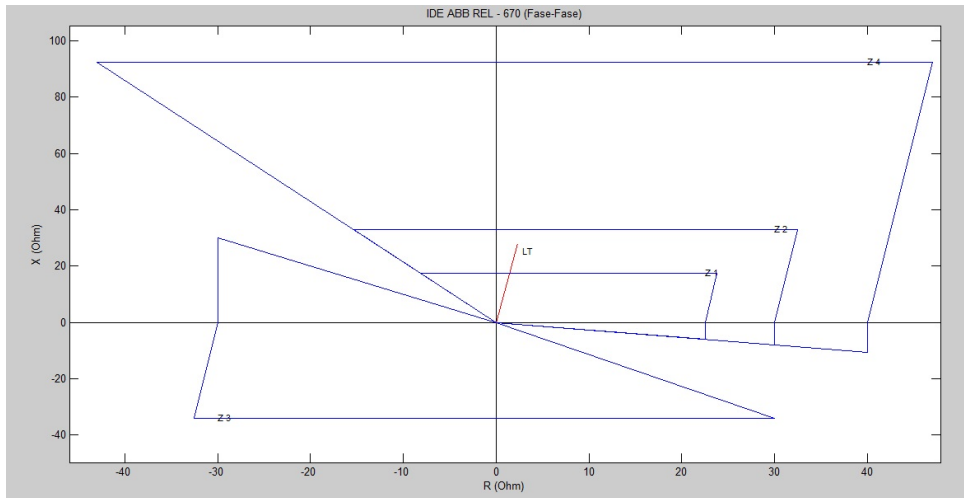


Fonte: Autor próprio.

4.3.2 Resultado do IED REL-670

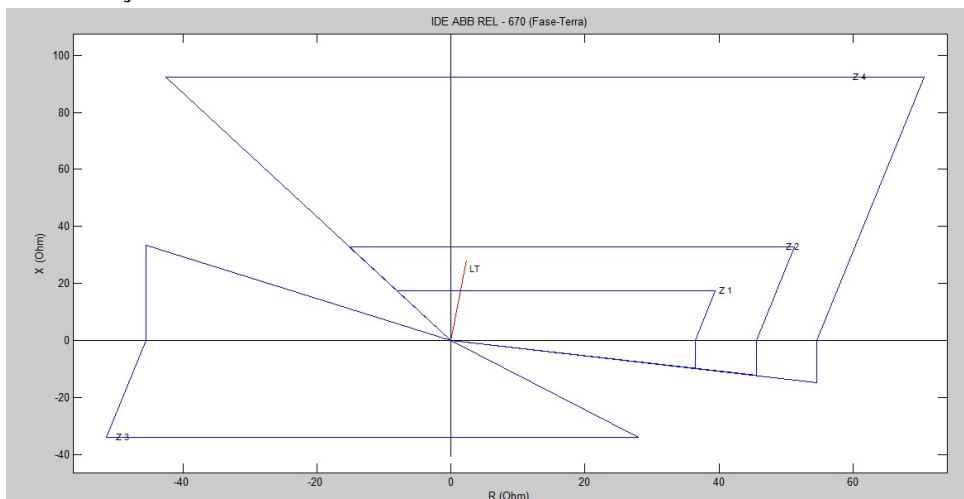
O relé da ABB, mesmo tendo apenas uma entrada para os parâmetros, possui comportamento distinto para falta fase-fase e falta fase-terra, e estão respectivamente apresentados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Visualização REL-670 Fase-Fase



Fonte: Autor próprio.

Figura 22 – Visualização REL-670 Fase-Terra



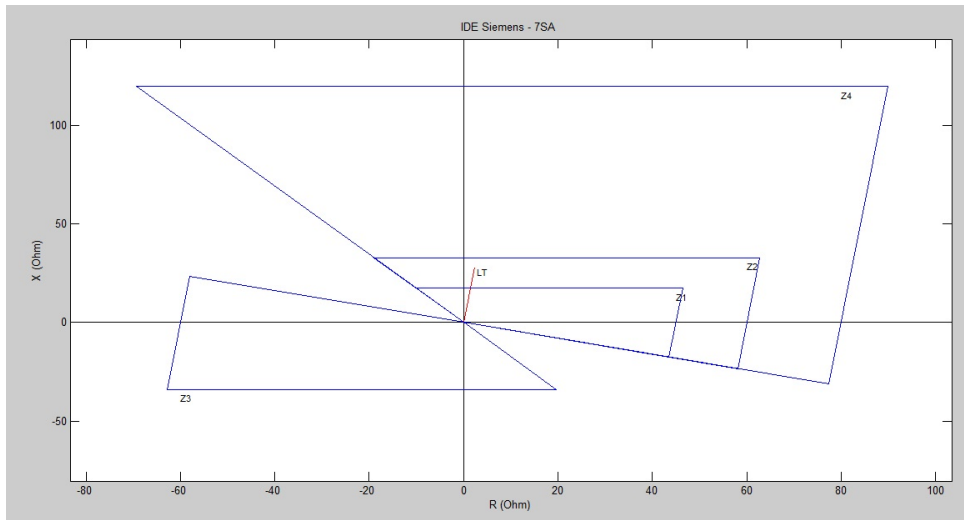
Fonte: Autor próprio.

4.3.3 Resultado do IED 7SA

O dispositivo da Siemens, após a entrada de seus parâmetros tem a resposta gráfica na Figura 23.

Todos os resultados apresentados nesta seção contém apenas o comportamento delimitante de cada zona frente aos alcances informados. A seguir, a efeito de análise comparativa entre os modelos, deve-se entrar com alguns pontos de faltas, que serão gerados sobre os gráficos já apresentados, para que com eles seja possível defrontar os diferentes relés abordados no trabalho.

Figura 23 – Visualização 7SA



Fonte: Autor próprio.

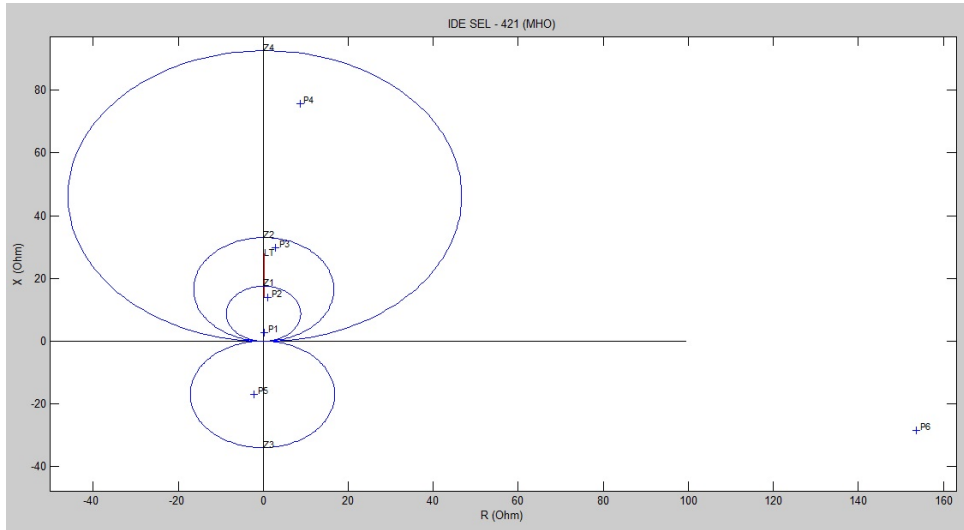
4.3.4 Resultados com os pontos de falta

Todos os resultados, apresentados anteriormente, representam apenas as características para os parâmetros já estudados de todos os relés.

Um dos objetivos deste trabalho é possibilitar a visualização dos pontos faltosos, possibilitando, assim, uma análise comparativa dentre os IED's estudados. Logo, foi feita a inserção de 6 pontos de faltas, que já foram apontados, para visualização gráfica do comportamento em cada relé.

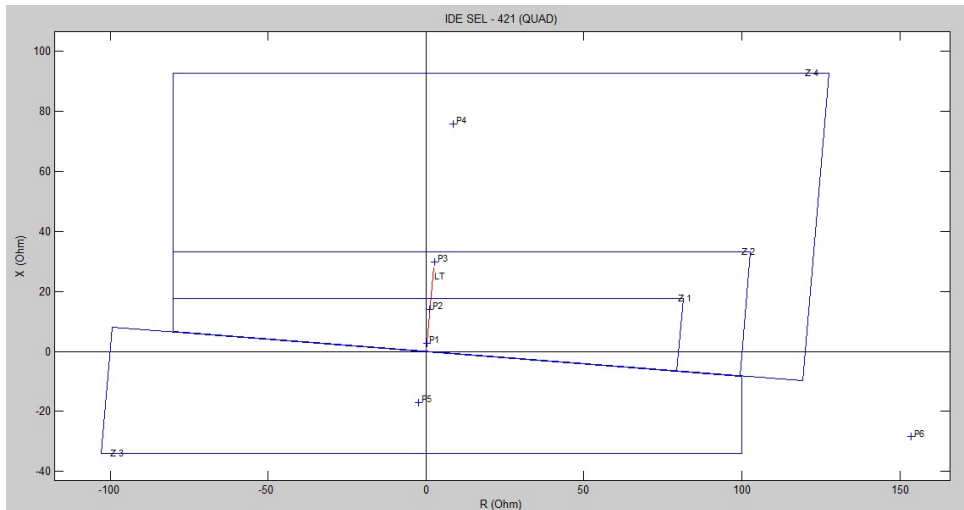
Para os pontos presentes na Tabela 7 os resultados podem ser observados nas Figuras 24, 25, 26, 27 e 28. A interface possibilita uma análise mais detalhada das representações, pois estas figuras foram capturadas para dar uma visão de maneira geral de todas as zonas, e, pela interface, é possível dar zoom nas regiões desejadas.

Figura 24 – Pontos faltosos - vista SEL-421 MHO



Fonte: Autor próprio.

Figura 25 – Pontos faltosos - vista SEL-421 QUAD



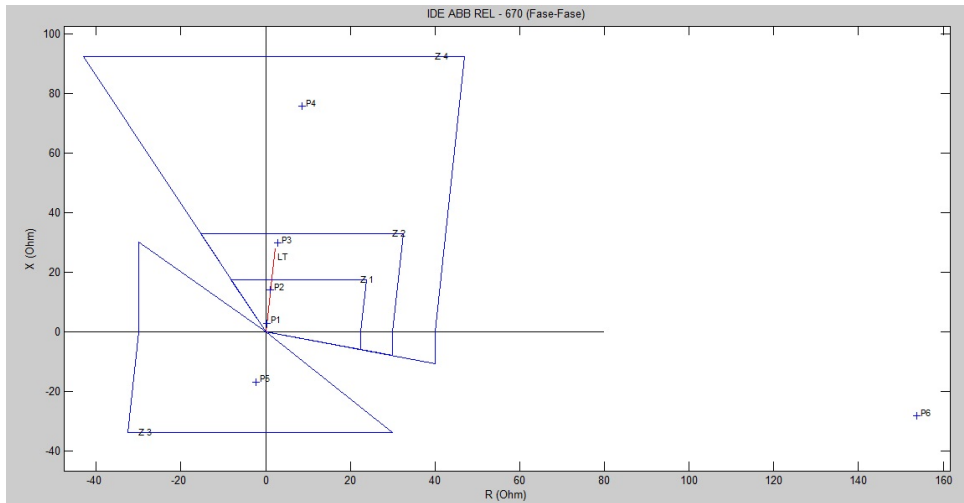
Fonte: Autor próprio.

Na Tabela 7, cada ponto apresentado foi estabelecido a uma zona, de acordo com localização que estes se deram. De tal modo foi possível pré estabelecer as áreas que cada um supostamente foi absorvido.

Enquanto, nas figuras, desta seção, está a visualização real dos pontos, frente as diferentes características. Fica notável que o comportamento em todos os casos são similares para os pontos estudados e são equivalentes ao que foi pré determinado de acordo com a localização.

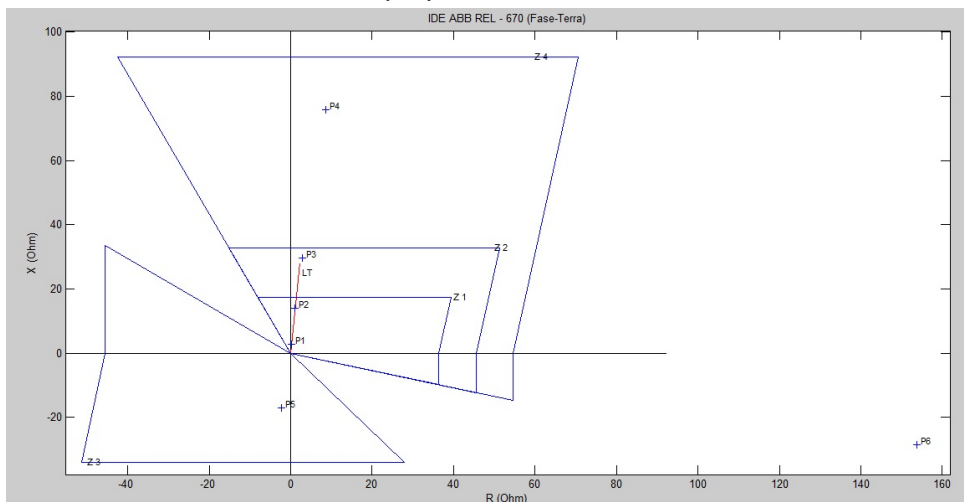
Os pontos P1 e P2 caíram na primeira zona, e como esperado, o tempo de atuação será instantâneo devido a proximidade. Já o ponto P3 foi enxergado apenas pela segunda zona.

Figura 26 – Pontos faltosos - vista REL-670 (F-F)



Fonte: Autor próprio.

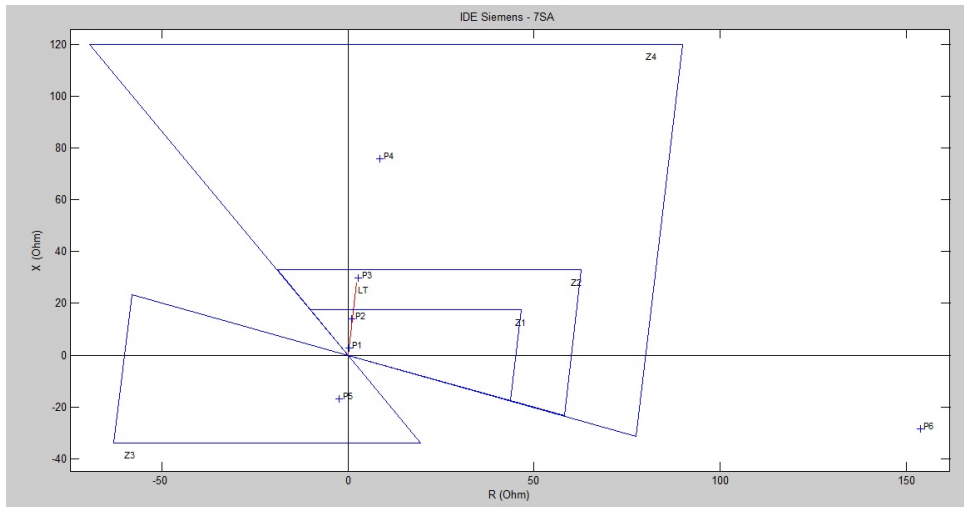
Figura 27 – Pontos faltosos - vista REL-670 (F-T)



Fonte: Autor próprio.

A quarta zona, última ajustada em nosso estudo, atuou sobre o ponto P4, sendo este ponto, o mais distante de onde localiza-se o relé. Enquanto a zona reversa, em sua maioria determinada como terceira zona, enxergou o ponto P5, pois o mesmo localiza-se atrás do ponto de instalação do IED. Por fim, o ponto P6 não ocasionaria desligamentos dos disjuntores, considerando que não foi visto por nenhuma das áreas, mesmo não estando distante, isso se deve ao alto valor de resistência.

Como pode ser visto neste capítulo, a interface conseguiu abranger os pontos desejados na sua elaboração. Permitindo, assim, a visualização de todas as características simultaneamente frente ao ambiente informado pelo usuário. Isso o permite analisar criteriosamente os princípios da função de distância, facilitando o entendimento da mesma e até determinar o melhor IED

Figura 28 – Pontos faltosos - vista 7SA

Fonte: Autor próprio.

frente ao exposto.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado a elaboração e implementação de uma interface de visualização das características das zonas de atuação dos IED's REL-670, SEL-421, 7SA para suas funções de proteção de distância. Os parâmetros de interesse para visualização destas características advém de cálculos previamente realizados pelo usuário e diferenciam-se entre os relés estudados. Através das informações contidas nestes preceitos, em conjunto com valores de impedância da LT e pontos testes, é possível obter uma visualização gráfica importante para realizar a análise do comportamento de cada característica de operação para uma linha de transmissão estudada.

Para implementação desta interface, foi utilizado o software *Matlab*, mais especificamente a ferramenta *GUIDE* para elaboração da parte gráfica. O comportamento de cada dispositivo e suas características foram realizados em linha de código com base no estudo feito sobre os manuais técnicos do fabricante, resultando em uma amostra gráfica fiel ao comportamento original, diante dos parâmetros de entrada informados.

Com o intuito de realizar uma amostragem comparativa em caráter de teste, foi necessário a entrada de parâmetros e dados retirados de um sistema de energia real, possibilitando assim, o conhecimento da filosofia de proteção utilizada para os cálculos dos ajustes da função de distância.

A interface desenvolvida possibilita, então, profissionais da área, tal como engenheiros de proteção, terem uma pré visualização do comportamento dos parâmetros calculados por estes, assim, possibilitando a idealização do comportamento das zonas de atuação antes de serem empregadas em campo. A interface pode ser aplicável, também a estes profissionais, no que tange a comparação das diferentes características de zonas de atuação, logo, a escolha, de qual característica utilizar em campo, ganha mais uma forma de se avaliar qual terá comportamento desejado.

Sua utilização didática é de grande praticidade, pois é utilizável em máquinas que possuam o software *Matlab* e é de fácil operação, contribuindo assim, para o melhor entendimento da função da proteção de distância.

O desenvolvimento deste trabalho trouxe um contato pessoal com a área de proteção de SEP's, despertando interesse no assunto e a realização de futuro aprofundamento na área.

Para trabalhos futuros, sugere-se aperfeiçoamento da interface desenvolvida no software *Matlab*, agregando ferramentas e funções que trabalhem em conjunto com a função de proteção de distância.

Há a possibilidade de torná-la mais leve visualmente, incluir a área da carga em que o relé não deve operar, criação de uma ferramenta de exportação e importação de dados,

facilitando o uso do mesmo estudo em utilizações futuras e, também, a inclusão de novos IED's e características, das zonas de atuação, para comparação com as já apresentadas.

REFERÊNCIAS

- ABB. **Technical reference manual: Line distance protection IED REL670**. Sweden: ABB Power Technologies AB, 2006. Citado na página 16.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas** - versão acadêmica, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 35.
- FILHO, João Mamede. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- GUARINI, Priscilla de Castro. **Esquemas de controle de segurança aplicados à operação do Sistema Interligado Nacional**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Citado na página 10.
- GUZMAN, A; ROBERTS, J; SCHWEITZER, E O. **Z=V/I não faz um relé de distância**. Washington: SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.A. **Perguntas e Respostas**. 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/educativo/perguntas_respostas.aspx#questao-01>. Acesso em: 08 de março de 2016. Citado na página 10.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.B. **O que é o SIN (Sistema Interligado Nacional)**. 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 08 de março de 2016. Citado na página 10.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.C. **Mapas do SIN**. 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 10 de março de 2016. Citado na página 11.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.D. **Extensão das linhas de transmissão do SIN**. 2013. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2013/html/07-02-Extensao-das-Linhas-de-Transmissao-do-SIN-km.html?expanddiv=07>. Acesso em: 11 de março de 2016. Citado na página 10.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.E. **Base de dados de Curto-Circuito e Casos de Referências**. 2017. Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/base_dados_curtoc_referencia.aspx>. Acesso em: 09 de maio de 2017. Citado na página 31.
- SANTOS, Vanessa Alves dos. **Proteção de distância aplicada a linhas de transmissão em circuito duplo**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- SEL. **SEL-421-4, -5 Relay: Protection and Automation System**. Washington: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 2010. Citado na página 18.
- SIEMENS. **Distance protection 7SA6**. German: Siemens AG, 2005. Citado na página 21.