



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

HOTONIONES BEZERRA DA SILVA

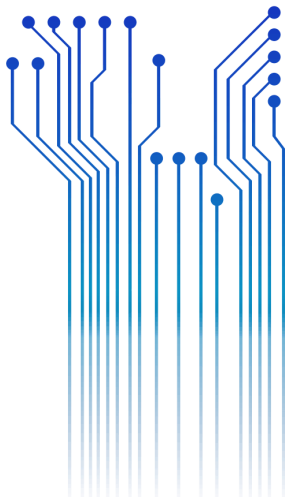
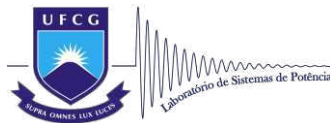


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática



Departamento de
Engenharia Elétrica

INTRODUÇÃO AOS RELÉS DE DISTÂNCIA COM FOCO NA ETAPA DE PARAMETRIZAÇÃO



Campina Grande – PB.

2018

HOTONIONES BEZERRA DA SILVA

**INTRODUÇÃO AOS RELÉS DE DISTÂNCIA COM FOCO NA ETAPA DE
PARAMETRIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso 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.

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.

Orientadora

Campina Grande – PB

2018

HOTONIONES BEZERRA DA SILVA

**INTRODUÇÃO AOS RELÉS DE DISTÂNCIA COM FOCO NA ETAPA DE
PARAMETRIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso 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.

Aprovado em: ____ / ____ / _____

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora, UFCG

Campina Grande – PB

2018

AGRADECIMENTOS

Mesmo sendo clichê, mas não tem como deixar de agradecer, primeiramente, a Deus, principalmente pelas pessoas que ele colocou na minha vida. Não foi fácil percorrer esse caminho para chegar onde estou hoje, concluindo a graduação em Engenharia Elétrica, mas com certeza teria sido mais difícil sem essas pessoas na minha vida. Então vou tentar não esquecer ninguém! Quero agradecer:

Aos meus pais, Aurení Pereira da Silva e Lourival Bezerra da Silva e à minha avó Eunice Roberto, sem o apoio e incentivo deles, a minha vida toda, eu não conseguiria ser a metade da pessoa que sou hoje.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram nessa jornada e que nunca mediram esforços para me ajudar: Éricka Juyare, Arlyson Sousa, Jefferson Rayronn, Ramion Pereira e Jhonne Alencar.

Ao meu afilhado Pedro Luccas, e ao meu sobrinho Pedro Alencar, que nesses últimos anos foram uma fonte de alegria na minha vida, mostrando o quanto a felicidade está nas coisas pequenas, as quais não damos valor no dia-a-dia.

Aos meus amigos do Laboratório de Sistemas de Potência, que participaram de muitos momentos de distração comigo: Caio Junqueira, Erica Mangueira, Selma Oliveira, Jamile Nascimento, Melyna Simões, Ramayana Pereira, Rafaella Meira, Luís Gustavo, Cecília Alves e Laysa Souza. Cada um deles sabe o quanto foi importante nessa jornada.

Aos meus amigos de graduação, que além do choro nas disciplinas, estávamos sempre juntos, firmes e fortes: Cynthia Lima, Yllber Silva, Pollyana Cirino, Sanny Emanuelle, Rayanna Francklim, Priscila Costa e Phablo Vinícius.

A minha namorada, Késsia Fayne, pela paciência, carinho e me apoiar nos momentos de dificuldades durante esse último período de graduação.

Aos funcionários Adail e Tchaikowsky por todo o apoio nos momentos difíceis, pelos bons conselhos e apoio sempre que precisei.

Por fim e mais relevante, a minha orientadora, Núbia Silva Dantas Brito, que confiou a oportunidade, e tem apoiando e guiando todos os meus passos durante a graduação. Admiro-a e sou fã do seu trabalho como orientadora e me espelho nos seus passos e suas atitudes como pessoa. Hoje sou uma pessoa e profissional muito melhor depois de trabalhar com ela.

“O nosso crescimento pessoal está intrínseco às relações com outras pessoas. Sábio aquele que, todos os dias, compartilha o seu conhecimento e aprende com os outros.”

Caio Junqueira

RESUMO

Uma das etapas mais importantes no processo de projeto do sistema de proteção é a de parametrização do relé, que consiste na inserção dos dados do estudo de seletividade e coordenação da proteção, os quais podem ser inseridos via frontal do relé ou através de *softwares* específicos. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) insere-se nesse contexto e apresenta o estudo dos fundamentos da proteção de distância e o detalhamento da etapa de parametrização de alguns modelos de relés de distância disponíveis no Laboratório de Proteção Digital (LabPro) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Palavras-chave: parametrização, relé de distância e proteção de sistemas elétricos.

ABSTRACT

One of the most important steps in the process of protection system design is parameterization of the relay, which consists on the insertion of data from selectivity study and protection coordination. This undergraduate final project is part of this context and presents a study of distance protection foundations and parameterization step for some relay models available on the Digital Laboratory Protection (LabPro) of the Electrical Engineering Department (DEE) from the Federal University of Campina Grande (UFCG).

Keyword: parameterization, distance relay and protection of electrical systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Sistema de proteção típico. | 13 |
| Figura 2 – Linha do tempo dos relés de proteção. | 14 |
| Figura 3 – Principais subsistemas de um relé digital. | 15 |
| Figura 4 – Diagrama unifilar de uma LT com dois terminais. | 16 |
| Figura 5 – Diagrama R-X. | 17 |
| Figura 6 – Tipos de características de operação do relé de distância: (a) impedância; (b) mho; (c) lenticular; (d) retângulo. | 17 |
| Figura 7 – Característica mho no plano R-X. | 18 |
| Figura 8 – Característica quadrilateral no plano R-X. | 18 |
| Figura 9 – Representação das zonas de proteção de um relé de distância. | 18 |
| Figura 10 – Metodologia proposta. | 20 |
| Figura 11 – Janela do <i>software</i> | 21 |
| Figura 12 – Ilustração do relé digital SEL 311C. | 22 |
| Figura 13 – Ilustração do relé digital REL 670. | 24 |
| Figura 14 – SEP de 230 kV. | 27 |
| Figura 15 – Sistema teste modelado no <i>software</i> | 28 |
| Figura 16 – Ilustração das faltas dos estudos de caso. | 35 |
| Figura 17 – Caso 1 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 36 |
| Figura 18 – Caso 1 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica quadrilateral. | 37 |
| Figura 19 – Caso 1 (REL 670): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 38 |
| Figura 20 – Caso 1 (REL 670): Diagrama R-X da característica quadrilateral. | 39 |
| Figura 21 – Caso 3 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 40 |
| Figura 22 – Caso 3 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica mho. | 41 |
| Figura 23 – Caso 3 (REL 670): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 42 |
| Figura 24 – Caso 3 (REL 670): Diagrama R-X da característica mho. | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 – Caso 6 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 44 |
| Figura 26 – Caso 6 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica quadrilateral. | 45 |
| Figura 27 – Caso 6 (REL 670): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 46 |
| Figura 28 – Caso 6 (REL 670): Diagrama R-X da característica quadrilateral..... | 47 |
| Figura 29 – Caso 7 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 48 |
| Figura 30 – Caso 7 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica quadrilateral. | 49 |
| Figura 31 – Caso 7 (REL 670): Aplicação da falta no módulo <i>System Simulator</i> | 50 |
| Figura 32 – Caso 7 (REL 670): Diagrama R-X da característica quadrilateral..... | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parâmetros de ajuste do relé SEL 311C. | 23 |
| Tabela 2 – Parâmetros de ajuste do relé REL 670..... | 25 |
| Tabela 3 – Configurações dos relés SEL 311C e REL 670..... | 26 |
| Tabela 4 – Parâmetros das linhas modeladas. | 27 |
| Tabela 5 – Parâmetros dos equivalentes utilizados. | 27 |
| Tabela 6 – Estudos de casos. | 35 |
| Tabela 7 – Caso 1 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 36 |
| Tabela 8 – Caso 1(SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 37 |
| Tabela 9 – Caso 1 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 38 |
| Tabela 10 – Caso 1 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 39 |
| Tabela 11 – Caso 3 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 40 |
| Tabela 12 – Caso 3 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 41 |
| Tabela 13 – Caso 3 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 42 |
| Tabela 14 – Caso 3 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 43 |
| Tabela 15 – Caso 6 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 44 |
| Tabela 16 – Caso 6 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 45 |
| Tabela 17 – Caso 6 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 46 |
| Tabela 18 – Caso 6 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 47 |
| Tabela 19 – Caso 7 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 48 |
| Tabela 20 – Caso 7 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 49 |
| Tabela 21 – Caso 7 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>System Simulator</i> | 50 |
| Tabela 22 – Caso 7 (REL 670): Relatório de falta do módulo <i>Coordination Graphics</i> | 51 |
| Tabela 23 – Tempo total de atuação dos relés..... | 52 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ABB | <i>ABB Group Automation Company</i> |
| ANEEL | Agencia Nacional de Energia Elétrica |
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i> |
| CAPE | <i>Computer Aided Protection Engineering</i> |
| DEE | Departamento de Engenharia Elétrica |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| km | Unidade de medida de distância – quilometro |
| LabPro | Laboratório de Proteção |
| LSP | Laboratório de Sistema de Potência |
| LT | Linha de Transmissão |
| ms | Milissegundos - unidade de medida de tempo |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| p.u. | Por unidade |
| R | Parte real do plano complexo |
| SEL | <i>Schweitzer Engineering Laboratories</i> |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| TCC | Trabalho de Conclusão de Curso |
| UFCG | Universidade Federal de Campina Grande |
| X | Parte imaginária do plano complexo |
| Z | Impedância |
| Z1G | Primeira zona de terra |
| Z1P | Primeira zona de fase |
| Z2P | Segunda zona de fase |
| Z3P | Terceira zona de fase |
| Ω | Unidade de medida de resistência elétrica – ohm |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 1 | Introdução | 12 |
| 2 | Fundamentação teórica | 13 |
| 3 | Metodologia | 20 |
| 3.1 | O <i>software</i> de simulação | 20 |
| 3.2 | Os relés utilizados | 22 |
| 3.3 | Sistema teste | 27 |
| 4 | Estudo de caso | 35 |
| 4.1 | Caso 01 | 36 |
| 4.1.1 | SEL 311C | 36 |
| 4.1.2 | REL 670 | 38 |
| 4.2 | Caso 03 | 40 |
| 4.2.1 | SEL 311C | 40 |
| 4.2.2 | REL 670 | 42 |
| 4.3 | Caso 06 | 44 |
| 4.3.1 | SEL 311C | 44 |
| 4.3.2 | REL 670 | 46 |
| 4.4 | Caso 07 | 48 |
| 4.4.1 | SEL 311C | 48 |
| 4.4.2 | REL 670 | 50 |
| 4.5 | Análise geral dos resultados | 52 |
| 5 | Conclusão | 53 |
| | Referências | 54 |

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica é regulamentada pela Resolução Normativa nº 270 de 26 de junho de 2007 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual é medida com base na disponibilidade e na capacidade plena das funções de transmissão, sendo estas consideradas indisponíveis quando ocorre desligamento programado ou outros desligamentos ou atraso na entrada em operação (ANEEL, 2016).

Devido à sua grande extensão, as linhas de transmissão (LT) estão sujeitas às intempéries e dentre os elementos susceptíveis às faltas, as LT são os que possuem as maiores e mais expressivas taxas de faltas (COUTINHO, 2012). Entretanto, o sistema elétrico de potência (SEP) dispõe do sistema de proteção para assegurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica aos usuários, bem como salvaguardar as pessoas e as instalações do sistema, atuando de forma rápida e precisa. Dos vários equipamentos utilizados para protegerem as LT, um dos mais utilizados atualmente são os relés de distância, cujo princípio de operação baseia-se na medição da impedância, admitância ou reatância de sequência positiva entre o ponto onde o mesmo se encontra instalado e o ponto de falta (COSTA, 2016).

Uma das etapas mais importantes no processo de instalação de um relé no sistema elétrico é a etapa de parametrização, na qual são inseridos os parâmetros do relé. Neste contexto desenvolveu-se o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), o qual teve como objetivo geral realizar o processo de parametrização da função de distância de relés de proteção LT e como objetivos específicos: i) estudar a fundamentação teórica da função de proteção de distância; ii) avaliar o uso de um *software* comercial no processo de parametrização do relé de distância; iii) realizar estudo de caso.

Este relatório apresenta resumidamente, o estudo realizado e foi estruturado conforme a seguir.

- Capítulo 1: introdução;
- Capítulo 2: fundamentação teórica requerida para o desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 3: apresentação da metodologia adotada;
- Capítulo 4: exposição e discussão dos resultados obtidos;
- Capítulo 5: apresentação das conclusões finais;
- Referências bibliográficas.

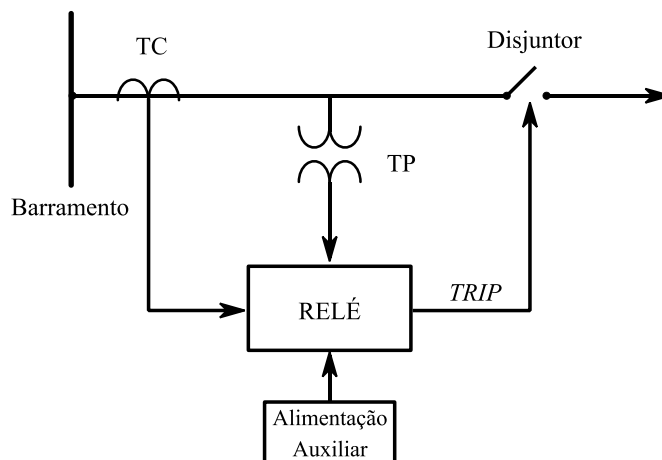
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de produção tradicional de energia elétrica inicia nas usinas de energia elétrica e a partir das subestações elevadoras, partem as LT que transportam a eletricidade até às subestações abaixadoras. A partir daí inicia o sistema de distribuição de energia elétrica, o qual é responsável pela entrega de tensão e corrente elétrica nos níveis requeridos pelo consumidor, independentemente de sua distância e critérios de exigência (NASCIMENTO, 2018).

A proteção desse sistema é feita pelo sistema de proteção, definido como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos e para outras condições de operação anormais em componentes do sistema (ONS, 2011). O princípio de funcionamento de um sistema de proteção típico pode ser descrito conforme apresentado a seguir (SÁ, *et al.*, 2010).

Os transdutores ou transformadores para instrumentos (transformador de potencial e de corrente) reduzem as amplitudes das grandezas envolvidas (tensão e/ou corrente) para níveis aceitáveis de leitura e acesso seguro. Em seguida, essas informações são disponibilizadas ao relé, que se encarrega de processá-las. Caso os valores das grandezas excedam valores pré-definidos, os contatos do relé são fechados e um sinal de *trip* (ou de desligamento) é enviado ao disjuntor associado. Neste instante, a bobina de abertura do disjuntor é energizada, o que resulta na abertura dos contatos principais do disjuntor e isolamento do componente ou circuito sob falta. O sistema de proteção apresentado na Figura 1 é complementado pelo banco de baterias que fornece energia ao sistema de proteção em caso de falta.

Figura 1 – Sistema de proteção típico.



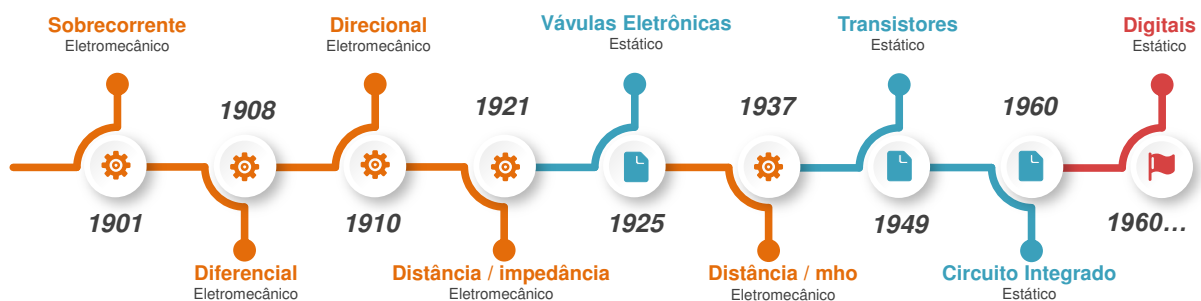
Fonte: autoria própria.

Para atender aos requisitos da filosofia da proteção, um sistema de proteção deve satisfazer aos seguintes objetivos (GUERRA, 2016):

- Confiabilidade - o sistema de proteção deve atuar apenas em caso de defeito.
- Sensibilidade - a faixa de incerteza entre as condições de operação e de não operação deve ser a menor possível.
- Velocidade - o sistema de proteção deve atuar da forma mais rápida possível, de modo a evitar danos aos componentes da rede elétrica ou perda de estabilidade do sistema.
- Seletividade - o defeito deve ser eliminado desligando-se a menor parte possível da rede, de modo a ser mantido o máximo índice de continuidade de serviço.
- Economia - o custo do sistema de proteção deve ser economicamente viável, de acordo com o custo do equipamento protegido e com a importância em relação ao funcionamento do resto do SEP.

Dentre os elementos constituintes do sistema de proteção, o relé é sem dúvida o mais importante, o qual vem evoluindo ao longo do tempo, seguindo os avanços tecnológicos, conforme ilustrado na Figura 2 (COUTINHO, 2012).

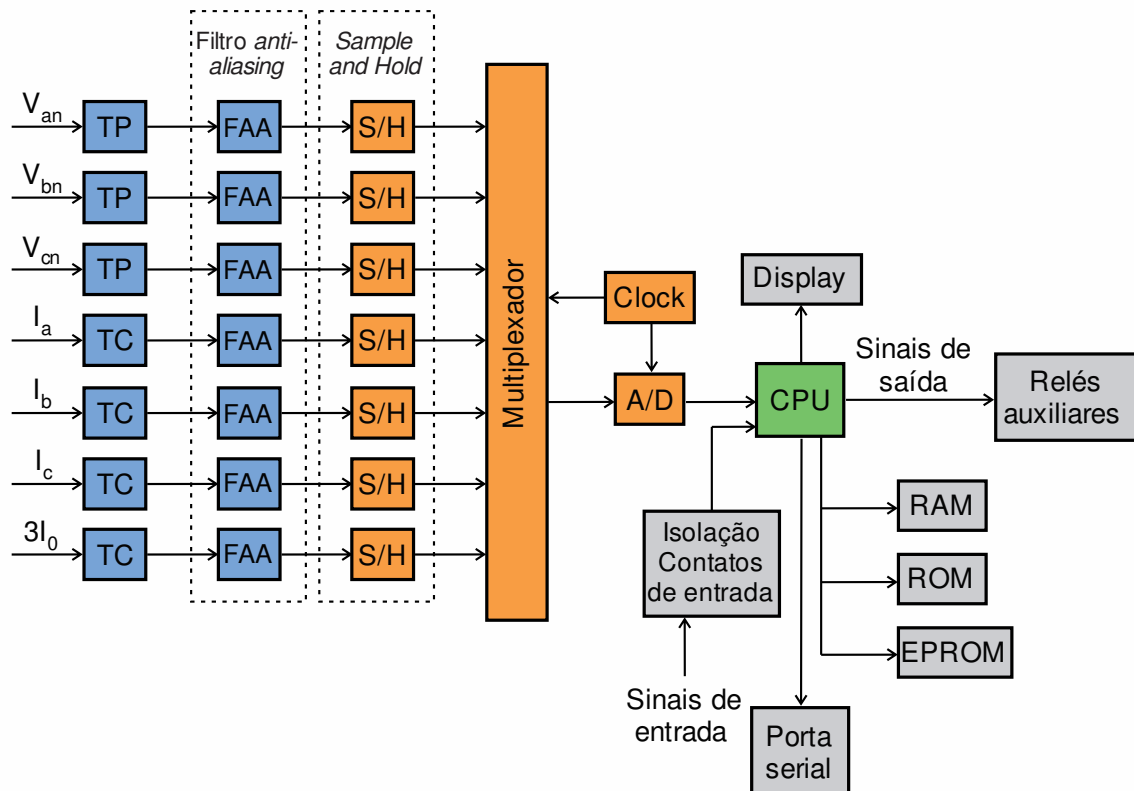
Figura 2 – Linha do tempo dos relés de proteção.



Fonte: adaptado pelo autor (COSTA, 2016).

Hoje predominam os relés digitais, que são equipamentos gerenciados por microprocessadores, cujo controle é realizado por um *software*, no qual os dados de entrada são digitalizados. O *hardware* de um relé digital típico é constituído por unidades ou subsistemas mostrados na Figura 3, dentre as quais destacam-se (COSTA, BRITO, & SOUZA, 2018):

Figura 3 – Principais subsistemas de um relé digital.



Fonte: COSTA (2016).

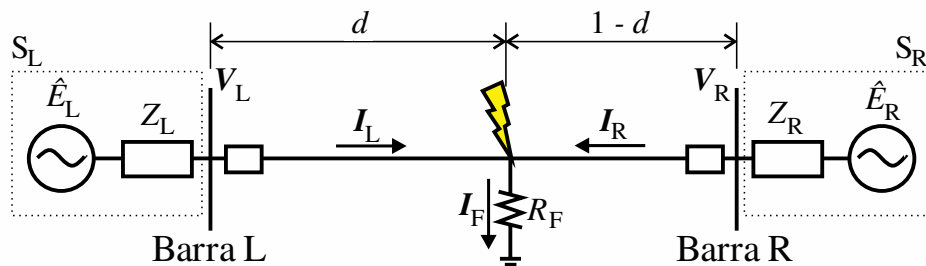
- Unidade de condicionamento de sinais: constituída por filtros *anti-aliasing*, responsáveis por evitar a ocorrência de sobreposição de espectro durante a amostragem dos sinais.
- Unidade de aquisição de dados: constituída pelo circuito *sample-and-hold*, multiplexador e conversor analógico/digital, que digitaliza os sinais analógicos provenientes da unidade de condicionamento de sinais.
- Unidade de processamento de dados: controla o funcionamento do relé e extrai a componente fundamental. A partir da execução dos cálculos, essa unidade decide se serão enviados sinais de comando para a abertura do disjuntor local e de disparo ou bloqueio para os relés nos terminais remotos.

Dentre os vários esquemas utilizados para proteção das LT, um dos mais utilizados são os que fazem uso de relés de distância, visto que eficientes e rápidos na isolação de faltas, além de permitirem ajustes de proteção principal e de retaguarda de forma mais simples (COSTA, BRITO, & SOUZA, 2018).

O relé de distância tem como objetivo medir a impedância, admitância ou reatância de sequência positiva entre o ponto onde se encontra instalado e o ponto de falta, tomando como

base as grandezas medidas pelos transformadores para instrumentos (COSTA, 2016). Ele é assim chamado por comparar os valores medidos com a distância em relação ao ponto de medição. Quando uma falta com resistência R_F ocorre a uma distância d por unidade da Barra L, a corrente de ambos os terminais, \hat{I}_L e \hat{I}_R , contribuem para a corrente total de falta \hat{I}_F . A LT tem impedância de sequência positiva Z_{LT1} entre os terminais L e R. Os equivalentes de Thévenin S_L e S_R representam os SEP conectados a cada terminal. Como é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama unifilar de uma LT com dois terminais.



Fonte: COSTA (2016).

De acordo com a literatura especializada, a queda de tensão do terminal L é dada pela equação:

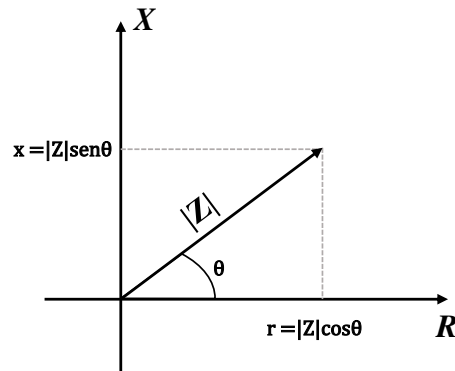
$$\hat{V}_L = dZ_{LT1}\hat{I}_L + R_f\hat{I}_f \quad (1)$$

O valor da impedância aparente Z_{ap} medida no terminal L é encontrada dividindo-se a equação 1 pela corrente \hat{I}_L :

$$Z_{ap} = \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L} = dZ_{LT1} + \frac{R_f\hat{I}_f}{\hat{I}_L} \quad (2)$$

A representação da característica de operação de relés de distância é realizada comumente, em um plano complexo, denominado diagrama R-X apresentado na Figura 5, o qual é formado pela parte real R e imaginária X, da impedância Z em estudo (COUTINHO, 2012).

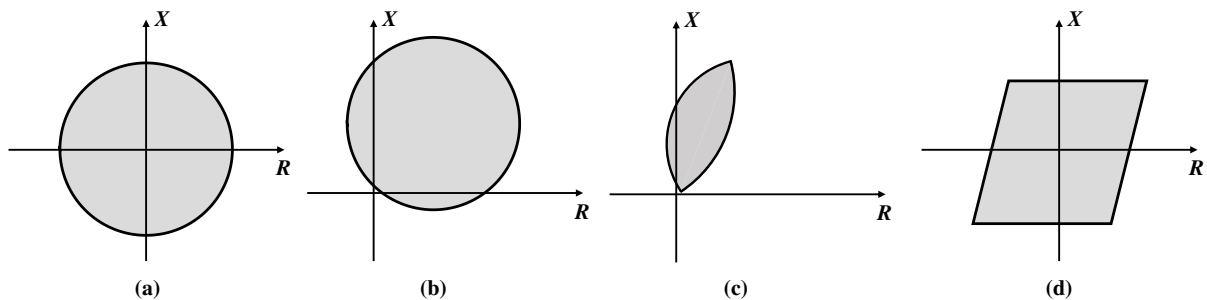
Figura 5 – Diagrama R-X.



Fonte: autoria própria.

A atuação do relé de distância ocorre quando a impedância aparente (impedância medida pelo relé) está dentro da característica de operação, que consiste em uma figura geométrica no diagrama R-X. Várias figuras geométricas podem ser utilizadas, como por exemplo: círculos, retângulos, elipses e também a combinação delas, como é mostrado na Figura 6. A escolha depende do sistema a ser protegido e das características disponíveis no relé (ANDERSON, 1999).

Figura 6 – Tipos de características de operação do relé de distância: (a) impedância; (b) mho; (c) lenticular; (d) retângulo.



Fonte: adaptado pelo autor (ANDERSON, 1999).

As características mais comuns encontradas nos relés de distância comerciais são:

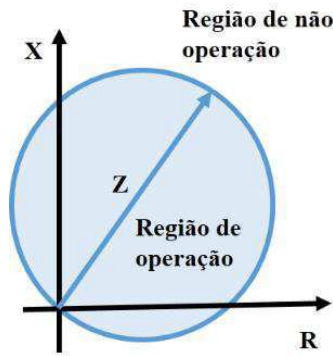
- A característica mho apresentada na Figura 7 é representada por uma circunferência que passa pela origem do diagrama R-X. Sua região de operação é delimitada pela área de cobertura e suas vantagens são: alcance finito, direcionalidade, boa acomodação da resistência de falta e menor sensibilidade às oscilações de potência;

A característica quadrilateral representada na

- Figura 8 é o resultado da combinação de quatro unidades de medição: uma unidade de reatância, duas unidades resistivas e um elemento direcional. Pode ser modificada

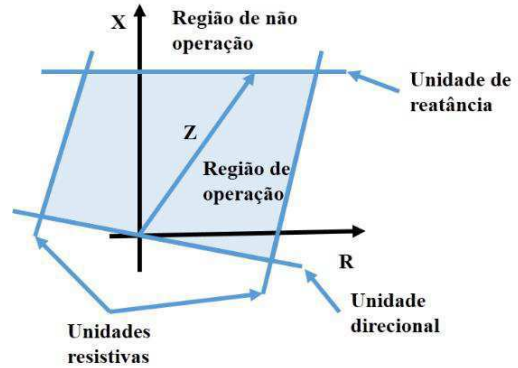
para incluir uma área desejada, sendo utilizada especialmente em faltas envolvendo a terra (MEIRA, 2018).

Figura 7 – Característica mho no plano R-X.



Fonte: MEIRA (2018).

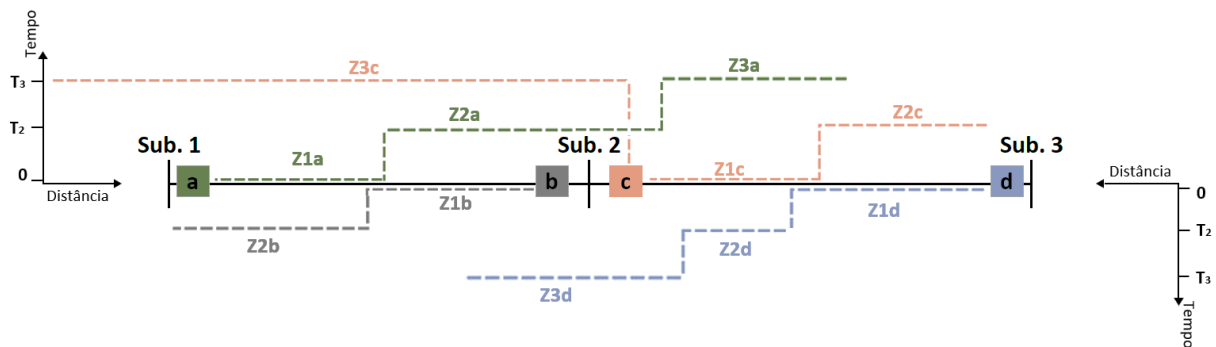
Figura 8 – Característica quadrilateral no plano R-X.



Fonte: MEIRA (2018).

A zona de proteção é a região de operação do relé de distância, definido pela impedância que deseja proteger. Em LT, são definidas zonas de proteção com diferentes impedâncias de alcance, as quais são proporções da impedância em relação à distância, associadas a diferentes tempos de atraso, como é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Representação das zonas de proteção de um relé de distância.



Fonte: PEREIRA (2018).

A impedância de alcance da 1ª zona de proteção corresponde normalmente, a uma porcentagem de 80% a 85% da impedância total da LT a ser protegida e deve atuar instantaneamente. A 2ª zona de proteção cobre geralmente 100% da LT a ser protegida pela zona primária, mais em torno de 50% da menor LT que emane de seu terminal remoto, com operação retardada de um tempo na faixa de 200 a 500 ms. A 3ª zona de proteção é ajustada para proteger 100% da menor LT que emana do terminal remoto da LT a ser protegida pela zona primária, mais 20% da menor LT a sua jusante, com operação retardada de um tempo na ordem de 800 ms (MEIRA, 2016).

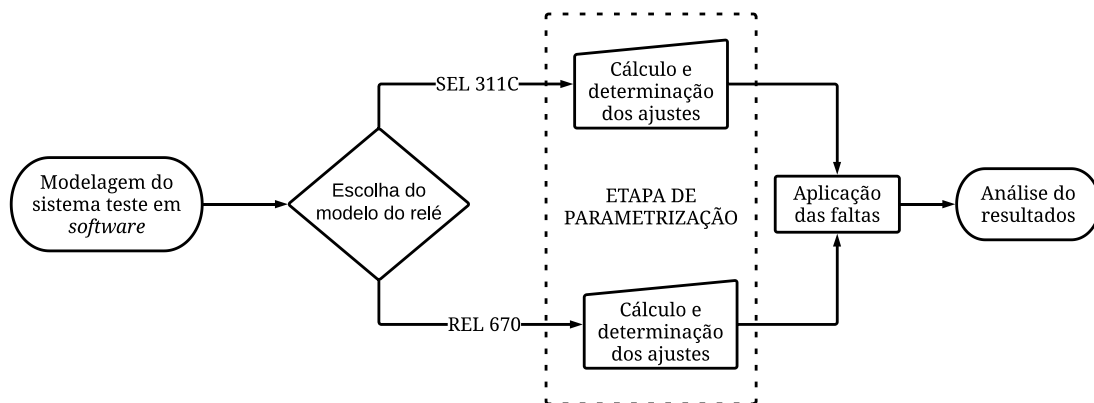
A etapa de parametrização do relé de distância tem como objetivo inserir os ajustes da proteção, os quais são definidos conforme o estudo de curto circuito e seletividade. Essa etapa é importantíssima e é imprescindível que seja realizada corretamente.

3 METODOLOGIA

Este trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvido no Laboratório de Proteção Digital (LabPro), alocado no prédio do Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) do DEE/UFCG. Os estudos de caso foram avaliados no *software Computer Aided Protection Engineering (CAPE)* e utilizados os relés de distância SEL 311C do *Schweitzer Engineering Laboratories (SEL)* e REL670 da *ABB Group Automation Company (ABB)*.

Apresenta-se na Figura 10 a metodologia utilizada no trabalho, a qual iniciou fazendo a modelagem do sistema, depois o cálculo, determinação dos parâmetros e ajustes de acordo com a escolha do relé, etapa denominada de parametrização. Por fim, analisaram-se os resultados obtidos nos estudos de casos.

Figura 10 – Metodologia proposta.



Fonte: autoria própria.

3.1 O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

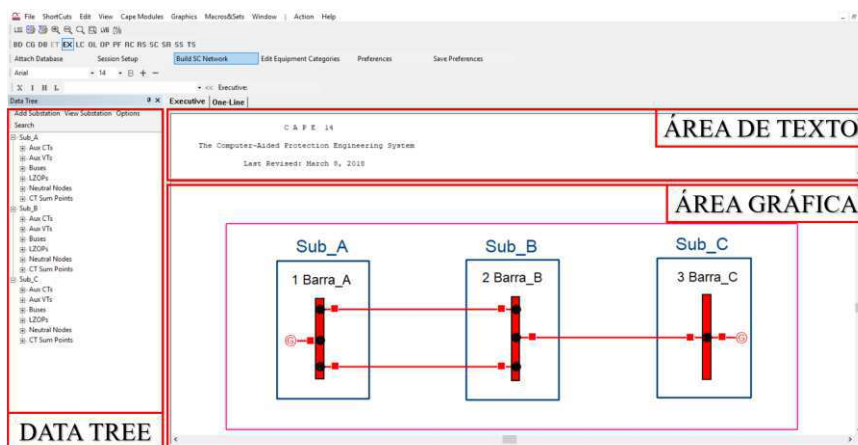
O CAPE foi desenvolvido pela *Electrocon International Inc.* em 1990 e sua principal função é modelar sistemas de proteção de redes elétricas para gerenciamento e análise de dados. O *software* possui as seguintes funcionalidades (CAPE, 2018):

- Capacidade de modelagem detalhada do SEP com base em um banco de dados único em código aberto;
- Suporte para análise e simulação. Visa solucionar problemas de gerenciamento de dados, identificar potencialidades, alternativas ou problemas da rede dos dispositivos de proteção;
- Suporte para lidar com SEP de qualquer tamanho;
- Suporte para configuração complexa dos modernos relés digitais;

- Suporte para funções de coordenação de relés.

Apresenta-se na Figura 11 a área de trabalho do *software*, a qual é dividida em três partes: área de trabalho, na qual são exibidos os relatórios sobre as ações realizadas; área gráfica, na qual são apresentados os elementos gráficos do sistema ou diagramas; *data free*, onde é exibida uma lista dos elementos técnicos do sistema modelado.

Figura 11 – Janela do *software*.



Fonte: autoria própria.

O *software* foi desenvolvido no formato modular, os quais possuem funções específicas e compartilham informações entre si através de uma base de dados comum. Uma breve descrição dos principais módulos usados neste trabalho é exposto a seguir (CAPE, 2018):

- Módulo *Database Editor* – módulo principal, visto que se comporta como sendo um arquivo geral de todas as informações que servirão de apoio aos outros módulos. As informações armazenadas neste módulo são os dados técnicos relativos aos modelos de transformador, relé, religadores, fusíveis, bem como outros componentes do SEP.
- Módulo *One-Line Diagram* – módulo de modelagem e edição do banco de dados do sistema de proteção. Nele constrói-se o diagrama unifilar do SEP e também permite a exibição de dados e resultados das simulações.
- Módulo *Short Circuit* – módulo para simular diferentes tipos de faltas e realizar análise dos dispositivos de proteção, visto que suas funções estão integradas a todos os outros módulos do *software*.
- Módulo *Coordination Graphics* – módulo para a visualização gráfica das curvas características das funções de proteção, onde é possível visualizar a resposta de uma unidade de proteção, após simulação de uma falta no módulo *Short Circuit*,

visualizando-se a zona de operação e tempo de eliminação da falta. Permite ainda, a manipulação gráfica das curvas.

- Módulo *System Simulator* – módulo para avaliar a coordenação das proteções instaladas no SEP, indicando a função de proteção e o respectivo tempo de operação. A simulação é realizada por etapa, o que permite a interrupção sempre que ocorrer a atuação de proteção. Possibilita a variação dos parâmetros das funções de proteção ou até mesmo, do tipo de falta.

3.2 OS RELÉS UTILIZADOS

Os relés utilizados no estudo estão disponíveis no LabPro, um laboratório que tem como finalidade o desenvolvimento de pesquisas na área de Proteção de Sistemas Elétricos.

O SEL 311C ilustrado na Figura 12 é um relé produzido pela empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) para proteção de LT. Ele possui: i) conjunto de elementos de proteção de fase e terra associados à função de bloqueio por oscilação de potência e à um religador com quatro tentativas de religamento; ii) diversos esquemas de abertura através da proteção de distância com zonas temporizadas e baseados nos sistemas de comunicação; iii) disparo e religamento mono ou tripolar (SELINC, 2015).

Figura 12 – Ilustração do relé digital SEL 311C.



Fonte: autoria própria.

A empresa SEL emprega na nomenclatura de seus parâmetros de ajuste a padronização utilizada na tabela de proteção elaborada pela *American National Standards Institute* (ANSI). A função de cada parâmetro utilizado no SEL 311C é apresentada na Tabela 1.

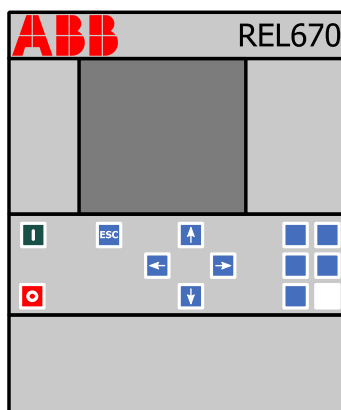
Tabela 1 – Parâmetros de ajuste do relé SEL 311C.

| PARÂMETRO | DESCRIÇÃO |
|------------------|---|
| CTR | Relação dos TC das fases (A, B, C) |
| PTR | Relação dos TP das fases (A, B, C) |
| VNOM | Tensão nominal fase-fase secundária dos TP |
| Z1MAG | Magnitude da impedância de sequência positiva da LT |
| Z1ANG | Ângulo da impedância de sequência positiva da LT |
| Z0MAG | Magnitude da impedância de sequência zero da LT |
| Z0ANG | Ângulo da impedância de sequência zero da LT |
| LL | Comprimento da LT (sem unidade) |
| E21P | Número de zonas de distância mho de fase |
| Z1P | Alcance do elemento de distância mho de fase de zona 1 |
| 50PP1 | Grandeza de operação do elemento de supervisão de sobrecorrente fase-fase para a zona 1 |
| E21MG | Número de zonas de distância mho de terra |
| E21XG | Número de zonas de distância quadrilateral |
| XG1 | Reatância do elemento de distância quadrilateral de terra de zona 1 |
| RG1 | Resistência do elemento de distância quadrilateral de terra de zona 1 |
| XGPOL | Polarização da unidade de distância quadrilateral de terra |
| 50L1 | Elemento de sobrecorrente de fase, para supervisão do elemento de distância mho de terra e quadrilateral para a zona 1 |
| 50GZ1 | Grandeza de operação do elemento de sobrecorrente residual, para supervisão do elemento de distância mho de terra e quadrilateral para a zona 1 |
| K0M1 | Magnitude do fator de compensação da impedância de sequência zero para a zona 1 |
| K0A1 | Ângulo do fator de compensação da impedância de sequência zero para a zona 1 |
| K0M | Magnitude do fator de compensação da impedância de sequência zero para as zonas 2, 3 e 4 |
| K0A | Ângulo do fator de compensação da impedância de sequência zero para as zonas 2, 3 e 4 |
| Z1PD | Tempo de retardo independente de distância de fase da zona 1 |
| Z1GD | Tempo de retardo independente de distância quadrilateral e mho de terra da zona 1 |
| Z1D | Tempo de retardo comum de distância da zona 1 |
| ZLF | Impedância de carga no sentido direto |
| ZLR | Impedância de carga no sentido reverso |
| E32 | Cálculos correspondentes aos elementos direcionais de terra serão automáticos ou elaborados pelo usuário. |
| DIR3 | Direcionalidade dos elementos de 3ª zona |
| ECOMM | Define o esquema adotado para a proteção assistida por comunicação |

Fonte: adaptado pelo autor (SELINC, 2015).

O REL 670 ilustrado na Figura 13 é um relé produzido pela empresa *ABB Group Automation Company* (ABB). Ele disponibiliza monitoramento e controle com flexibilidade máxima e desempenho otimizado para LTs aéreas e cabos de transmissão. Fornece proteção de distância para LTs com circuito duplo, operação paralela e compensação de série. Isso, juntamente com *hardware* flexível e expansível, permite que o relé atenda a requisitos específicos. Possui também a verificação de sincronização, detecção de falha e auto religamento (ABB, 2016).

Figura 13 – Ilustração do relé digital REL 670.



Fonte: autoria própria.

O relé de distância da ABB divide seus ajustes em grupos de configuração de ajustes, para configurar a função de distância, os seguintes grupos devem ser parametrizados:

- ZMHn – para ajuste da função de distância com característica mho (sendo n a zona de proteção: 1, 2, 3, 4 ou 5);
- ZM0n – para ajuste da função de distância com característica quadrilateral (sendo n a zona de proteção: 1, 2, 3, 4 ou 5);
- ZMMn – para ajuste da função de distância completo, característica mho e quadrilateral sendo n a zona de proteção: 1, 2, 3, 4 ou 5);
- PHS – para o elemento de seleção de fase;
- ZDM1 – para o elemento comparador direcional para os ajustes de ZMHn e ZMMn;
- ZD01 – para o elemento comparador direcional para o ajuste de ZM0n;
- ZDA1 – para o elemento comparador direcional.

Cada grupo de ajuste possui um conjunto de parâmetros que as vezes se repete em outro grupo. A descrição de cada parâmetro para configuração da função de distância é apresentada na Tabela 2.


A necessidade do sistema de proteção define as funções que devem estar presentes nos relés. Um comparativo entre os relés SEL 311C e REL 670 é apresentado na Tabela 3.

Tabela 2 – Parâmetros de ajuste do relé REL 670.

| PARÂMETRO | DESCRIÇÃO |
|--------------|---|
| AngleOp | Ângulo do setor de operação |
| AngleRCA | Ângulo de relé característico |
| ArgDir | Ângulo no quarto quadrante para direção à frente |
| ArgNegRes | Ângulo no segundo quadrante para direção à frente |
| DirMode | Direcionalidade da característica mho |
| I | Corrente mínima de operação (%) |
| IBase | Corrente de base da LT (A) |
| IMinOpPE | Corrente mínima do circuito operacional para o parâmetro de terra (%) |
| IMinOpPP | Corrente mínima do circuito operacional para o parâmetro de fase (%) |
| INBlockPP | Limite da corrente 3I0 para falta fase-fase |
| INReleasePE | Limite da corrente 3I0 para falta fase-terra |
| IPol | Corrente de polarização mínima (%) |
| KMag | Fator de aumento nos modos de polarização |
| KN | Magnitude do fator de compensação de retorno de terra (ohm) |
| KNAng | Ângulo do fator de compensação de retorno à terra (°) |
| LoadEnchMode | Ativa ou desativa o ajuste de invasão de carga |
| OffsetMhoDir | Direcionalidade das características de deslocamento |
| Operation | Ativa ou desativa o grupo de ajustes |
| OperationDir | Direcionalidade de característica quadrilateral |
| OperationPE | Ativa ou desativa o parâmetro de terra |
| OperationPP | Ativa ou desativa o parâmetro de fase |
| PolMode | Quantidade de polarização para função direcional |
| R0 | Resistência da LT de sequência-zero (ohm) |
| R1 | Resistência da LT de sequência positiva (ohm) |
| RFFwPE | Alcance resistivo para a frente de terra |
| RFFwPP | Alcance resistivo a frente de fase |
| RFPE | Alcance resistivo para frente e reverso para terra (ohm) |
| RFPP | Alcance resistivo para frente e reverso para fase (ohm) |
| RFRvPE | Alcance resistivo reverso de terra |
| RFRvPP | Alcance resistivo reverso de fase |
| RLdFw | Resistência de carga à frente |
| RLdRv | Resistência de carga reversa |
| tPE | Define o temporizador da zona de terra (s) |
| tPP | Define o temporizador da zona de fase (s) |
| UBase | Tensão de base da LT (kV) |
| UPol | Tensão mínima de operação (%) |
| X0 | Reatância da LT de sequência-zero (ohm) |
| X1 | Reatância da LT de sequência positiva (ohm) |
| ZAngPE | Ângulo da impedância de alcance de sequência positiva para terra (ohm) |
| ZAngPP | Ângulo da impedância de alcance de sequência positiva para fase (ohm) |
| ZPE | Ativa ajuste de impedância de alcance de sequência positiva para terra |
| ZPP | Ativa ajuste de impedância de alcance de sequência positiva para fase |
| ZRevPE | Magnitude da impedância de alcance de sequência positiva para terra (°) |
| ZRevPP | Magnitude da impedância de alcance de sequência positiva para fase (°) |

Fonte: adaptado pelo autor (ABB, 2016).

Tabela 3 – Configurações dos relés SEL 311C e REL 670.

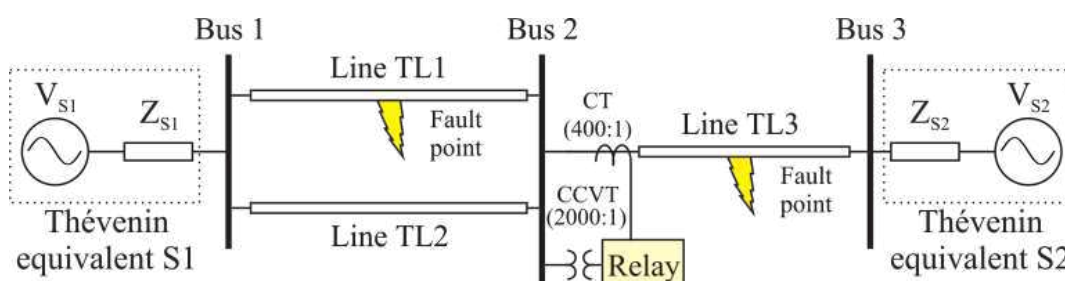
| |  SEL 311C |  REL 670 |
|--|---|--|
| Zonas proteção de distância de fase | 04 | 05 |
| Zonas proteção de distância de neutro | 04 | 05 |
| Proteção de sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente e tensão) | ✓ | ✓ |
| Proteção direcional de sequência negativa | ✓ | ✓ |
| Proteção por elemento direcional de fase | ✓ | ✓ |
| Proteção de sobrecorrente de fase instantânea e temporizada | ✓ | ✓ |
| Proteção de sobrecorrente residual instantânea e temporizada | ✓ | ✓ |
| Proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada de sequência negativa | ✓ | ✓ |
| Esquemas de controle ou teleproteção (PUTT, POTT, DCUB, DCB, DTT, etc ou lógica programável) | ✓ | ✓ |
| Proteção por disparo e bloqueio por oscilação de potência | ✓ | ✓ |
| Quantidade de religamento automático tripolar para até dois disjuntores | 04 | 05 |
| Quantidade de disjuntores para verificação de sincronismo | 01 | 02 |
| Proteção de subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases | ✓ | ✓ |
| Proteção de sobretensão residual | ✓ | ✓ |
| Proteção de sobretensão de sequência negativa | ✓ | ✓ |
| Quantidade de disjuntores para detecção de falha | 01 | 02 |
| Proteção por perda de potencial | ✓ | ✓ |
| Proteção de subfrequência e sobrefrequência, taxa de variação de frequência | ✓ | ✓ |
| Proteção de sobrecarga por imagem térmica | ✗ | ✓ |
| Proteção STUB | ✗ | ✓ |
| Proteção contra discordância de pólo | ✗ | ✓ |

Fonte: adaptado pelo autor (MEIRA, 2018).

3.3 SISTEMA TESTE

Para realização dos estudos de caso, selecionou-se como sistema-teste de 230 kV apresentado na Figura 14, o qual foi sugerido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) (2004) para realização de estudos de esquemas de proteção em LT. Ele consiste de: duas linhas paralelas (LT1 e LT2) de 150 km que interligam as barras 1 e 2; uma terceira linha (LT3) também de 150 km, que interliga as barras 2 e 3; e dois equivalentes de Thévenin (S1 e S2), os quais representam os SEP interligados às barras 1 e 3. Todos os dados são apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5 (LOPES, et al., 2014).

Figura 14 – SEP de 230 kV.



Fonte: LOPES, et al. (2014).

Para adequação, do modelo sugerido, das estruturas de torres de transmissão tipicamente utilizada no Sistema Interligado Brasileiro, foi utilizado os parâmetros elétricos apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5, para modelagem das LT e dos equivalentes de Thévenin (LOPES, et al., 2014).

Tabela 4 – Parâmetros das linhas modeladas.

| Sequência | Resistência (Ω/km) | Reatância (Ω/km) | Susceptância ($\mu\Omega/\text{km}$) |
|-----------|------------------------------------|----------------------------------|--|
| Zero | 0,24649 | 1,33133 | 1,8073 |
| Positiva | 0,0937011 | 0,677849 | 2,42979 |

Fonte: LOPES, et al. (2014).

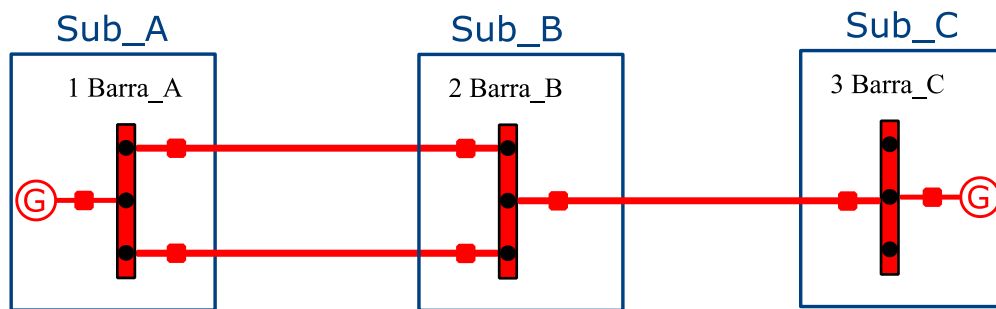
Tabela 5 – Parâmetros dos equivalentes utilizados.

| Dados | Equivalente | |
|-------------------------|--------------------|---------------|
| | S1 | S2 |
| Tensão (p.u.) | 1,00 | 0,95 |
| Impedância (Ω) | Sequência Zero | $6,1 + j16,7$ |
| | Sequência Positiva | $2,7 + j8,4$ |

Fonte: LOPES, et al. (2014).

O sistema-teste foi modelado no *software*, usando o módulo One-Line Diagram, conforme apresentado na Figura 15. O relé de distância foi instalado na TL3, usando os sinais provenientes dos TC e TP instalados na segunda barra (2 Barra_B), com relação de transformação 400 e 2000, respectivamente, como apresentado na Figura 14.

Figura 15 – Sistema teste modelado no *software*.



Fonte: autoria própria.

Após a modelagem do sistema teste no *software* foi calculado e definido os ajustes dos relés de distância, chamado de etapa de parametrização. Os ajustes do relé SEL 311C são calculados ou determinados da seguinte forma:

- CTR = 400;

Esse ajuste determina a relação dos TCs das fases (A, B, C). CTR: 1 a 6000. RTC usada = 2000/5 A (400:1).

- PTR = 2000;

Esse ajuste determina a relação dos TPs das fases (A, B, C). PTR: 1 a 10000. RTP usada = 230 kV/0,115 kV (2000:1).

- Z1MAG = 20,53;

Este ajuste corresponde ao valor da impedância de sequência positiva da LT e é usado na definição da proteção de distância, localizador de faltas e no cálculo automático de elementos direcionais Z2F e Z2R. Z1MAG: 0,10 a 255,00 Ω .

- Z1ANG = 82,13;

Este ajuste corresponde ao ângulo da impedância de sequência positiva da LT e é usado na definição da proteção de distância, localizador de faltas e no cálculo automático de elementos direcionais Z2F e Z2R. Z1ANG: 5,00° a 90,00°.

- Z0MAG = 40,61;

Este ajuste corresponde ao valor da impedância de sequência zero da LT e é usado na definição da proteção de distância, localizador de faltas e no cálculo automático de elementos direcionais Z0F e Z0R. Z0MAG: 0,10 a 255,00 Ω .

■ $Z0ANG = 79,51;$

Este ajuste corresponde ao ângulo da impedância de sequência zero da LT e é usado na definição da proteção de distância, localizador de faltas e no cálculo automático de elementos direcionais Z0F e Z0R. Z0ANG: 5,00° a 90,00°.

■ $LL = 150;$

Este ajuste corresponde ao comprimento da LT (sem unidade) e é usado no localizador de faltas bifásicas: 0,10 a 999,00. Comprimento da LT de 230 kV protegida: 150,00 km.

■ $E21P = 3;$

Este ajuste define o número de zonas de distância mho de fase que serão habilitadas no relé para operação. E21MP: N, 1 a 4.

■ $Z1P = 16,42; Z2P = 24,63; Z3P = 36,95;$

Este ajuste define o alcance do elemento de distância mho de fase de zona.

Alcance de zona: O alcance do elemento de distância mho de fase de zona 1, 2 e 3 será ajustado em 80%, 120% e 180%, respectivamente, da impedância de sequência positiva da LT protegida.

■ $50PP1 = 1; 50PP2 = 0,5; 50PP2 = 0,5;$

Este ajuste define a grandeza de operação do elemento de supervisão de sobrecorrente fase-fase para a zona.

■ $E21MG = N;$

Este ajuste define o número de zonas de distância mho de terra que serão habilitadas no relé para operação. E21MG: N, 1 a 4.

■ $E21XG = 3;$

Este ajuste define o número de zonas de distância quadrilateral de terra que serão habilitadas no relé para operação. E21XG: N, 1 a 4.

■ $XG1 = 16,42; XG2 = 24,64; XG2 = 36,95;$

Este ajuste define a reatância do elemento de distância quadrilateral de terra da zona. Ajuste da reatância de zona do elemento de distância quadrilateral de terra de zona 1, 2 e 3 será 80%, 120% e 180%, respectivamente, da impedância de sequência positiva da LT protegida.

■ $RG1 = 20; RG2 = 28; RG3 = 40;$

Este ajuste define a resistência do elemento de distância quadrilateral de terra de zona. Comumente utiliza-se RGn um pouco maior que XGn.

■ $XGPOL = I2;$

Este ajuste define se a polarização da unidade de distância quadrilateral de terra será feita a partir da corrente de terra (IG) ou da corrente de sequência negativa (I2). Notar que IG é a

corrente de polarização calculada pelo residual das correntes de fase. XGPOL: I2, IG. Como os ajustes avançados (EADVS = Y), essa função está habilitada.

- $K0M1 = 0,327;$

Este ajuste define a magnitude do fator de compensação da impedância de sequência zero para a zona 1. K0M1: 0,000 a 6000,000.

- $K0A1 = -5,29;$

Este ajuste define o ângulo do fator de compensação da impedância de sequência zero para a zona 1. K0A1: -180° a $+180,0^\circ$.

- $K0M = 0,327;$

Este ajuste define a magnitude do fator de compensação da impedância de sequência zero para as zonas 2, 3 e 4. K0M: 0,000 a 6000,000.

- $K0A = -5,29;$

Este ajuste define o ângulo do fator de compensação da impedância de sequência zero para as zonas 2, 3 e 4. K0A: -180° a $+180,0^\circ$.

- $Z1PD = 0; Z2PD = 24.; Z3PD = 60;$

Este ajuste define o tempo de retardo independente de distância de fase da zona.

- $Z1GD = 0; Z2GD = 24; Z3GD = 60;$

Este ajuste define o tempo de retardo independente de distância quadrilateral e mho de terra da zona.

- $Z1D = 0; Z2D = 24; Z3D = 60;$

Este ajuste define o tempo de retardo comum de distância da zona 1. Z1D: 0,000 a 16000,000 ciclos ou OFF.

- $ZLF = 64; ZLR = ZLF = 64;$

Este ajuste define a impedância de carga no sentido direto ZLF e sentido reverso ZLR.

- $DIR3 = R;$

Este ajuste define se a direcionalidade dos elementos de zona/nível 3 será no sentido direto (*Forward* – F) ou reverso (*Reverse* – R).

Da mesma forma também foi parametrizado o REL 670. E seus ajustes são calculados ou determinados da seguinte forma:

- $ZMH1: Operation = on; ZMH2: Operation = on; ZMH3: Operation = on;$

Operação da zona: ligada (*on*) /desligada (*off*).

- $ZMH1: DirMode = forward; ZMH2: DirMode = forward; ZMH3: DirMode = reverse;$

Modo de direção da zona: desligado (*off*), reverso (*reverse*), frente (*forward*) e compensado (*offset*).

- ZMHn: LoadEnchMode = *off*.

Modo de invasão de carga: ligado (*on*) /desligado (*off*).

- ZMH1: ZPE = 82,10; ZMH2: ZPE = 142,68; ZMH3: ZPE = 184,77;

Impedância da LT para *loops* fase-terra de sequência-positiva da zona.

- ZMH1: ZAngPE= 82; ZMH2: ZAngPE= 82; ZMH3: ZAngPE= 82;

Ângulo de impedância da LT para *loops* fase-terra de sequência-positiva da zona.

- ZMH1: KN = 0,33; ZMH2: KN = 0,33; ZMH3: KN = 0,33;

Magnitude do fator de compensação de retorno à terra para a zona.

- ZMH1: KNAng = -5; ZMH2: KNAng = -5; ZMH3: KNAng = -5;

Ângulo para o fator de compensação de retorno à terra KN da zona.

- ZMH1: ZRevPE = 82,10; ZMH2: ZRevPE = 142,68; ZMH3: ZRevPE = 184,77;

Magnitude do alcance reverso dos *loops* fase-terra da zona.

- ZMH1: tPE = 0; ZMH2: tPE = 0,4; ZMH3: tPE = 1;

Tempo de atraso fase-terra para da zona.

- ZMH1: IMinOpPE = 20; ZMH2: IMinOpPE = 20; ZMH3: IMinOpPE = 20;

Corrente mínima fase-terra de operação da zona (% da corrente base).

- ZMH1: ZPP = ON; ZMH2: ZPP = ON; ZMH3: ZPP = ON;

Ativar o alcance de ajuste de impedância da zona para elementos fase-fase.

- ZMH1: ZAngPP = 82; ZMH2: ZAngPP = 82; ZMH3: ZAngPP = 82;

Ângulo de impedância da LT para *loops* fase-fase de sequência-positiva da zona.

- ZMH1: ZRevPP = 82,10; ZMH2: ZRevPP = 142,68; ZMH3: ZRevPP = 184,77;

Magnitude do alcance reverso dos *loops* fase-fase da zona.

- ZMH1: tPP= 0; ZMH2: tPP= 0,4; ZMH3: tPP= 1;

Tempo de atraso fase-fase para da zona.

- ZMH1: IminOpPP = 20; ZMH2: IminOpPP = 20; ZMH3: IminOpPP = 20;

Corrente mínima fase-fase de operação da zona (% da corrente base).

- ZMHn: OffsetMhoDir = Non-dir;

Modo de direção de compensação da zona n: não- direcional (*non-dir*), reverso (*reverse*) e frente (*forward*)

- ZMHn: OpM0dePE = *off*;

Modo de operação (Off / On) do temporizador da zona n, fase-terra.

- ZMHn: OpM0dePP = ON;

Modo de operação (*Off / On*) do temporizador da zona n, fase-fase.

- ZMMn: Operation = ON

Operação liga (*on*) / desliga (*off*) da zona n.

- ZMM1: OperationDir = *forward*; ZMM2: OperationDir = *forward*; ZMM3: OperationDir = *reverse*;

Modo de operação de direcionalidade da zona.

- ZMM1: X1 = 81,34; ZMM2: X1 = 141,33; ZMM3: X1 = 183,02;

Alcance de reatância de sequência positiva da zona.

- ZMM1: R1 = 11,24; ZMM2: R1 = 19,54; ZMM3: R1 = 25,3;

Resistência de sequência positiva para o ângulo característico da zona.

- ZMM1: X0 = 159,74; ZMM2: X0 = 277,54; ZMM3: X0 = 359,41;

Alcance de reatância de sequência zero da zona.

- ZMM1: R0 = 29,56; ZMM2: R0 = 51,36; ZMM3: R0 = 66,51;

Resistência de sequência zero para ângulo característico da zona.

- ZMM1: RFPE = 100; ZMM2: RFPE = 160; ZMM3: RFPE = 180;

Alcance de resistência de falha da zona, ohms / *loop* fase-terra.

- ZMM1: tPE = 0; ZMM2: tPE = 0,4; ZMM3: tPE = 1;

Tempo de atraso da zona, fase-terra.

- ZMMn: IMinOpPE = 20;

Corrente de fase mínima de operação para *loops* fase-terra.

- ZMMn: IMinOpIN = 10;

Mínima corrente residual para *loops* fase-terra.

- ZDM1: ArgNegRes = 175;

Ângulo de blindagem no segundo quadrante para frente, todas as zonas.

- ZDM1: ArgDir = 5;

Ângulo de blindagem do quarto quadrante para frente, todas as zonas.

- ZDA1: PolMode = -3U0;

Quantidade de polarização para função direcional de fase-terra, todas zonas. -3U0, -U2, IPol, Dual, -3U0Comp, -U2comp.

- ZDA1: AngleRCA = 73;

Ângulo característico do relé (MTA), todas as zonas.

- ZDA1: I > 20;

Corrente mínima de operação como porcentagem da corrente nominal.

- ZDA1-: UPol > 5;

Tensão mínima de operação como porcentagem da tensão nominal.

- ZDA1: IPol > 10;

Corrente de polarização mínima como porcentagem da corrente nominal.

- ZDA1: AngleOp = 160;

Ângulo do setor de operação.

- ZDA1: KMag = 102,6;

Fator de aumento nos modos de polarização U0Comp e I0Comp.

- PHS: RLdFw = 200;

Alcance resistivo para frente dentro da área de impedância de carga.

- PHS: RLdRv = 200;

Alcance resistivo reverso dentro da área de impedância de carga.

- PHS: ArgLd = 5;

Ângulo de carga que determina a área de impedância de carga.

- PHS: X1 = 203,53;

Alcance de reatância de sequência positiva.

- PHS: X0 = 399,66;

Alcance de reatância de sequência-zero.

- PHS: RFFwPP = 176;

Alcance de resistência a falhas, fase-fase, para a frente.

- PHS: RFRvPP = 216;

Alcance de resistência a falhas, fase-fase, reverso.

- PHS: RFFwPE = 200;

Alcance de resistência a falhas, fase-terra, para a frente.

- PHS: RFRvPE = 225;

Alcance de resistência a falhas, fase-terra, reverso.

- PHS: IMinOpPP = 10;

Corrente delta mínima de operação para *loops* de fase-fase.

- PHS: IMinOpPE = 5;

Corrente de fase de operação mínima para *loops* de fase-terra.

Mediante a etapa de parametrização, constatou-se o seguinte:

- O relé SEL 311C utiliza padronizações baseadas em normas internacionais para a nomenclatura dos parâmetros, o qual facilita o entendimento para um profissional experiente da área, enquanto o relé REL 670 utiliza nomenclatura própria e faz a repetição de vários ajustes nos grupos, como por exemplo: tensão e corrente de fase são definidas várias vezes o que atrasa o processo de parametrização;
- O relé REL 670 possui pouco acervo bibliográfico, principalmente em português, o que exige do profissional o domínio em língua inglesa, enquanto o relé SEL 311C possui muitos artigos e memoriais de cálculo, fazendo com que o profissional tenha muitas opções para aprendizado da parametrização.

4 ESTUDO DE CASO

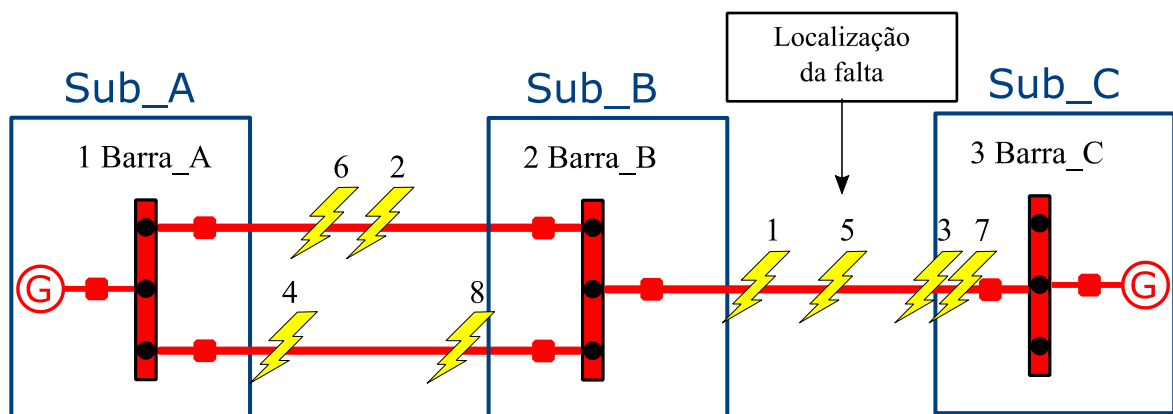
Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos estudos de casos realizados conforme cenários apresentados na Tabela 6. As simulações foram feitas nos *módulos Short Circuit e System Simulator* do *software*, considerando vários tipos de falta dentro e fora da LT principal protegida pelo relé. O modo de aplicação de cada cenário no *software* é ilustrado na Figura 16. A meta foi avaliar comparativamente, o desempenho dos relés SEL 311C e REL 670.

Tabela 6 – Estudos de casos.

| Caso | Tipo de falta | Linha de transmissão | Distância de falta em relação à Barra B | Resistência de falta |
|------|---------------|----------------------|---|----------------------|
| 1 | AT | LT3 | 37,5 km (25%) | $R_f = 0$ |
| 2 | BT | LT1 | 75 km (50%) | $R_f = 1 \Omega$ |
| 3 | AB | LT3 | 105 km (70%) | $R_f = 10 \Omega$ |
| 4 | BC | LT2 | 135 km (90%) | $R_f = 5 \Omega$ |
| 5 | BCT | LT3 | 75 km (50%) | $R_f = 1 \Omega$ |
| 6 | ACT | LT1 | 105 km (70,0%) | $R_f = 5 \Omega$ |
| 7 | ABCT | LT3 | 135 km (90%) | $R_f = 0$ |
| 8 | ABCT | LT2 | 37,5 km (25%) | $R_f = 10 \Omega$ |

Fonte: autoria própria.

Figura 16 – Ilustração das faltas dos estudos de caso.



Fonte: autoria própria.

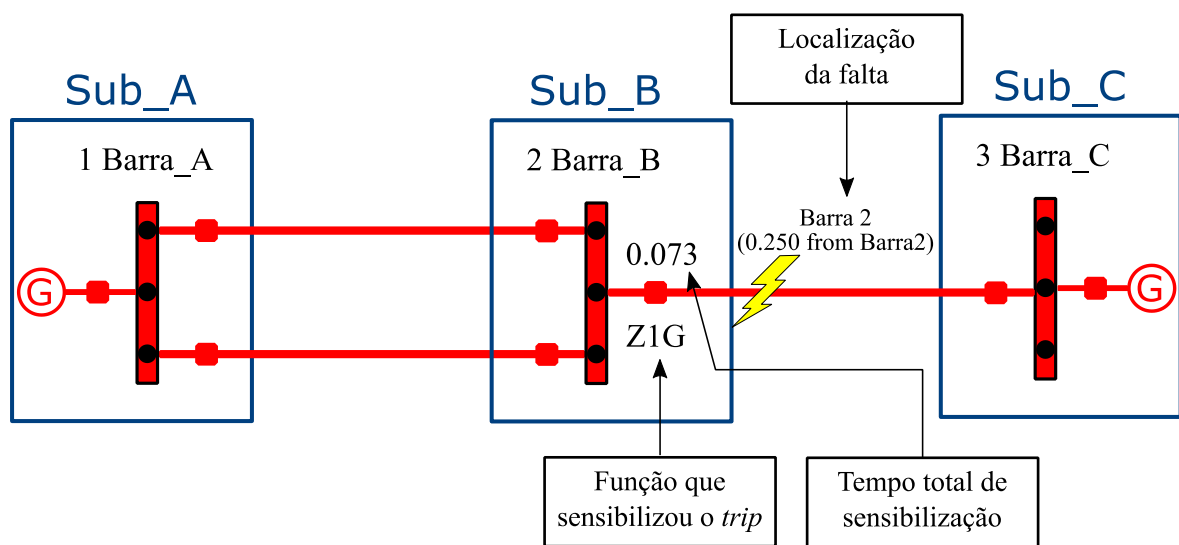
4.1 CASO 01

Nesse caso, aplicou-se uma falta monofásica na fase A, localizada à 37,5 km (25%) da barra 2 na terceira LT, sem resistência de falta. O mesmo caso foi realizado para os dois relés.

4.1.1 SEL 311C

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 17) e seu relatório é apresentado na Tabela 7.

Figura 17 – Caso 1 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

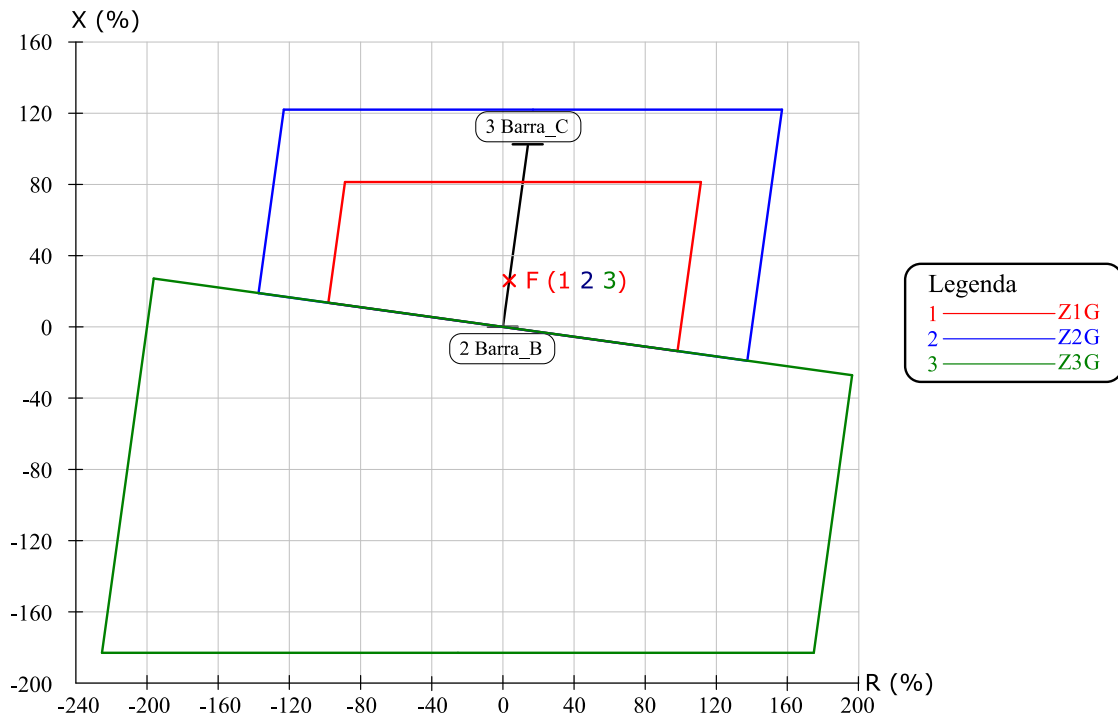
Tabela 7 – Caso 1 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 0,073 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|------|---|-----------|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_B | 10 BARRA2 | Z1G | 0,023 | 0,050 | 0,073 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | Atuação do disjuntor | | |
| 10 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,250 da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" em "Sub_B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 4,40 ciclos (0,073 segundos) e a corrente de falta de 396,94 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita foi também simulada no módulo *Short Circuit*, observada no módulo *Coordination Graphics*, (Figura 18) e seu relatório é apresentado na Tabela 8.

Figura 18 – Caso 1 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica quadrilateral.



Fonte: autoria própria.

Tabela 8 – Caso 1(SEL 311C): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

| Falta: F | | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | |
| Barramento na linha da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" em 0,250 | | | | |
| Novo barramento: "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | |
| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
| 1 | 25,66 | 82,13 | 1,00 | A-G relay comparator |
| 2 | 25,66 | 82,13 | 25,00 | A-G relay comparator |
| 3 | 25,66 | 82,13 | - | A-G relay comparator |

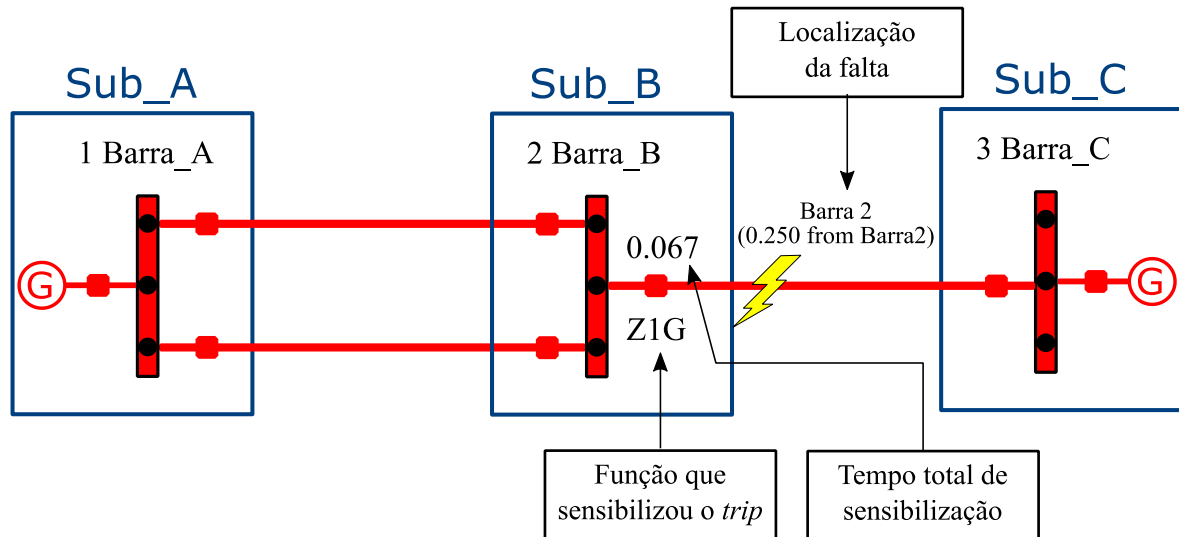
Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 1ª zona de terra (Z1G), com tempo total de atuação de 0,073 s, sendo 0,023 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente nos dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

4.1.2 REL 670

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 19) e seu relatório é apresentado na Tabela 9.

Figura 19 – Caso 1 (REL 670): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

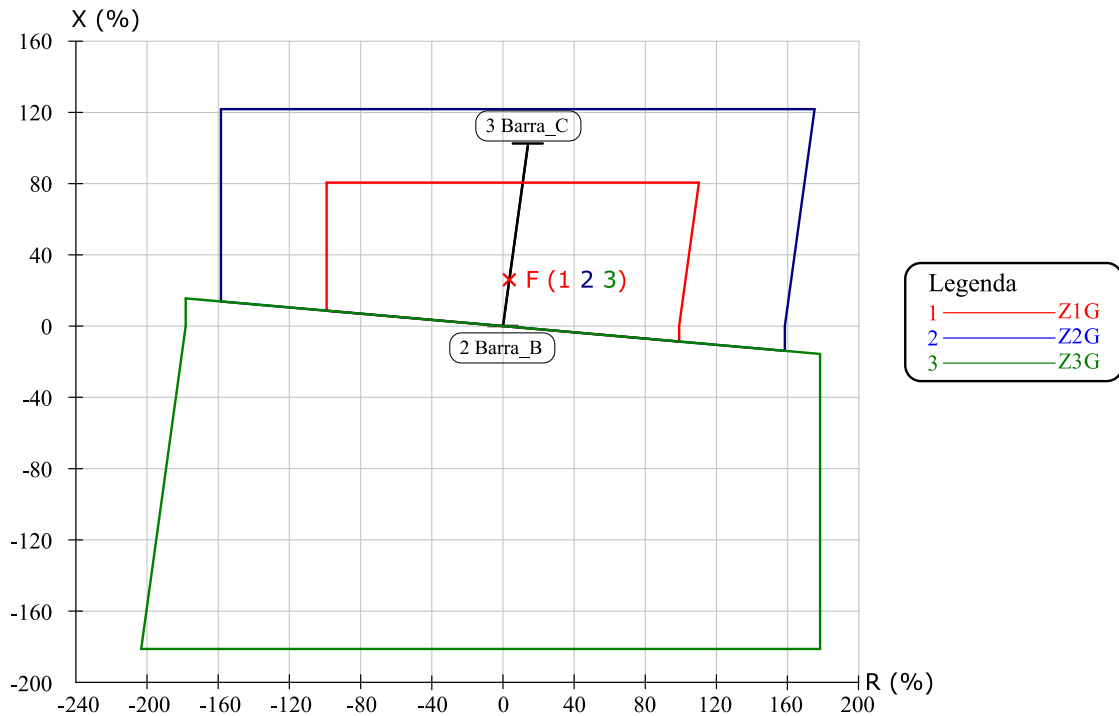
Tabela 9 – Caso 1 (REL 670): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 0,067 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|------|---|-----------|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_2 | 8 BARRA2 | Z1G | 0,017 | 0,050 | 0,067 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | Atuação do disjuntor | | |
| 8 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,250 da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" em "Sub_B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 4,00 ciclos (0,067 segundos) e a corrente de falta de 396,94 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita foi também simulada no módulo *Short Circuit*, observada no módulo *Coordination Graphics* (Figura 20) e seu relatório é apresentado na Tabela 10.

Figura 20 – Caso 1 (REL 670): Diagrama R-X da característica quadrilateral.



Fonte: autoria própria.

Tabela 10 – Caso 1 (REL 670): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

Falta: F
 Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1)
 Barramento na linha da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" em 0,250
 Novo barramento: "999001 Barra_B" (NEWBUS1)

| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
|-------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 25,66 | 82,13 | 1,00 | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |
| 2 | 25,66 | 82,13 | 25,00 | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |
| 3 | 25,66 | 82,13 | - | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |

Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 1ª zona de terra (Z1G), com tempo total de atuação de 0,067 s, sendo 0,017 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente nos dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

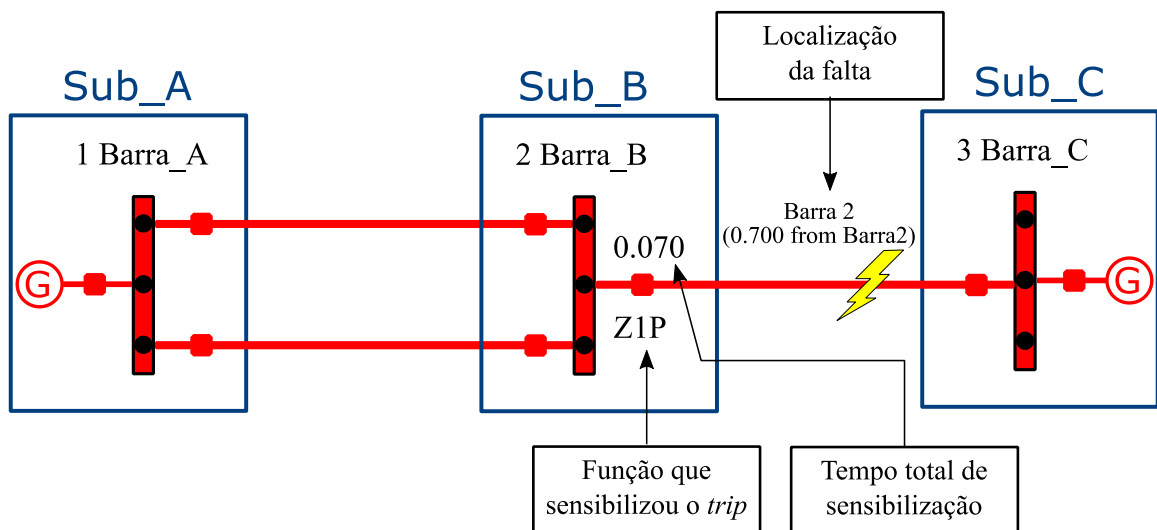
4.2 CASO 03

Nesse caso, aplicou-se uma falta bifásica entre as fases A e B, sem envolver a terra, localizada à 105 km (70 %) da barra 2 na terceira LT, com resistência de falta de 10 (dez) ohms. O mesmo caso foi realizado para os relés dos dois fabricantes. Sobre a atuação da proteção, destaca-se que para este caso, o relé deve sensibilizado para uma falta à jusante e assim, deverá ser detectada pela 1ª zona. Por possuir uma impedância de falta de característica resistiva, o ponto de localização da falta no diagrama R-X será localizado à jusante da LT.

4.2.1 SEL 311C

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 21) e seu relatório é apresentado na Tabela 11.

Figura 21 – Caso 3 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

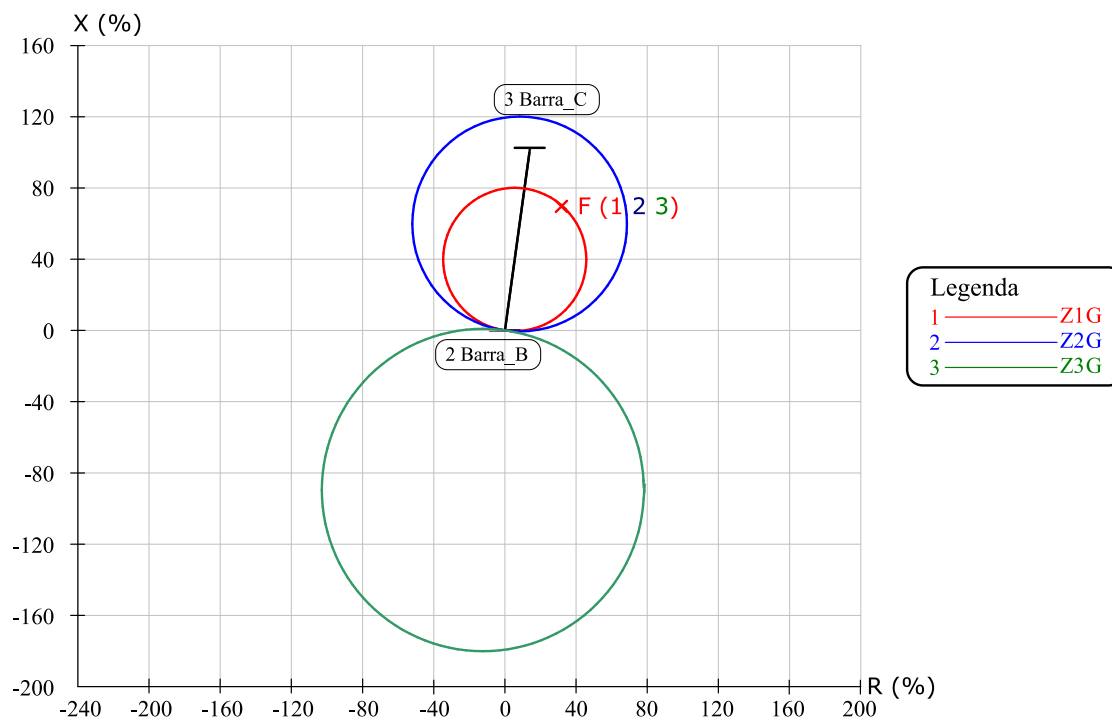
Tabela 11 – Caso 3 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 0,070 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|------|-------|---|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_B | 10 BARRA2 | Z1P | 0,020 | 0,050 | 0,070 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | | Atuação do disjuntor | |
| 10 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,700 da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra B" para "3 Barra C" em "Sub B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 4,20 ciclos (0,070 segundos) e a corrente de falta de 1725,27 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita foi também simulada no módulo *Short Circuit*, observado no módulo *Coordination Graphics* (Figura 22) e seu relatório é apresentado na Tabela 12.

Figura 22 – Caso 3 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica mho.



Fonte: autoria própria.

Tabela 12 – Caso 3 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

Falta: F
 Falta bifásica no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1)
 Barramento na linha da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" em 0,700
 Novo barramento: "999001 Barra_B" (NEWBUS1)

| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
|-------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1 | 78,37 | 65,51 | 1,00 | VPH/(IPH+ICOMP) A-G |
| 2 | 78,37 | 65,51 | 25,00 | VPH/(IPH+ICOMP) A-G |
| 3 | 78,37 | 65,51 | - | VPH/(IPH+ICOMP) A-G |

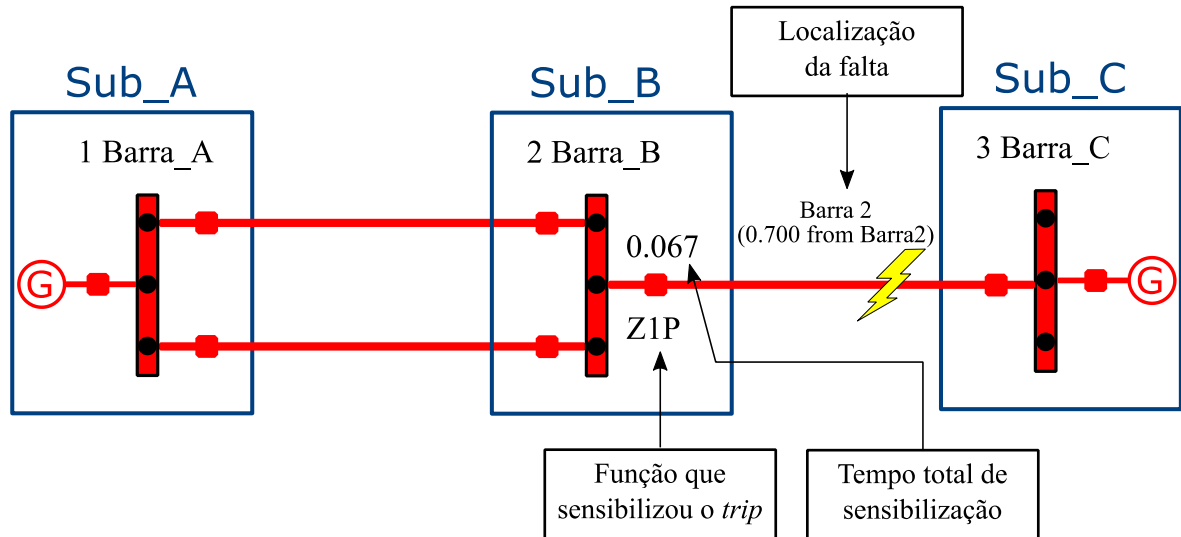
Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 1ª zona de fase (Z1P), com tempo total de atuação de 0,070 s, sendo 0,020 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. Mesmo ocorrendo no final da 1ª zona, o relé atuou corretamente. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente de dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

4.2.2 REL 670

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 23) e seu relatório é apresentado na Tabela 13.

Figura 23 – Caso 3 (REL 670): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

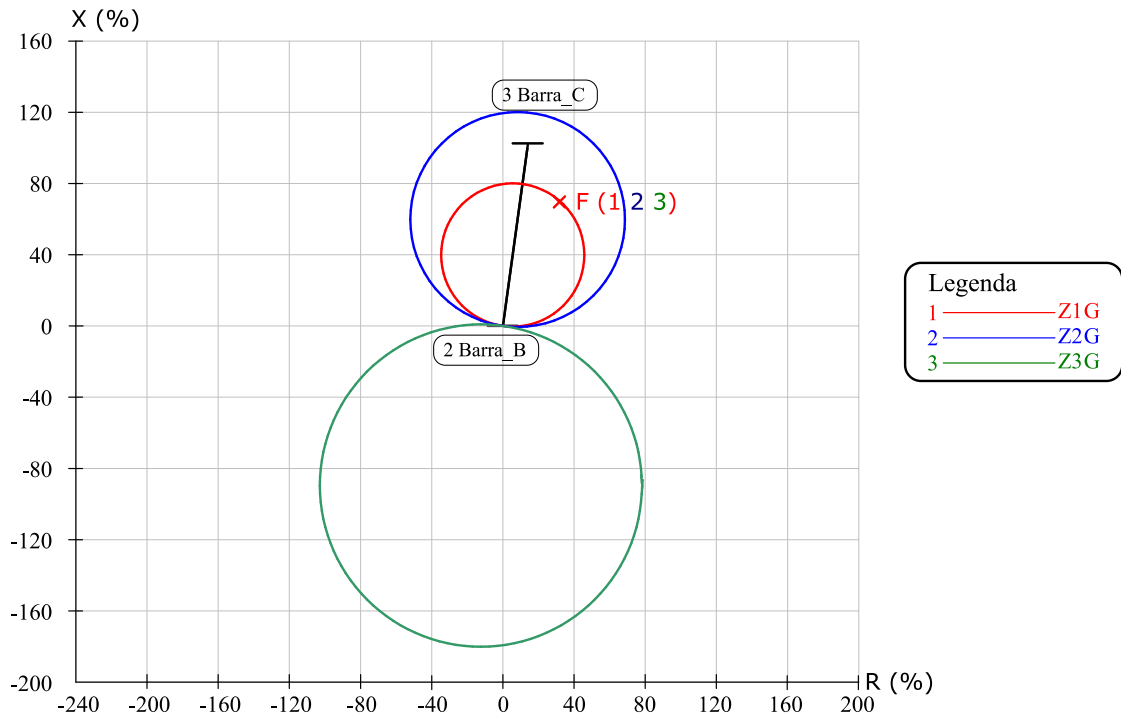
Tabela 13 – Caso 3 (REL 670): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 0,067 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|------|---|-----------|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_2 | 8 BARRA2 | Z1P | 0,017 | 0,050 | 0,067 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | Atuação do disjuntor | | |
| 8 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,700 da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" em "Sub_B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 4,00 ciclos (0,067 segundos) e a corrente de falta de 1725,27 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita foi também simulada no módulo *Short Circuit*, observada no módulo *Coordination Graphics* (Figura 24) e seu relatório é apresentado na Tabela 14.

Figura 24 – Caso 3 (REL 670): Diagrama R-X da característica mho.



Fonte: autoria própria.

Tabela 14 – Caso 3 (REL 670): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

Falta: F
 Falta bifásica no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1)
 Barramento na linha da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" em 0,700
 Novo barramento: "999001 Barra_B" (NEWBUS1)

| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
|-------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 78,40 | 65,52 | 1,00 | DELTA-V/DELTA-I A-B |
| 2 | 78,40 | 65,52 | 25,00 | DELTA-V/DELTA-I A-B |
| 3 | 78,40 | 65,52 | - | DELTA-V/DELTA-I A-B |

Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 1ª zona de fase (Z1P), com tempo total de atuação de 0,067 s, sendo 0,017 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. Mesmo ocorrendo no final da 1ª zona, o relé atuou corretamente. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente de dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

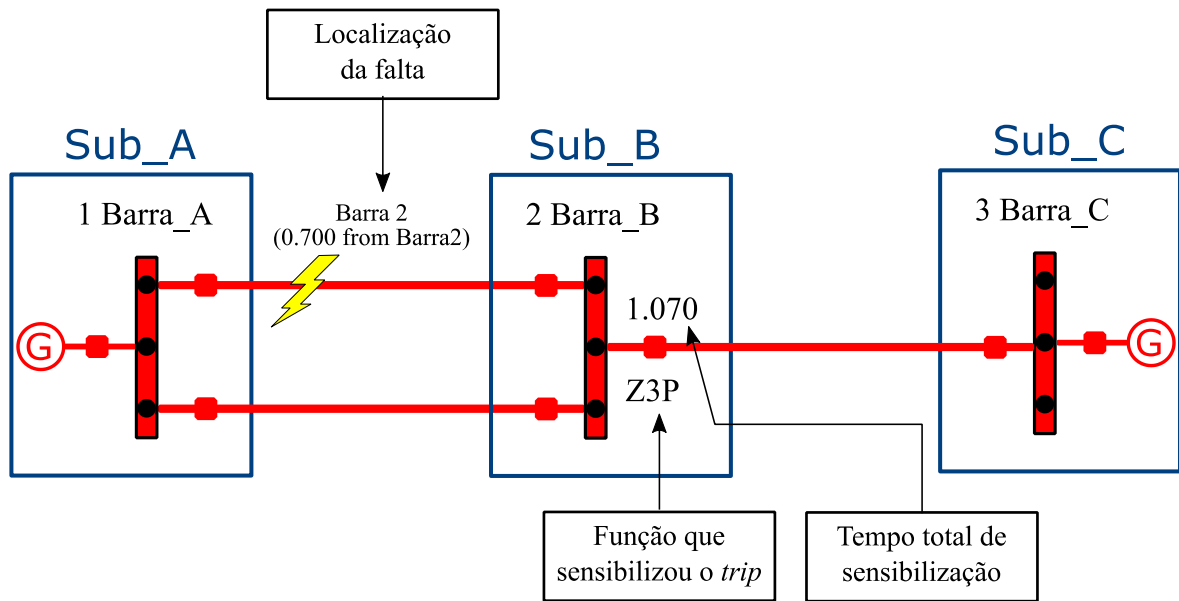
4.3 CASO 06

Nesse caso, aplicou-se uma falta monofásica-terra entre as fases A e C e a terra, localizada à 105 km (70 %) da barra 2 na primeira LT, com resistência de falta de 5 (cinco) ohms. O mesmo caso foi realizado para os dois relés. Destaca-se que para este caso o relé deve ser sensibilizado para uma falta reversa e assim, ser detectada pela 3ª zona.

4.3.1 SEL 311C

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 25) e seu relatório é apresentado na Tabela 15.

Figura 25 – Caso 6 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

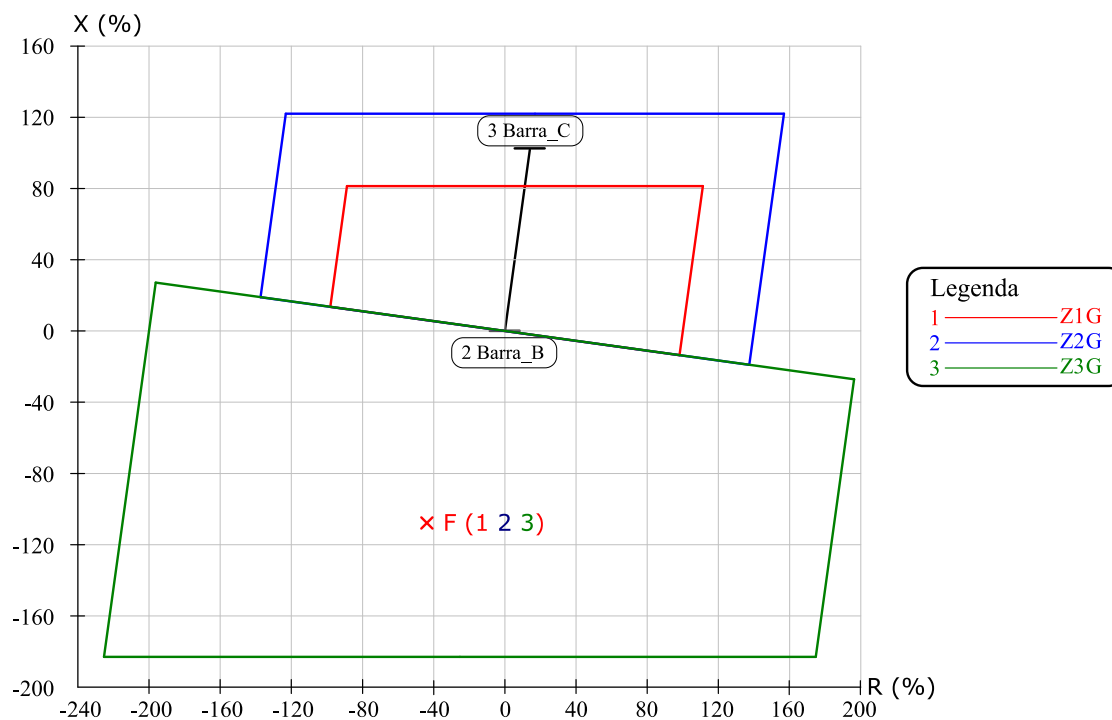
Tabela 15 – Caso 6 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 1,070 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|------|---|-----------|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_B | 10 BARRA2 | Z3P | 1,020 | 0,050 | 1,070 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | Atuação do disjuntor | | |
| 10 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,700 da "2 Barra_B" para a "1 Barra_A" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" em "Sub_B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 64,20 ciclos (1,070 segundos) e a corrente de falta de 1994,78 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 26) e seu relatório é apresentado na Tabela 16.

Figura 26 – Caso 6 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica quadrilateral.



Fonte: autoria própria.

Tabela 16 – Caso 6 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

Falta: F
 Falta bifásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1)
 Barramento na linha da "2 Barra_B" para a "1 Barra_A" em 0,700
 Novo barramento: "999001 Barra_B" (NEWBUS1)

| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
|-------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 115,22 | -112,01 | - | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |
| 2 | 115,22 | -112,01 | - | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |
| 3 | 115,22 | -112,01 | 61,00 | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |

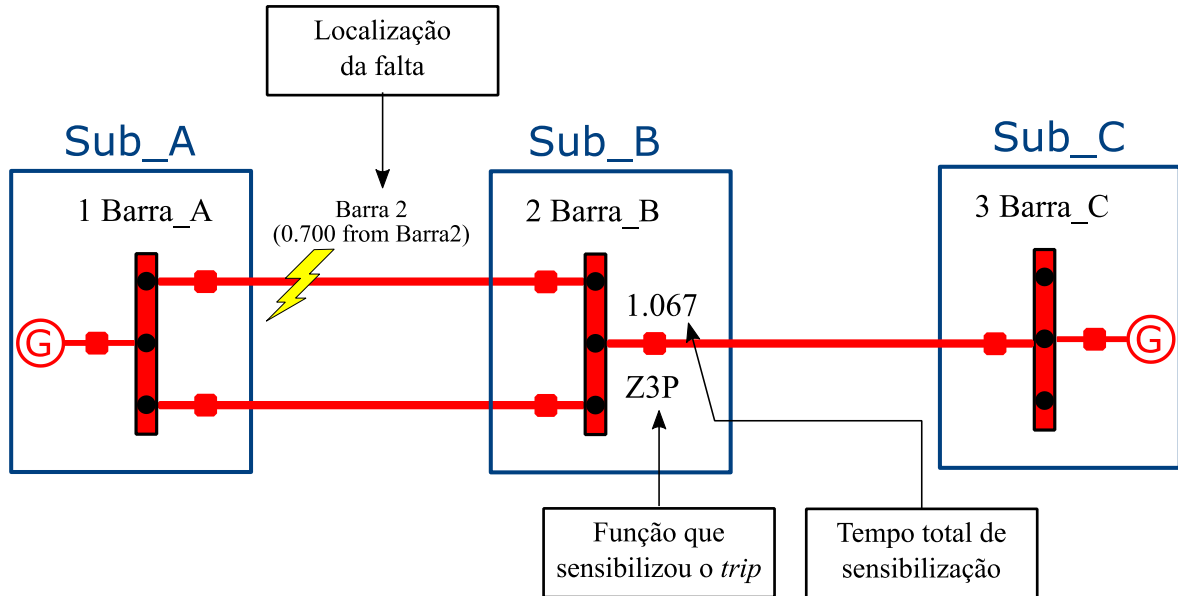
Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 3ª zona de fase (Z3P), com tempo total de atuação de 1,070 s, sendo 1,020 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. Mesmo ocorrendo no final da 1ª zona, o relé atuou corretamente. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente de dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

4.3.2 REL 670

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 27) e seu relatório é apresentado na Tabela 17.

Figura 27 – Caso 6 (REL 670): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

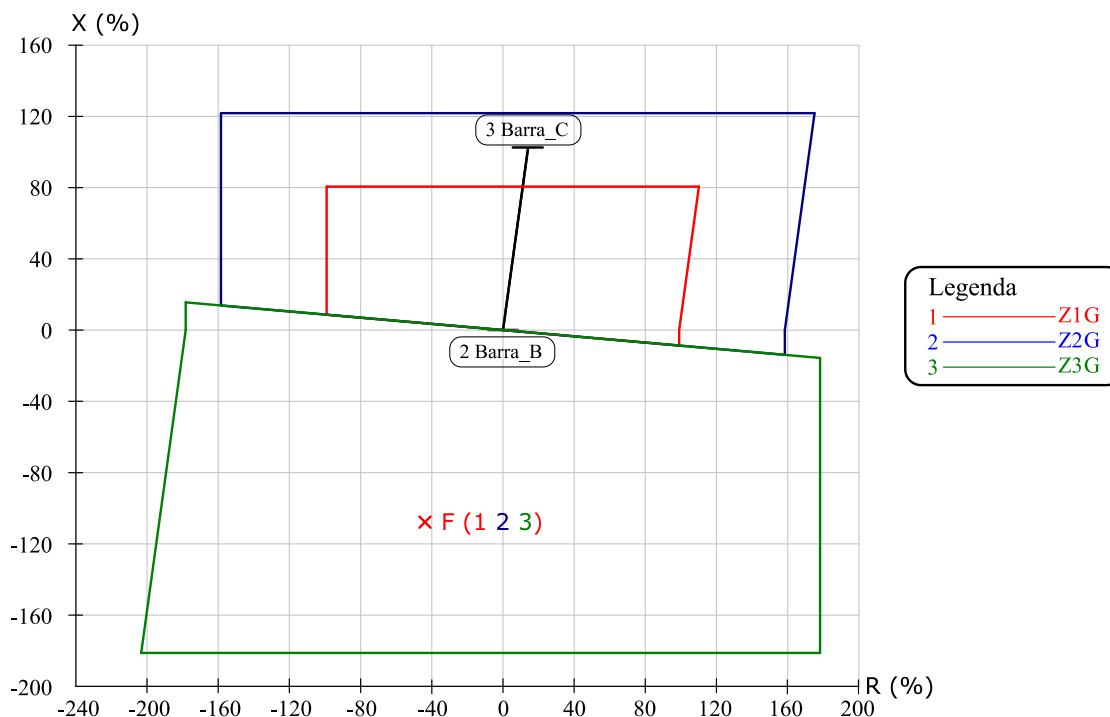
Tabela 17 – Caso 6 (REL 670): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 1,067 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|----------|---|-----------|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_2 | 8 BARRA2 | Z3P, Z3G | 1,017 | 0,050 | 1,067 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | Atuação do disjuntor | | |
| 8 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,700 da "2 Barra_B" para a "1 Barra_A" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" em "Sub_B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 64,00 ciclos (1,067 segundos) e a corrente de falta de 1653,37 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita foi também simulada no módulo *Short Circuit*, visualizada no módulo *Coordination Graphics* (Figura 28) e seu relatório é apresentado na Tabela 18.

Figura 28 – Caso 6 (REL 670): Diagrama R-X da característica quadrilateral.



Fonte: autoria própria.

Tabela 18 – Caso 6 (REL 670): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

Falta: F
 Falta bifásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1)
 Barramento na linha da "2 Barra_B" para a "1 Barra_A" em 0,700
 Novo barramento: "999001 Barra_B" (NEWBUS1)

| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
|-------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 115,19 | -111,84 | - | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |
| 2 | 115,19 | -111,84 | - | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |
| 3 | 115,19 | -111,84 | 61,00 | $VPH/(IPH+ICOMP)$ A-G |

Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 3ª zona de fase (Z3P), com tempo total de atuação de 1,067 s, sendo 1,017 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. Mesmo ocorrendo no final da 1ª zona, o relé atuou corretamente. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente de dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

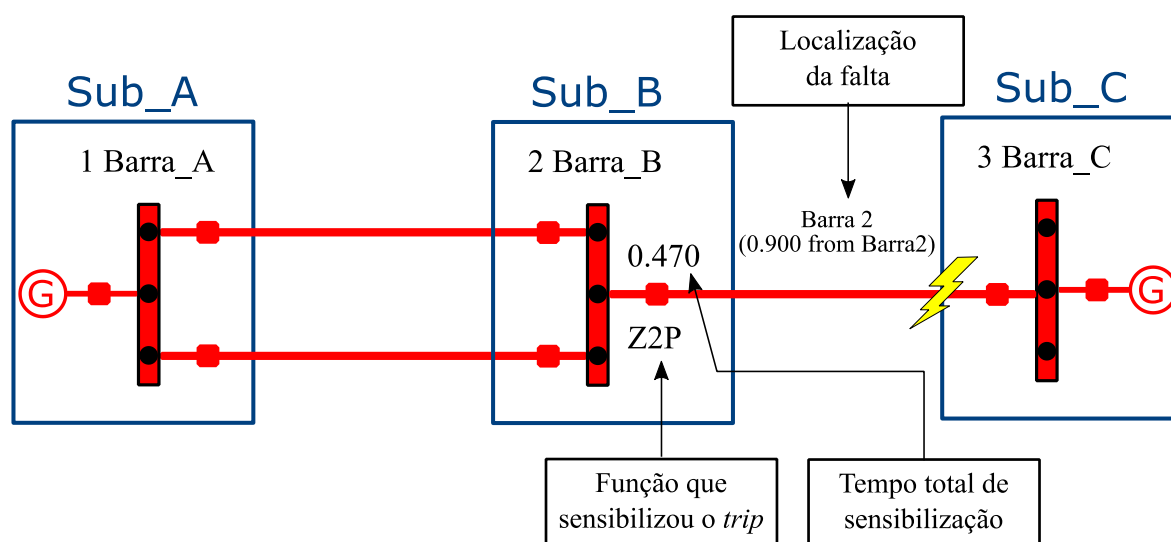
4.4 CASO 07

Nesse caso, aplicou-se uma falta trifásica, localizada à 135 km (90 %) da barra 2 na terceira LT, sem resistência de falta. O mesmo caso foi realizado para ambos os relés. Destaca-se que para esse caso o relé deve ser sensibilizado por uma falta reversa e assim deverá ser detectada pela 3ª zona. Por não possuir resistência de falta, a impedância aparente possuirá mesmo ângulo que a LT protegida e será localizada na LT no diagrama R-X

4.4.1 SEL 311C

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 29) e seu relatório é apresentado na Tabela 19.

Figura 29 – Caso 7 (SEL 311C): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

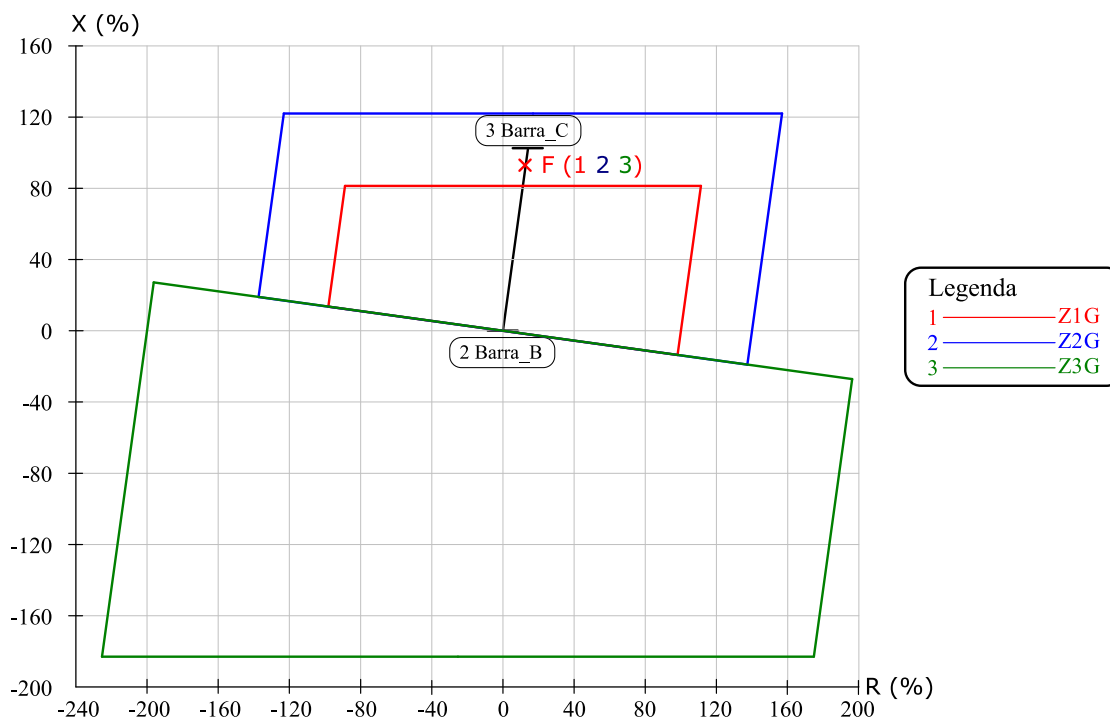
Tabela 19 – Caso 7 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 0,470 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|------|---|-----------|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_B | 10 BARRA2 | Z2P | 0,420 | 0,050 | 0,470 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | Atuação do disjuntor | | |
| 10 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,900 da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" em "Sub_B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 28,20 ciclos (0,470 segundos) e a corrente de falta de 7877,81 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita é também simulada no módulo *Short Circuit* e observado no módulo *Coordination Graphics* (Figura 30) e seu relatório é apresentado na Tabela 20.

Figura 30 – Caso 7 (SEL 311C): Diagrama R-X da característica quadrilateral.



Fonte: autoria própria.

Tabela 20 – Caso 7 (SEL 311C): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
|-------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 92,38 | 82,13 | - | $VPH/(IPH+ICOMP) B-G$ |
| 2 | 92,38 | 82,13 | 25,00 | $VPH/(IPH+ICOMP) B-G$ |
| 3 | 92,38 | 82,13 | - | $VPH/(IPH+ICOMP) B-G$ |

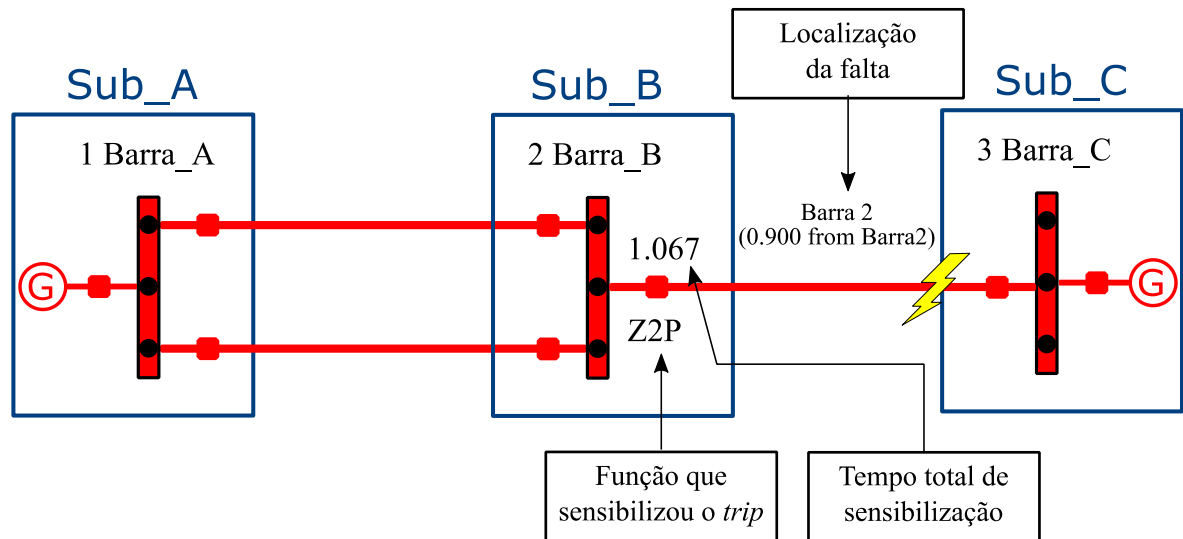
Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 2ª zona de fase (Z2P), com tempo total de atuação de 0,47 s, sendo 0,42 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. Mesmo ocorrendo no final da 1ª zona, o relé atuou corretamente. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente de dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

4.4.2 REL 670

A falta descrita foi simulada no módulo *System Simulator* (Figura 31) e seu relatório é apresentado na Tabela 21.

Figura 31 – Caso 7 (REL 670): Aplicação da falta no módulo *System Simulator*.



Fonte: autoria própria.

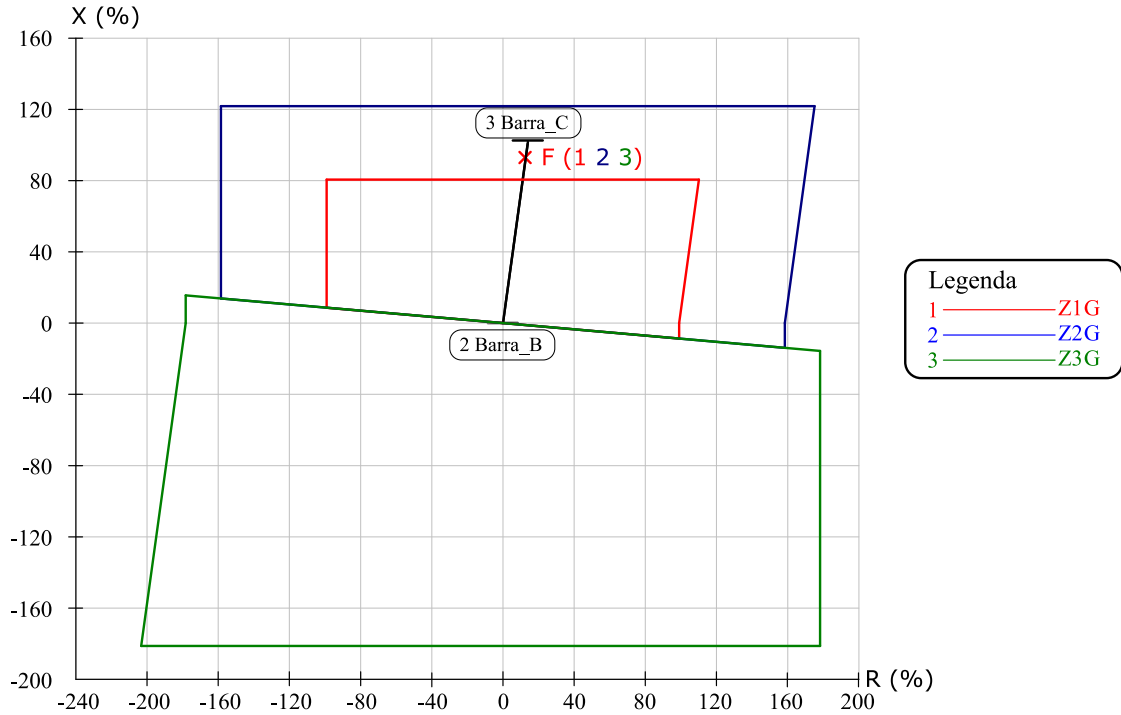
Tabela 21 – Caso 7 (REL 670): Relatório de falta do módulo *System Simulator*.

| LZOP – Tempo de operação previsto em 1,067 segundos do início da falta: | | | | | |
|--|---|------|---|-----------|-------|
| Subestação | LZOP | Trip | t21 | Disjuntor | Total |
| Sub_2 | 8 BARRA2 | Z2P | 1,017 | 0,050 | 1,067 |
| Alterações no disjuntor para todas LZOPS inseridas no sistema: | | | | | |
| LZOP | Tipo do disjuntor / localização | | Atuação do disjuntor | | |
| 8 MISC | Principal / Trecho da linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" | | Abertura dos 3 polos do disjuntor da BARRA2_3 | | |
| Alterações no sistema para a falta: | | | | | |
| Novo barramento criado "999001 Barra_B" (NEWBUS1) em 0,900 da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" | | | | | |
| Abertura do disjuntor na linha da "2 Barra_B" para "3 Barra_C" em "Sub_B" | | | | | |
| Falta monofásica para a terra no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1) | | | | | |
| Falta não é extinta após 64,00 ciclos (1,067 segundos) e a corrente de falta de 7877,81 A | | | | | |

Fonte: autoria própria.

A falta descrita foi também simulada no módulo *Short Circuit*, visualizada no módulo *Coordination Graphics* (Figura 32) e seu relatório é apresentado na Tabela 22.

Figura 32 – Caso 7 (REL 670): Diagrama R-X da característica quadrilateral.



Fonte: autoria própria.

Tabela 22 – Caso 7 (REL 670): Relatório de falta do módulo *Coordination Graphics*.

Falta: F
 Falta trifásica no barramento temporário "999001 Barra_B" (NEWBUS1)
 Barramento na linha da "2 Barra_B" para a "3 Barra_C" em 0,900
 Novo barramento: "999001 Barra_B" (NEWBUS1)

| Curva | Impedância aparente [magnitude] | Impedância aparente [grau] | Tempo de operação [ciclos] | Comparador que atuou |
|-------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 92,38 | 82,13 | - | VPH/(IPH+ICOMP) B-G |
| 2 | 92,38 | 82,13 | 25,00 | VPH/(IPH+ICOMP) B-G |
| 3 | 92,38 | 82,13 | - | VPH/(IPH+ICOMP) B-G |

Fonte: autoria própria.

Análise: a função sensibilizada pelo relé foi a de distância de 2ª zona de fase (Z2P), com tempo total de atuação de 1,067 s, sendo 1,017 s o tempo de sensibilização da zona e 0,050 s, o tempo de atuação do disjuntor. Mesmo ocorrendo no final da 1ª zona, o relé atuou corretamente. A falta não foi extinta devido ao fluxo de corrente de dois sentidos do sistema, sendo apenas um eliminado, conforme esperado.

4.5 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Para analisar comparativamente os dois modelos de relés, elaborou-se a Tabela 23, na qual estão enumerados os tempos de atuações de cada relé, para cada caso.

Tabela 23 – Tempo total de atuação dos relés.

| Caso | Especificações da falta | | | | Função sensibilizada | Tempo total de atuação | |
|------|-------------------------|-----|-------|-------------|----------------------|------------------------|---------|
| | Tipo | LT | Local | R_f | | SEL 311C | REL 670 |
| 1 | AT | LT3 | 25% | 0 | Z1G | 0,073 s | 0,067 s |
| 2 | BT | LT1 | 50% | 1 Ω | Z3G | 1,073 s | 1,067 s |
| 3 | AB | LT3 | 70% | 10 Ω | Z1P | 0,070 s | 0,067 s |
| 4 | BC | LT2 | 90% | 5 Ω | Z3P | 1,070 s | 1,067 s |
| 5 | BCT | LT3 | 50% | 1 Ω | Z1P | 0,070 s | 0,067 s |
| 6 | ACT | LT1 | 70% | 5 Ω | Z3P | 1,070 s | 1,067 s |
| 7 | ABC | LT3 | 90% | 0 | Z2P | 0,470 s | 1,067 s |
| 8 | ABC | LT2 | 25% | 10 Ω | Z3P | 1,070 s | 1,067 s |

Fonte: autoria própria.

Sobre os casos abordados, concluiu-se o seguinte:

- O relé REL 670 foi mais rápido que o relé SEL 311C em todos os casos avaliados, exceto no Caso 7. Explicação: algoritmo da função de distância mais eficiente. Entretanto, testes com os relés reais devem ser realizados para comprovar esse fato;
- Em todos os casos simulados, a falta não foi extinta. Explicação: o sistema de proteção requer a instalação de relés em todos os barramentos;
- O relé atuou devidamente para todos os casos;
- Em algumas faltas envolvendo a terra, a função de distância de fase atuou primeiro. Explicação: impedância de falta localizada dentro da área de proteção da fase. Caso contrário, a função sensibilizada seria a de distância de terra.

5 CONCLUSÃO

Este Trabalho abordou um tema relevante para o bom desempenho do sistema de proteção, que foi a etapa de parametrização de relés. O estudo foi realizado em um *software* comercial, largamente utilizado pelas empresas de energia elétrica e simulou os modelos dos relés disponíveis no LabPro do DEE/UFCG.

Durante o TCC, constatou-se que essa etapa é complexa e por não ser padronizada, requer muito tempo para realiza-la. Ao final, observou-se que:

- O relé SEL 311C usa para nomenclatura dos seus ajustes o padrão ANSI, o que torna a parametrização intuitiva e rápida para um engenheiro de proteção.
- O relé REL 670 divide os ajustes em grupos de parâmetros, repetindo-se alguns ajustes, como corrente e tensão de base do sistema usados em todos os grupos, tomando mais tempo para parametrizar.
- Os relés apresentaram tempo de atuação das funções de proteção muito próximos, sendo necessário testes em laboratório para avaliação minuciosa de cada um.
- Os relés estudados possuem configurações de *hardware* e funções de proteção semelhantes.

Constatou-se ainda, o grande potencial do *software* para estudos de proteção de sistemas elétricos de potência.

Destaca-se a relevância das disciplinas cursadas ao longo do curso, pois serviram de base teórica para o desenvolvimento desse trabalho, principalmente: sistemas elétricos, análise de sistemas elétricos, proteção de sistemas elétricos e técnicas de medição.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de testes em laboratório com os relés físicos e com o *Real-Time Digital Simulator*.

REFERÊNCIAS

- ABB. *Line distance protection REL670 2.1 IEC - Application manual*. 2016.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, Series on Power Engineering. 1999.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº. 729**, 28 de junho de 2016. . Brasília, DF, 28 jun. 2016.
- CAPE. *Installation instructions and getting started exercises*. ELECTROCON international incorporated. 2018.
- COSTA, A. B. **Modelagem de um relé de distância em um simulador digital em tempo real**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2016.
- COSTA, C. A., BRITO, N. S., & SOUZA, B. A. *A Methodology for Distance Relay Modeling*. *IEEEIEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 16, NO. 5, MAY 2018.
- COUTINHO, P. R. **Avaliação de algoritmos para a proteção de distância de linhas de transmissão via simulações tempo real**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2012.
- GUERRA, F. C. **Distúrbios de corrente em redes elétricas**. Notas de aula – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2016.
- IEEE Power System Relaying Committee. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. 2004.
- LOPES, F., Jr., S., F., SANTOS, W., NASCIMENTO, J., COSTA, C., FERNANDES Jr., D. **Uma metodologia baseada nos programas ATP e CAPE para estudo e validação de funções de proteção**. Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte. 2014.
- MEIRA, R. N. **Análise da coordenação da proteção de distância em linhas de transmissão de circuito duplo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2016.
- MEIRA, R. N. **Análise da interoperabilidade de relés via teleproteção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2018.
- NASCIMENTO, J. P. **Um sistema de proteção de sobrecorrente adaptativa a sistemas de distribuição de energia elétrica**. Exame de qualificação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2018
- ONS, P. D. **Submódulo 2.6. Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**. 2011.

PEREIRA, R. L. **Análise dos Esquemas de Teleproteção em Linhas de Transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2018.

SÁ, J. A., COSTA, F. B., OLIVEIRA, N. L., BRITO, N. S., SOUZA, B. A., GURJÃO, E. C., & CARMO, U. A. **Uso de simulador em tempo real no ensino de proteção de sistemas elétricos**. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Fortaleza. 2010.

SELINC. **Memória de cálculo para ajustes de relés de proteção SEL-311C**. *SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES*. 2015.