



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - CAMPUS SOBRAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO (PPGEEC)**

ANDERSON TADEU SOARES DE PAIVA

**LABORATÓRIO VIRTUAL DE PROTEÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO DA REDE
BÁSICA.**

**SOBRAL
2015**

ANDERSON TADEU SOARES DE PAIVA

LABORATÓRIO VIRTUAL DE PROTEÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO DA REDE
BÁSICA.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elmano de Alencar e Silva.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso.

SOBRAL
2015

ANDERSON TADEU SOARES DE PAIVA

LABORATÓRIO VIRTUAL DE PROTEÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO DA REDE
BÁSICA.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Aprovada em: 19 / 06 / 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Elmano de Alencar e Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Ruth Pastora Saraiva Leão
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha esposa Carla Roberta.

Aos meus filhos Elis e Daniel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de viver este momento cercado pelas pessoas que amo;

Agradeço à minha esposa Carla Roberta, por me mostrar através de seu amor e companheirismo que juntos somos capazes de realizar grandes coisas;

À minha filha Elis e ao meu filho Daniel, por renovarem minhas energias com seus sorrisos, beijos e abraços;

Aos meus pais, Francisco e Francisca, pelo amor e carinho, e por demonstrarem, em todos os momentos, seu orgulho;

Às minhas irmãs, Mariana, Carla, Bruna e Maria Eduarda, pelo carinho e respeito que me impulsionam a ser um humano melhor;

A todos os alunos, professores e funcionários da faculdade, que ao longo destes anos de convivência tornaram-se grandes e queridos amigos;

Ao meu orientador, Professor Dr. Carlos Elmano de Alencar e Silva, pela compreensão e respeito às minhas limitações, bem como pelo apoio e incentivo que me levou a superá-las. Agradeço pela forma sempre clara e objetiva de trabalhar que foram fundamentais para o bom andamento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Giovanni Cordeiro Barroso, pela disponibilidade e pela forma generosa de compartilhar seus conhecimentos e experiências;

Ao professor Raimundo Furtado Sampaio, cujo vasto conhecimento e experiência, profissional e acadêmica, só são menores que a sua humildade, respeito e dedicação aos seus alunos. Agradeço pelos ensinamentos e pela dedicação dispensada no auxílio à concretização deste trabalho;

Aos professores do Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral pela paciência, dedicação, ensinamentos e especialmente pelo respeito e compreensão nas diversas situações que passamos juntos durante o curso;

Agradeço aos meus amigos e familiares pelo carinho e compreensão nos momentos onde a dedicação aos estudos privou-nos do convívio, o meu sincero obrigado.

"As pessoas raramente reconhecem a oportunidade porque ela surge disfarçada em trabalho árduo."

H. L. Mencken

RESUMO

A análise e aplicação de Proteções do Sistema Elétrico de Potência não é tarefa simples e requer muito estudo e dedicação do profissional que pretenda lidar com o assunto. Assim sendo, empresas e profissionais da área reconhecem a importância de uma atualização técnica continuada para que possam acompanhar os avanços tecnológicos e o aumento da complexidade dos esquemas de proteções. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de simulação das proteções de uma subestação de Transmissão da Rede Básica do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Com a finalidade de complementar o **Simulador para Treinamento Presencial e a Distância em Operação e Proteção de Sistemas Elétricos (STOP)** desenvolvido por Silva (Silva,2011), a ferramenta desenvolvida neste trabalho simula uma subestação de Transmissão da Rede Básica do SEP (500-230 kV) permitindo que o usuário configure elementos da subestação como, por exemplo, as Linhas de Transmissão e suas proteções, simule faltas e observe a atuação das proteções. Desenvolvido em JAVA e integrado ao STOP com a denominação de Módulo II, o simulador apresentado neste trabalho utiliza a integração do STOP com o Moodle para oferecer a opção de ser utilizado também no Ensino a Distância (EaD).

Palavras-chave: Simulador de Proteção, Rede Básica, Proteção de Sistemas Elétricos, Proteção de Distância.

ABSTRACT

The analyze and application of Electrical Power System Protections is not a simple task and requires a lot of study and dedication from any professional who intends to deal with this field. Therefore, companies and professionals from this area recognize that continuous technical update is very important to be able to follow the technological progress and the increasingly complex protection schemes. This paper presents the development of a computational simulation tool of the protection system of a Power Transmission Substation. In order to complement the Simulator for Presence and Distance Learning about Operation and Protection of Electrical Systems (STOP), developed by Silva (SILVA, 2011), the simulator developed on this paper simulates a Transmission Substation of Basic Network, allowing the user set up some substation components such as Transmission Lines and its protections, simulate short-circuits and observe the protection performance. Developed in JAVA and integrated to STOP by name "Módulo II", the simulator presented on this paper uses the STOP integration along with Moodle platform to make e-learning available.

Keywords: Protection Simulator, Basic Network, Electrical Systems Protection, Distance Protection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 - DIAGRAMA UNIFILAR DO STPO. | 22 |
| FIGURA 2.2 - DIAGRAMA UNIFILAR DO STOP | 25 |
| FIGURA 2.3 - BLOCO STOP INTEGRADO AO MOODLE..... | 25 |
| FIGURA 2.4 - INTERFACE DA FERRAMENTA DE ACESSO REMOTO | 26 |
| FIGURA 2.5 - PAINEL DE SOLICITAÇÃO DE RECURSOS (ALUNO)..... | 26 |
| FIGURA 2.6 - DISTRIBUIÇÃO DOS COMPONENTES DA ARQUITETURA. | 28 |
| FIGURA 2.7 - SERVIDOR DE MENSAGENS DE CONTROLE. | 29 |
| FIGURA 3.1 - BARRA DUPLA COM DISJUNTOR E MEIO. | 30 |
| FIGURA 3.2- BARRA DUPLA COM DISJUNTOR A QUATRO CHAVES | 31 |
| FIGURA 3.3 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO TPC..... | 37 |
| FIGURA 3.4 - DIAGRAMA UNIFILAR DE IMPEDÂNCIAS DA SUBESTAÇÃO DO SIMULADOR. | 40 |
| FIGURA 3.5 - CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NO BARRAMENTO DE 500 kV. | 41 |
| FIGURA 3.6 - CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NO BARRAMENTO DE 230kV..... | 42 |
| FIGURA 3.7 - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA DO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 500 kV PARA TRANSFORMADOR CONECTADO EM ESTRELA ATERRADO NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO..... | 43 |
| FIGURA 3.8 - DIAGRAMA EQUIVALENTE DO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 500 kV PARA TRANSFORMADOR CONECTADO EM ESTRELA ATERRADO NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO..... | 44 |
| FIGURA 3.9 - CIRCUITO EQUIVALENTE THÉVENIN DO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 500 kV PARA TRANSFORMADOR CONECTADO EM ESTRELA ATERRADO NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO..... | 44 |
| FIGURA 3.10 - CIRCUITO DE SEQUÊNCIA PARA CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 500 kV PARA LIGAÇÃO Y-Y ATERRADO..... | 45 |
| FIGURA 3.11 - LIGAÇÕES DO TRANSFORMADOR SEM CONTRIBUIÇÃO DA COMPONENTE DE SEQUÊNCIA ZERO PARA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NA BARRA DE 500 kV..... | 45 |
| FIGURA 3.12 - CIRCUITO DE SEQUÊNCIA PARA CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 500 kV. | 46 |
| FIGURA 3.13 - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA DO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 230 kV PARA TRANSFORMADOR CONECTADO EM ESTRELA ATERRADO NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO..... | 47 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.14 - DIAGRAMA EQUIVALENTE DO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 230 kV PARA TRANSFORMADOR CONECTADO EM ESTRELA ATERRADO NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO..... | 47 |
| FIGURA 3.15 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE THÉVENIN DO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 230 kV PARA TRANSFORMADOR CONECTADO EM ESTRELA ATERRADO NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO..... | 48 |
| FIGURA 3.16 - CIRCUITO DE SEQUÊNCIA PARA CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 230 kV PARA LIGAÇÃO Y-Y ATERRADO..... | 48 |
| FIGURA 3.17 - CIRCUITO DE SEQUÊNCIA PARA CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA DE 230 kV..... | 49 |
| FIGURA 3.18 - LOCAIS DAS FALTAS NO SIMULADOR. | 50 |
| FIGURA 3.19 - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA PARA A FALTA F1. | 51 |
| FIGURA 3.20 - CIRCUITO EQUIVALENTE THÉVENIN PARA A FALTA F1..... | 51 |
| FIGURA 3.21 - REDE DE SEQUÊNCIA POSITIVA PARA FALTA TRIFÁSICA EM F1..... | 52 |
| FIGURA 3.22 - REDES DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA PARA UMA FALTA BIFÁSICA EM F1..... | 54 |
| FIGURA 3.23 - REDES DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO PARA UMA FALTA BIFÁSICA – TERRA EM F1. | 55 |
| FIGURA 3.24 - REDES DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO PARA UMA FALTA MONOFÁSICA – TERRA EM F1. | 56 |
| FIGURA 3.25 - CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO..... | 57 |
| FIGURA 3.26 - CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO..... | 57 |
| FIGURA 3.27 - CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO. | 58 |
| FIGURA 4.1 - DIAGRAMA DE CASOS DE USO PRELIMINAR | 66 |
| FIGURA 4.2 - EVOLUÇÃO DO DIAGRAMA DE CASOS DE USO..... | 67 |
| FIGURA 4.3 - NETBEANS SENDO UTILIZADO NO DESENVOLVIMENTO..... | 68 |
| FIGURA 4.4 – DETALHE DO DIAGRAMA DE CLASSES DO SISTEMA..... | 72 |
| FIGURA 4.5 – DETALHE DO DIAGRAMA DE SEQUÊNCIA: CONFIGURAÇÃO DOS PARAMENTROS DA LT. | 72 |
| FIGURA 4.6 - DIAGRAMA DE ATIVIDADE: CONFIGURAÇÃO DOS PARAMENTROS DE PROTEÇÃO DA LT. | 73 |
| FIGURA 4.7 - TELA INICIAL DO SISTEMA. | 74 |
| FIGURA 4.8 – PAINEL DE IMPEDÂNCIAS DA LT05L1. | 75 |
| FIGURA 4.9 - MANSAGEM DE ALERTA SOBRE O INTERTRAVAMENTO DA CHAVE..... | 76 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.10 - IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS QUE PERMITEM INTERAÇÃO COM O USUÁRIO. | 76 |
| FIGURA 4.11 - ACESSANDO PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO. | 77 |
| FIGURA 4.12 - TELA DE CONFIGURAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO LT05L1. | 77 |
| FIGURA 4.13 - ACESSANDO PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR. | 78 |
| FIGURA 4.14 - TELA DE CONFIGURAÇÃO DO TRANSFORMADOR 05T1..... | 79 |
| FIGURA 4.15 - ACESSANDO PARÂMETROS DO TRANSFORMADO DE CORRENTE (TC). | 79 |
| FIGURA 4.16 - TELA DE CONFIGURAÇÃO DO TC 95L1..... | 80 |
| FIGURA 4.17 - TELA DO DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTEÇÃO DA LT05L1. | 81 |
| FIGURA 4.18 - TELA DE AJUSTE DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA (21)..... | 82 |
| FIGURA 4.19 - TELA INFORMATIVA SOBRE A PROTEÇÃO 67N. | 82 |
| FIGURA 4.20 - LOCAIS DE ACESSO A TELA DO SIMULADOR | 83 |
| FIGURA 4.21 - TELA DO SIMULADOR DE FALTAS. | 84 |
| FIGURA 4.22 – DETALHE DO DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO NA TELA DE SIMULAÇÃO DE FALTAS..... | 84 |
| FIGURA 4.23 – DETALHE DA SELEÇÃO DO TIPO E DO LOCAL DA FALTA. | 85 |
| FIGURA 4.24 – DETALHE DA ÁREA DE ENTRADA MANUAL DA TELA DE SIMULAÇÃO DE FALTAS..... | 85 |
| FIGURA 4.25 – DETALHE DA SIMULAÇÃO DA FALTA NA LT05L1 SEM ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO..... | 86 |
| FIGURA 4.26 – DETALHE DO AJUSTE DAS ZONAS DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA..... | 87 |
| FIGURA 4.27 – DETALHE DO AJUSTE DO ESQUEMA DE FALHA DO DISJUNTOR. | 88 |
| FIGURA 4.28 – ATIVAÇÃO DA FALHA DO DISJUNTOR 15L1..... | 88 |
| FIGURA 4.29 – SIMULAÇÃO DE UMA FALTA MONOFÁSICA NA LT05L1 E ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE FALHA DO 15L1..... | 89 |
| FIGURA 4.30 – DETALHE DA TELA DE ALARMES E SINALIZAÇÕES PARA O AJUSTE E SIMULAÇÃO DE FALTA COM ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE FALHA DO DISJUNTOR..... | 89 |
| FIGURA 4.31 – ELIMINANDO A FALTA SIMULADA. | 90 |
| FIGURA 4.32 – SUBESTAÇÃO RECOMPOSTA COM O DISJUNTOR QUE FALHOU ISOLADO. | 90 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 2.1 - RECURSOS E FUNÇÕES DO STPO..... | 22 |
| TABELA 2.2 - PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE O STOP E O STPO..... | 24 |
| TABELA 3.1 - PERDAS PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. | 31 |
| TABELA 3.2 - RELAÇÕES DE TRANSFORMADOR DE CORRENTE..... | 34 |
| TABELA 3.3 - VALORES DE A E B..... | 60 |
| TABELA 4.1 - TABELA DE PACOTES DO SISTEMA..... | 68 |
| TABELA 4.2 - CLASSES DO SISTEMA E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS..... | 69 |
| TABELA 5.1 – PRINCIPAIS FUNCIONALIDADES DO MÓDULO I (DISTRIBUIÇÃO) E DO MÓDULO II (TRANSMISSÃO) DO STOP..... | 93 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 15 |
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 Considerações Iniciais | 15 |
| 1.2 Objetivos | 16 |
| 1.2.1 Objetivos Gerais..... | 16 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 16 |
| 1.3 Trabalhos Correlatos..... | 17 |
| 1.4 Estrutura do Trabalho..... | 20 |
| CAPÍTULO 2 | 21 |
| 2 ORIGEM E EVOLUÇÃO DA FERRAMENTA | 21 |
| 2.1 Considerações Iniciais | 21 |
| 2.2 Versão Inicial em Delphi..... | 21 |
| 2.3 Versão em Java | 23 |
| 2.4 Considerações Finais..... | 29 |
| CAPÍTULO 3 | 30 |
| 3 REQUISITOS DOS ELEMENTOS DA SUBESTAÇÃO E CRITÉRIOS PARA A ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO | 30 |
| 3.1 Considerações Iniciais | 30 |
| 3.2 Equipamentos e Configurações | 30 |
| 3.2.1 Arranjo de Barramento | 30 |
| 3.2.2 Transformadores de Potência | 31 |
| 3.2.3 Disjuntores | 32 |
| 3.2.4 Chaves Seccionadoras | 32 |
| 3.2.5 Transformadores de Potencial (TP) e Transformadores de Corrente (TC) | 32 |
| 3.3 Análise do Curto-circuito nas Barras da Subestação | 38 |
| 3.3.1 Cálculo da Impedância de Sequência da Linha de Transmissão de Circuito Simples | 38 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.3.2 | Cálculo dos Curtos-circuitos nas Barras da Subestação..... | 39 |
| 3.4 | Simulação de uma Falta na Linha de Transmissão..... | 49 |
| 3.4.1 | Proteção de Distância | 49 |
| 3.4.2 | Proteção de Sobrecorrente da Linha de Transmissão | 59 |
| 3.5 | Considerações Finais..... | 63 |
| CAPÍTULO 4..... | | 64 |
| 4 DESENVOLVIMENTO DO LABORATÓRIO VIRTUAL DE PROTEÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO DA REDE BÁSICA | | 64 |
| 4.1 | Considerações Iniciais | 64 |
| 4.2 | Análise dos Requisitos | 64 |
| 4.3 | Implementação do Código..... | 67 |
| 4.4 | Pacotes e Classes do Sistema..... | 68 |
| 4.5 | Interfaces da Ferramenta | 74 |
| 4.5.1 | Tela Principal: Diagrama Unifilar da Subestação | 74 |
| 4.5.2 | Telas de Configuração de Equipamentos | 76 |
| 4.5.3 | Telas de Configuração da Proteção | 80 |
| 4.5.4 | Tela de Simulação de Faltas | 83 |
| 4.6 | Caso de Uso: Simulando uma Falta na LT..... | 86 |
| 4.7 | Considerações Finais..... | 90 |
| CAPÍTULO 5..... | | 92 |
| 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | | 92 |
| 5.1 | Análise do Trabalho e Conclusões..... | 92 |
| 5.2 | Trabalhos Futuros | 94 |
| REFERÊNCIAS..... | | 95 |
| APÊNDICE – Diagramas UML..... | | 97 |

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

É difícil imaginar o mundo atual sem o uso da energia elétrica. Sua disponibilidade imediata, sempre na frequência e tensão corretas, bem como na quantidade exata das necessidades dos consumidores, faz com que a importância deste recurso passe praticamente despercebida, ficando evidente a sua essencialidade apenas nos momentos em que ele falta.

Apesar de todo planejamento e cuidado é inevitável que o sistema elétrico passe por perturbações que levem a faltas, definidas por (GRAINGER, et al., 1994) como qualquer falha que altere o fluxo normal de corrente no Sistema Elétrico de Potência.

Dada a imprevisibilidade das faltas, é tarefa árdua projetar esquemas de proteção que resguardecem o sistema elétrico e que sejam capazes de eliminar eventuais faltas de maneira rápida, seletiva e segura.

Os esquemas de proteção do Sistema Elétrico têm seu funcionamento baseado em relés. O relé tem a missão de identificar as faltas dentro de sua região de operação, e sempre que for sensibilizado por uma falta ele deve comandar a abertura do(s) disjuntor(es), isolando o trecho defeituoso de maneira a permitir, sempre que possível, que o sistema continue operando normalmente.

A análise e aplicação de Proteções do Sistema Elétrico de Potência não é tarefa simples e requer muito estudo e dedicação do profissional que pretenda lidar com o assunto. Assim sendo, empresas e profissionais da área reconhecem a importância de uma atualização técnica continuada para que possam acompanhar os avanços tecnológicos e o aumento da complexidade dos esquemas de proteções.

Nesse contexto, a Universidade Federal do Ceará (UFC), inicialmente com o apoio financeiro da Companhia Energética do Ceará (COELCE), desenvolveu uma ferramenta computacional de suporte ao ensino e capacitação em proteções voltada para a área de distribuição do setor elétrico. A ferramenta foi denominada de Simulador para Treinamento de Operação da Proteção de Sistemas Elétricos (STPO).

A versão inicial da ferramenta foi desenvolvida em Delphi¹ e chamada de STPO (Hamurabi, 2008), mas posteriormente foi reescrita em Java² e renomeada para STOP (Silva,2011).Em ambas as versões, Delphi e Java, a ferramenta auxilia tanto ao ensino presencial quanto a distância, sendo o ensino a distância realizado através do Teleduc³, na versão em Delphi, e através do Moodle⁴ na versão em Java.

Apoiado no êxito desta iniciativa observou-se a necessidade de expandir as funcionalidades da ferramenta com a implementação de um módulo voltado para a análise e proteção da partedo sistema elétrico brasileiro conhecida como Rede Básica, que de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), envolve, além das usinas de grande porte, a transmissão de energia em tensões iguais ou superiores a 230kV.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um módulo complementar para o STOP que abordarás proteções de uma subestação da rede básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) dando continuidade ao trabalho iniciado por Silva (SILVA, 2011).

1.2.2 ObjetivosEspecíficos

Desenvolver uma ferramenta computacional que contemple a representação de uma subestação de transmissão em 500-230 kV (Rede Básica). A ferramenta deve permitir configurar elementos do sistema e da proteção, bem como simular diversos tipos de faltas e avaliar a resposta da proteção à condição de falta.

Assim sendo, os seguintes objetivos deverão ser atingidos:

- Definir o arranjo da subestação (configuração de barramentos, disposição dos elementos e sistemas de proteção)atendendo as definições do

¹ Informações sobre Delphi disponíveis em <<http://www.embarcadero.com/products/delphi>>

² Informações sobre Java disponíveis em <<http://www.java.com>>

³ Informações sobre Teleduc disponíveis em <<http://hera.nied.unicamp.br/teleduc>>

⁴ Informações sobre Moodle disponíveis em <<http://moodle.org>>

Operador Nacional do Sistema (ONS), expressas nos Procedimentos de Rede (PROREDE);

- Desenvolver modelagem matemática para análise de curto circuito monofásico e trifásico nos barramentos da subestação utilizando o Método das Componentes Simétricas, inclusive considerando os diversos tipos de ligação dos enrolamentos do bay de transformação da subestação;
- Desenvolver modelagem matemática para análise de todos os tipos de curto circuito ao longo das Linhas de Transmissão da subestação utilizando o Método das Componentes Simétricas;
- Desenvolver modelagem matemática para definição das características da falta (tipo e distância em relação ao relé) uma vez que forem informadas as tensões e correntes de falta vistas pelo relé de proteção;
- Desenvolver, em JAVA, as interfaces gráfica e interatividades:
 - Tela principal baseada no diagrama unifilar da SE, contendo informações principais sobre os elementos do diagrama e um quadro alarmes e sinalizações (visor de LOG);
 - Telas de configurações dos elementos (Linhas de Transmissão, Transformador e Transformadores de Corrente);
 - Tela de informação e configuração das proteções, incluindo a atuação de relé de bloqueio (86);
 - Tela de características da falta simulada;
 - Telas de informações ao usuário, como tela de advertência para ações indevidas, etc.;
 - Desenvolver a interatividade dos disjuntores e chaves seccionadoras (possibilidade de o usuário abrir e/ou fechá-los) contemplando critérios de Intertravamento e possibilitando a recomposição da subestação para a simulação de uma nova falta.

1.3 Trabalhos Correlatos

Os principais trabalhos relacionados a esta dissertação são os trabalhos de (BEZERRA, 2008) e (SILVA, 2011), uma vez que a proposta do estudo atual é dar continuidade ao trabalho iniciado por eles. Contudo, outros trabalhos também

contribuíram bastante, pois representam alternativas interessantes de ferramentas de suporte ao ensino e capacitação na área de sistemas elétricos.

Em (ARAUJO, 2002) o autor apresenta a experiência do **Centro Regional de Operação de Sistema Leste (CROL)** da **Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF)** na utilização de um simulador de fluxo de potência, o *PowerWorld*, associado a um controlador remoto de PC, o *pcAnywhere*. Este arranjo permitia ao treinando interagir com o modelo do sistema elétrico, colocando em prática as instruções e recomendações normativas de operação do sistema.

Em (BHUVANESH, et al., 2005) os autores apresentam um módulo didático que simula a operação das proteções de um alimentador radial como uma opção de ferramenta de ensino de baixo custo para a disciplina de proteção de sistemas elétricos de potência. A vantagem desta iniciativa, além do menor investimento, é a utilização de um sistema físico que responde de maneira real às situações simuladas. Contudo, a estrutura fixa do arranjo limita muito o número de simulações possíveis de serem observadas.

Em (MIRANDA, et al., 2008) é descrita a experiência da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF na utilização de um simulador para treinamento de operadores de sistema e de instalação através da integração do sistema de controle e supervisão da empresa, o SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia), com o *Operator Training Simulator – EPRI/OTS*, possibilitando simular o ambiente de trabalho dos operadores, permitindo seu treinamento e reciclagem em diversas situações de operação do sistema elétrico.

Em (FERRARA, et al., 2009) os autores apresentam a experiência obtida por FURNAS no desenvolvimento e utilização de um Simulador de Treinamento de Operadores do Centro de Operação da empresa. Após a análise dos simuladores existentes comercialmente, a empresa optou pelo desenvolvimento de um simulador próprio que atendesse necessidades específicas e fosse totalmente integrado ao sistema SOL (Sistema utilizado no Centro de Operação da empresa). Desta forma o desenvolvimento do simulador foi voltado para o treinamento das funções de um operador do Centro de Operações do Sistema Interligado.

Em (LAZARIN, 2009) o autor apresenta um simulador de treinamento desenvolvido pela empresa ALSTOM com o propósito de preparar operadores capazes de exercer as atividades de controle e supervisão de uma usina hidroelétrica. Para tanto, o simulador é capaz de reproduzir todos os subsistemas

(unidades geradoras, serviços auxiliares elétricos e mecânicos, etc.) pertencentes à usina, permitindo que o operador em treinamento compreenda de forma clara todo o processo de geração hidroelétrica.

Em (MOUTINHO, 2010) tem-se o desenvolvimento de um simulador de relés de proteção, controle e supervisão aplicados às subestações da Eletronorte, localizadas no sistema elétrico do Tramo Oeste do Pará (SE Tucuruí – SE Altamira – SE Transamazônica – SE Rurópolis) e à subestação de Boa Vista em Roraima. Inicialmente o autor destaca que a diversidade de equipamentos e de fabricantes tornam complexas a assimilação e a configuração das funcionalidades exigidas pelo sistema elétrico e que, portanto, é necessária uma capacitação adequada. Em seguida, estabelece o desenvolvimento do simulador baseado nas informações geradas pelos equipamentos que compõem os sistemas de proteção, controle e supervisão da subestação, o que permite criar um ambiente virtual capaz de reproduzir as ações do sistema real.

Em (MIU, et al., 2010) é apresentado um experimento de educação a distância sobre distribuição do fluxo de potência utilizando um simulador que pode ser aplicado tanto para estudantes das áreas de engenharia quanto para alunos do nível médio. O experimento testou o conhecimento dos participantes sobre conceitos básicos de distribuição do fluxo de potência antes e depois da utilização do simulador e verificou um melhor desempenho após a utilização do simulador.

Em (BRITO, et al., 2012) os autores destacam o uso de softwares de simulação como alternativa de curto prazo na modernização da disciplina Proteção de Sistemas Elétricos. Os autores propõem que *“utilização de softwares permitirá ao aluno estudar casos mais complexos e em maior quantidade, simular cenários mais realísticos e compreender melhor os conceitos relacionados com a filosofia da proteção”*.

Em (PAIVA, 2013) o autor realiza a análise dos critérios do Operador Nacional do Sistema para definir uma subestação genérica de transmissão da Rede Básica. Após definida a subestação, o autor desenvolve a modelagem matemática, utilizando o Método das Componentes Simétricas, para obter os equacionamentos necessários para os cálculos de curto circuito nos barramentos e ao longo das linhas de transmissão.

Assim como os trabalhos citados, a ferramenta desenvolvida e apresentada neste trabalho busca ser uma opção no suporte ao ensino sobre conceitos

fundamentais do Sistema Elétrico de Potência e suas proteções, mais especificamente conceitos e proteções aplicados a Rede Básica, oferecendo um ambiente virtual onde o aluno possa compreender melhor estes conceitos através da possibilidade de configurar os elementos do sistema, configurar suas proteções e simular situações de falta verificando a atuação das proteções.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 1 são apresentados considerações iniciais, objetivos, trabalhos correlatos e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada a origem e evolução do STOP, falando sobre seu desenvolvimento e suas funcionalidades, além de informações sobre o Ambiente Virtual de Aprendizagem (AVA) Moodle.

No Capítulo 3 é apresentada a modelagem, baseada nos critérios estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema, para definição dos equipamentos e arranjos utilizados na subestação da rede básica simulada no novo módulo do STOP, bem como os critérios de análise de curto-circuito que servem de base no desenvolvimento das proteções utilizadas na ferramenta apresentada neste trabalho.

No Capítulo 4, são apresentadas algumas das etapas do desenvolvimento e detalhes das funcionalidades da ferramenta.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e proposições para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 ORIGEM E EVOLUÇÃO DA FERRAMENTA

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo é abordado de forma resumida, a evolução da ferramenta, desde a primeira versão em Delphi até o estágio atual do módulo de distribuição, de forma a evidenciar e prestar o devido reconhecimento ao trabalho que precedeu a criação do módulo de Rede Básica.

2.2 Versão Inicial em Delphi

A versão inicial da ferramenta foi desenvolvida por Bezerra (BEZERRA, 2008) e foi chamada de Sistema Simulador para Treinamento de Proteção e Operação de Sistemas Elétricos (STPO). Em seu trabalho Bezerra apresenta uma ferramenta desenvolvida para o treinamento presencial e a distância para profissionais da área de operação e proteção de sistemas elétricos.

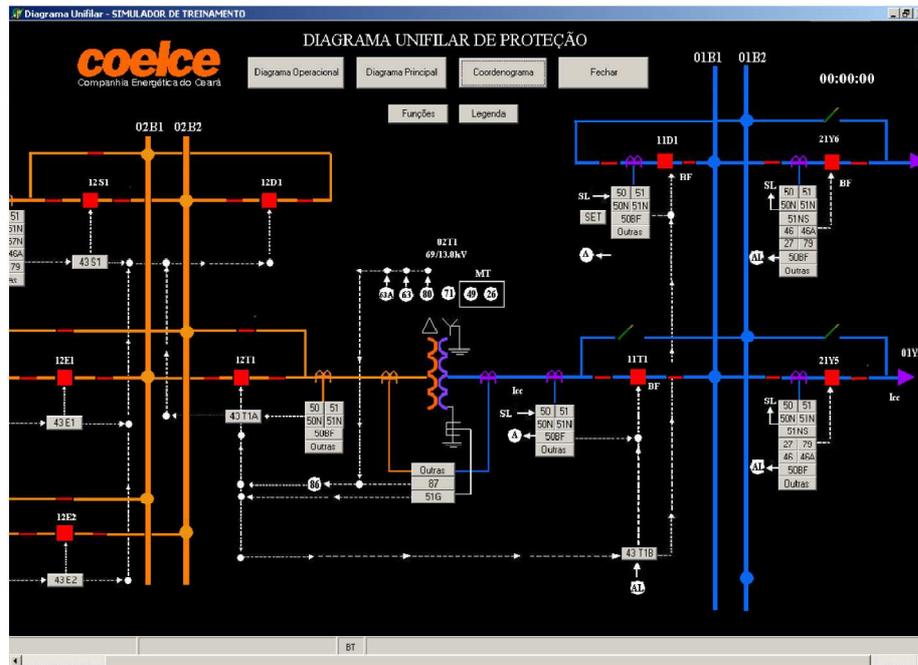
Essa ferramenta foi desenvolvida no ambiente Teleduc cujos módulos apresentam conteúdo de formação teórica sobre o sistema de distribuição de energia elétrica e um simulador capaz de representar situações próximas das situações reais, com a finalidade de ensino e capacitação de engenheiros e técnicos do setor elétrico, bem como de estudantes de engenharia.

Uma dificuldade enfrentada neste trabalho foi a incompatibilidade de tecnologias na integração da ferramenta de simulação ao Ambiente Virtual de Aprendizagem (AVA), que neste caso era o Teleduc. O simulador foi desenvolvido em Delphi, enquanto que os AVAs são, em sua maioria, baseados em tecnologia Web, que geralmente utilizam PHP, Java e outros.

Para contornar esta situação optou-se pela adaptação do simulador de maneira que este pudesse ser acessado remotamente utilizando-se o sistema VNC (*Virtual Network Computing*). O VNC é um sistema cliente-servidor que permite o acesso a uma interface gráfica a partir de um computador remoto, permitindo ainda o compartilhamento deste acesso.

No STPO é apresentado um diagrama unifilar de proteção de uma subestação padrão Coelce de 69-13,8kV. Na Figura 2.1 é apresentado o diagrama unifilar da subestação com seus respectivos equipamentos de proteção e operação que podem ser configurados com valores reais e testados através das simulações.

Figura 2.1- Diagrama Unifilar do STPO.



Fonte: (BEZERRA, 2008).

Na Tabela 2.1 são apresentados alguns dos recursos e funções que o STPO dispõe para simulação.

Tabela 2.1- Recursos e Funções do STPO.

| Recursos e Funções | Observações |
|--|---|
| Geração de Faltas em alimentadores com efeitos visuais indicativos de curto-circuito. | Somente faltas monofásicas e trifásicas foram consideradas. |
| Especificação da relação nominal dos transformadores de corrente (RTC) feita pelo usuário. | Sistema avalia e informa se a RTC está correta ou não. |
| Especificação dos relés multifunção de cada vão da subestação, com suas respectivas funções de proteção, baseado no padrão de subestações da Coelce. | |
| Implementação de critérios de ajuste e métodos de cálculo de cada função de proteção. | |
| Simulação da atuação das funções de proteção, com abertura dos disjuntores associados de acordo com o local e tipo de falta simulada. | |
| Simulação da função de seletividade lógica. | A função de seletividade lógica bloqueia a função instantânea do relé associado ao disjuntor geral do barramento. |
| Geração de coordenograma das proteções. | Baseado nas curvas de ajuste das proteções de sobrecorrente. |
| Simulação da função Religamento. | É possível selecionar diferentes ciclos de Religamento. |

Fonte: (BEZERRA, 2008).

A concepção em Delphi, somada a uma interface voltada para o uso individual, faz com que o STPO possa ser utilizado pelo professor para uma simples apresentação ou pelos alunos para o desenvolvimento de atividades individuais, o que, neste caso, requer a instalação do simulador na máquina de cada um dos alunos. Diante destas características, a completa integração do STPO ao Teleduc exigiria uma profunda reestruturação do simulador, não apenas para adaptá-lo ao acesso remoto, mas também mudanças estruturais para o uso colaborativo por usuários fisicamente distantes entre si.

Como dito anteriormente, utilizou-se o VNC para contornar esta situação, todavia, na prática, o simulador permite apenas que o tutor, por exemplo, possa simular uma falta no sistema, apresentando a atuação das proteções e a abertura dos disjuntores, e em seguida passe o direito de acesso para um aluno a fim de que o mesmo possa reconfigurar o sistema da forma correta. Enquanto isso os demais alunos podem apenas interagir através dos recursos de comunicação disponíveis, como o *chat* por exemplo.

2.3 Versão em Java

Dando continuidade ao trabalho de Bezerra(BEZERRA, 2008), foi apresentado por Silva(SILVA, 2011) uma evolução do STPO. Desenvolvido em Java e renomeada para STOP. A evolução apresentada por Silva buscava solucionar principalmente as questões de compatibilidade com os AVAs enfrentadas por Bezerra na versão inicial da ferramenta. Além disto, Silva desenvolveu melhorias relacionadas aos recursos e funções que são apresentados na Tabela 2.2.

A utilização do Java no desenvolvimento da ferramenta apresenta, além da maior compatibilidade com AVAs, as seguintes vantagens:

- Portabilidade;
- Orientação a Objetos;
- Extensibilidade;
- Open-source (Licença gratuita);
- Linguagem consolidada e com comunidade de desenvolvedores ativa; e

- Conta com recursos de alto desempenho como: *multithreading*,⁵ compilação *just-in-time* e utilização de códigos nativos.

O código Java é compilado para uma forma intermediária de código chamada de *bytecode*, que por sua vez é interpretado pela *Java Virtual Machine* (JVM) disponibilizada gratuitamente para os diversos sistemas operacionais utilizados atualmente.

As principais diferenças entre o STOP e o STPO são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Principais diferenças entre o STOP e o STPO

| STOP | STPO |
|--|---|
| Desenvolvido em Linguagem Java. Pode ser executado em qualquer plataforma ou equipamento que possua uma JVM. | Desenvolvido em Linguagem <i>Object Pascal</i> . Poder ser executado apenas em máquinas que utilizam o Windows como sistema operacional. |
| Integrado ao AVA Moodle Especificação e seleção de equipamentos (cabos da Linhas de Transmissão, Transformadores de Corrente e Transformadores de Potência) utilizando dados reais. | Integrado ao AVA Teleduc Solicita apenas a RTC do Transformador de Corrente. |
| Cálculo das potências e correntes de curto-circuito baseadas nas informações do tipo de cabo, geometria das linhas e equipamentos que foram selecionados. | Potências e correntes de curto-circuito informados manualmente pelo usuário. |
| Subestação do simulador com dois Transformadores de Potência em paralelo. | Subestação do simulador com apenas um Transformador de Potência. |
| Biblioteca com cabos, Transformadores de Corrente e Transformadores de Potência baseada em equipamentos comercialmente utilizados. | Informado manualmente as potências e a RTC dos equipamentos. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

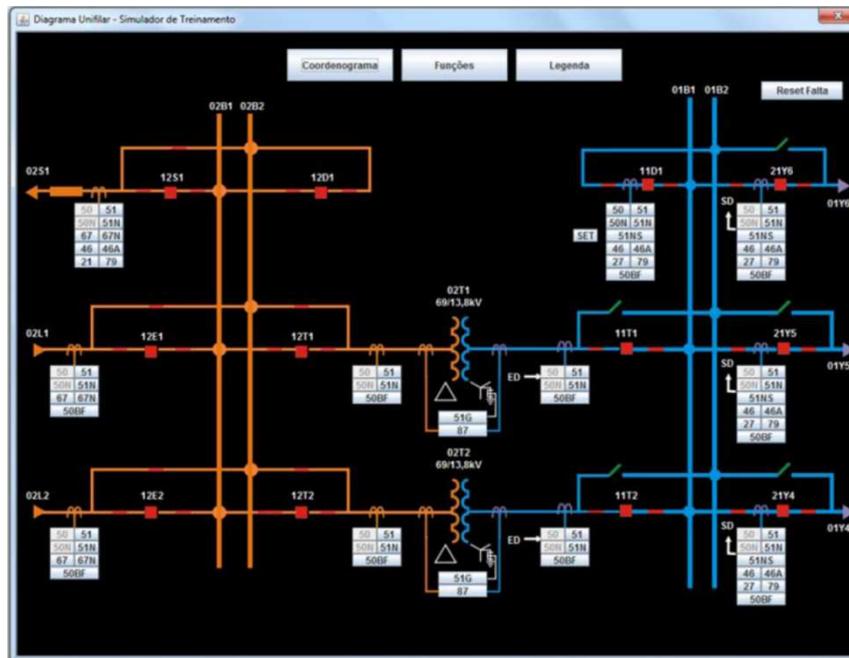
Assim como o STPO, no STOP é apresentado um diagrama unifilar de proteção de uma subestação padrão Coelce de 69-13,8kV. Na Figura 2.2 é apresentado o diagrama unifilar da subestação com seus respectivos equipamentos de proteção e operação que podem ser configurados com valores reais e testados através das simulações.

Os recursos e funções do STPO apresentados na Tabela 2.1, também estão presentes no STOP. A integração do STOP como Moodle é feita através de um bloco de interface, criado na tela do Moodle, que foi identificado com o mesmo nome da ferramenta, ou seja, STOP. Na Figura 2.3 é apresentado o bloco do STOP no Moodle. A principal funcionalidade deste bloco é permitir ao professor/tutor acesso

⁵ *Multithreading* é a habilidade de um programa ou de um processo de sistema operacional gerenciar seu uso por mais de um usuário por vez, ou ainda gerenciar múltiplas solicitações de um mesmo usuários sem que sejam necessárias múltiplas cópias do programa rodando no computador.

às ferramentas de configuração e controle do ambiente e aos alunos somente o acesso ao Simulador Aluno e Simulador.

Figura 2.2 - Diagrama Unifilar do STOP



Fonte: (SILVA, 2011).

Figura 2.3 - Bloco STOP integrado ao Moodle.



Fonte: (SILVA, 2011).

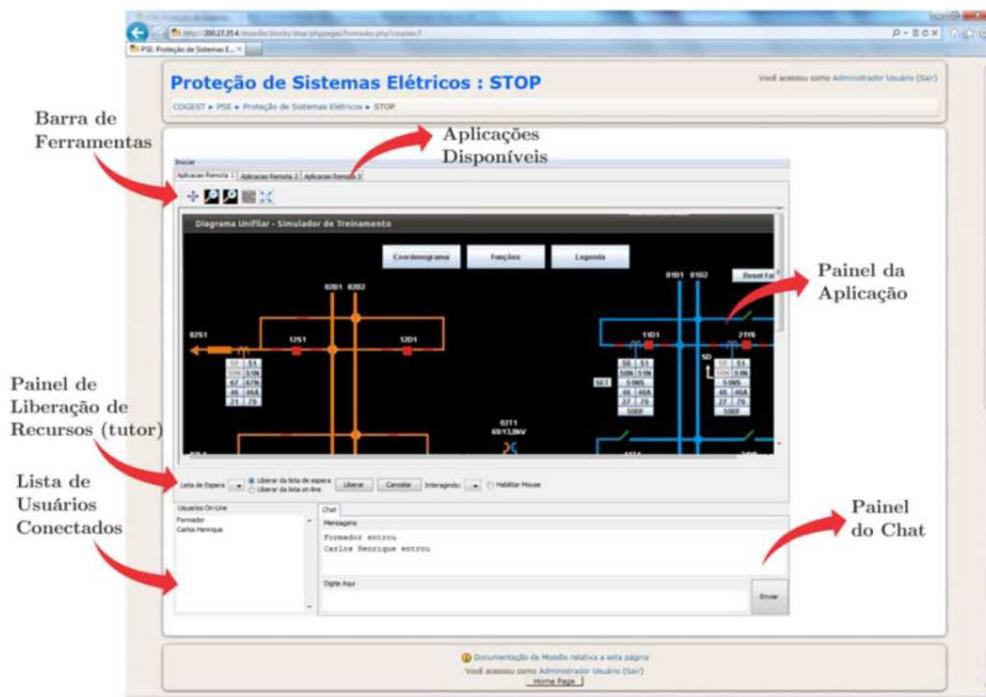
Os elementos do bloco são:

- **Simulador Formador:** Permite o acesso à ferramenta de acesso remoto, disponibilizado apenas para o professor/tutor (Figura 2.4);
- **Simulador Aluno:** Habilita a ferramenta de acesso remoto, disponibilizado para o professor/tutor e para os alunos;
- **Simulador:** Versão do STOP para utilização local utilizando o *Java Web Start*;

- **Servidor de Mensagens:** Permite acesso ao servidor de mensagens para o controle e gerenciamento do *chat*.

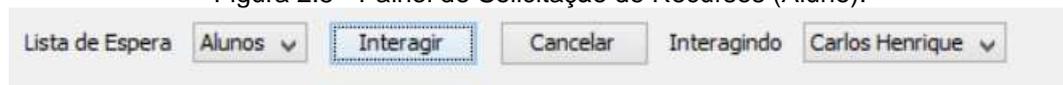
A interface utilizada pelo formador é apresentada na Figura 2.4 e a interface utilizada pelos alunos é bastante similar, diferindo apenas em relação ao Painel de Liberação de Recursos, que na interface dos alunos chama-se de Painel de Solicitação de Recursos. O detalhe deste painel da interface dos alunos é apresentado na Figura 2.5

Figura 2.4 - Interface da Ferramenta de Acesso Remoto



Fonte: (SILVA, 2011).

Figura 2.5 - Painel de Solicitação de Recursos (Aluno).



Fonte: (SILVA, 2011).

Os elementos de interface apresentados nas Figura 2.4 e Figura 2.5 são:

- **Aplicações Disponíveis:** Ambiente gráfico compartilhado em que cada aba disponível representa diferentes aplicações, as quais podem ser configuradas para acesso remoto pelos alunos;
- **Painel da Aplicação:** Corresponde à interface do computador remoto, que executa a aplicação compartilhada por formadores e alunos. O

acesso a esta região é mediado pelo tutor, que pode atribuir ou retirar o direito de acesso a um aluno por vez;

- **Barra de Ferramentas:** Contém os botões que atuam sobre o Painel de Aplicação, com opções de *pan*, *zoom in* e *zoom out*;
- **Painel do Chat:** Área onde podem ser trocadas mensagens entre os alunos e o formador durante a colaboração. Quando o Painel de Aplicação é apresentado em tela cheia, o chat é transportado para uma janela suspensa;
- **Lista de Usuários Conectados:** Apresenta a lista de usuários conectados à aplicação;
- **Painel de Liberação de Recursos:** Neste painel o tutor observa as solicitações de acesso à aplicação remota. Quando um aluno requisita acesso seu nome é apresentado na lista de usuários que estão aguardando a liberação da ferramenta. Na caixa de texto *status* é apresentado o nome do aluno que detém o direito de acesso no momento. Este painel não existe na interface dos alunos, sendo substituído pelo Painel de Solicitação de Recursos (Figura 2.5).

A interface de acesso ao simulador foi desenvolvida mantendo a arquitetura utilizada no STPO, ou seja, manteve-se a utilização do VNC para acesso remoto à ferramenta. Assim sendo, o STOP foi desenvolvido integrando as classes de um cliente *TightVNC*⁶, estendendo-as para incluir algumas adaptações.

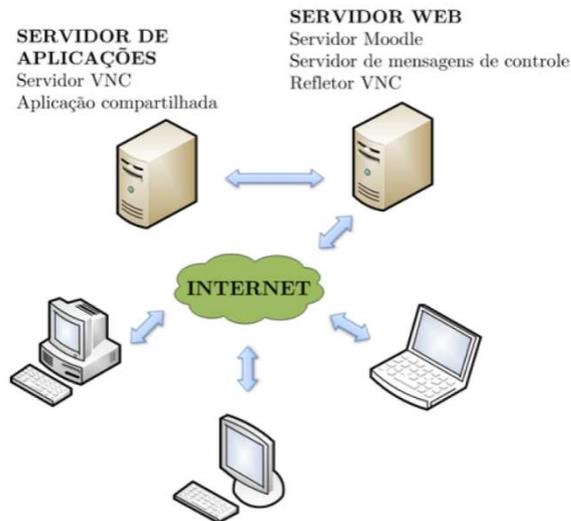
As interfaces apresentadas possuem flexibilidade suficiente para agregar novos componentes. É possível, por exemplo, trabalhar com múltiplas instâncias do VNC na mesma interface, possibilitando o acesso simultâneo a diferentes aplicações remotas em locais distintos. Em todo caso, o usuário decide qual aplicação será colocada em evidência no Painel de Aplicação.

A arquitetura utilizada é apresentada na Figura 2.6. Nela os clientes (formadores e alunos) utilizando um navegador acessam o Servidor *Web* em que está instalado o Moodle. Neste servidor, além do próprio Servidor *Web*, estão o Servidor de Mensagens (responsável pela comunicação de texto), o Módulo de Coordenação

⁶ O *TightVNC* é um pacote de software gratuito para controle remoto. Com *TightVNC* você poderá ver o desktop de uma máquina remota e controlá-la usando o mouse e o teclado de sua máquina local, tal como se você estivesse sentado em frente ao computador acessado.

(que controla o acesso à aplicação compartilhada) e um Refletor VNC. Este último faz a intermediação da comunicação com a aplicação compartilhada (*proxy*⁷).

Figura 2.6 - Distribuição dos Componentes da Arquitetura.



Fonte: (SILVA, 2011).

Em outro servidor chamado de Servidor de Aplicações são executados um Servidor VNC e a Aplicação Compartilhada. O Servidor de Aplicações pode estar na mesma rede local do Servidor Web, ou em redes diferentes. Para este último caso, o Servidor de Aplicações necessita, além de um IP válido, estar executando uma aplicação chamada de *VNCServer*, passando para o Servidor de Mensagens de Controle os parâmetros de configuração: endereço do servidor, porta e senha. Na Figura 2.7 é apresentado um exemplo de configuração do Servidor de Mensagens de Controle.

⁷ *Proxy* é um servidor intermediário que atende às requisições repassando os dados do cliente à frente para outro servidor.

Figura 2.7 - Servidor de Mensagens de Controle.

| Servidor | Porta | Senha |
|-------------|-------|----------|
| 200.17.35.4 | 80 | •••••••• |
| 200.17.35.6 | 35008 | •••••••• |
| 200.17.35.6 | 35009 | •••••••• |
| | | |
| | | |

Fonte: (SILVA, 2011).

O Servidor de Mensagens de Controle é um *servlet* que pode ser acessado remotamente e, como dito anteriormente, permite a configuração dos IPs, portas e senhas utilizadas pelo ambiente.

A tecnologia *servlet* da plataforma Java recebe as requisições HTTP dos clientes, processando-as no servidor utilizando as *Application Programming Interfaces* (API) do Java, e em seguida responde ao cliente, utilizando JavaScript, dados (uma página HTML, uma imagem GIF, etc.) que podem ser visualizados em qualquer dispositivo que possua um navegador, tornando o acesso deste conteúdo independente da JVM.

2.4 Considerações Finais

O STPO foi utilizado com sucesso em treinamentos realizados pela COELCE, enquanto que o STOP foi aplicado de maneira satisfatória em turmas da disciplina de Proteções do Sistema Elétrico de Potência do curso de Engenharia Elétrica da UFC. Assim sendo, as ferramentas demonstraram ser eficazes para o ensino e capacitação de profissionais e estudante do setor, ensejando a continuação destes projetos.

CAPÍTULO 3

3 REQUISITOS DOS ELEMENTOS DA SUBESTAÇÃO E CRITÉRIOS PARA A ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os equipamentos e os requisitos necessários para a definição da configuração de uma subestação de transmissão da rede básica, conforme exigências do ONS.

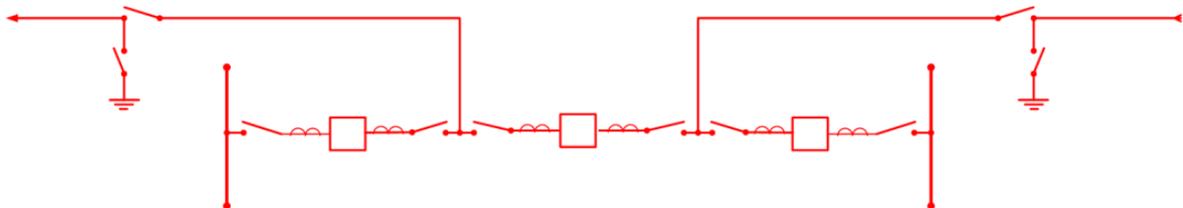
Uma vez definidos os equipamentos e a configuração da subestação, é possível elaborar o Diagrama Unifilar. Com os dados das impedâncias do sistema, da linha e do transformador é possível calcular os níveis de curto-circuito nas barras da subestação, informações essenciais para o estudo das proteções.

3.2 Equipamentos e Configurações

3.2.1 Arranjo de Barramento

Conforme definido no submódulo 2.3 dos procedimentos de rede do ONS, o arranjo de barramento em subestações com isolamento a ar é definido conforme o nível de tensão. O arranjo Barra Dupla com Disjuntor e Meio (Figura 3.1) é utilizado para subestações com nível de tensão igual ou superior a 345kV (PROREDE, 2011a).

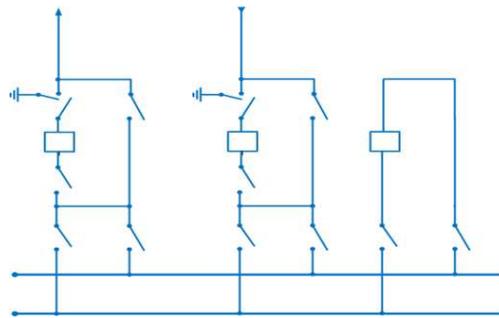
Figura 3.1 - Barra Dupla com Disjuntor e Meio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para barramentos de 230kV o arranjo utilizado deve ser Barra Dupla com Disjuntor Simples a Quatro Chaves (Figura 3.2) (PROREDE, 2011a).

Figura 3.2- Barra Dupla com Disjuntor a Quatro Chaves



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Transformadores de Potência

Os transformadores de potência devem ser dimensionados de maneira a permitir sua energização tanto pelo enrolamento primário quanto pelo enrolamento secundário. O uso de enrolamentos terciários pode ser aplicado em subestações da rede básica quando há necessidade de melhorar compensação de reativos; para atenuar sobretensões ou, ainda, para absorção de harmônicos de tensão de terceira ordem (PROREDE, 2011a).

O valor da impedância entre o enrolamento primário e o secundário deve ser no máximo de 14% na base nominal das unidades transformadoras (PROREDE, 2011a p. 11).

Os limites de perda nos transformadores de potência trifásicos ou banco monofásico com potência trifásica nominal superior a 5MVA e tensão de enrolamento de alta tensão igual ou superior a 230kV, são estabelecidos pelo ONS nos procedimentos de rede. Na Tabela 3.1 são apresentadas as perdas máximas padronizadas pelo ONS.

Tabela 3.1 - Perdas para Transformadores Trifásicos.

| Perdas em porcentagem da potência nominal | |
|--|----------------|
| Potência Trifásica Nominal ($P_n^{(1)}$) | Perdas Máximas |
| $5 < P_n < 30\text{MVA}$ | 0,70% |
| $30 \leq P_n < 50\text{MVA}$ | 0,60% |
| $50 \leq P_n < 100\text{MVA}$ | 0,50% |
| $100 \leq P_n < 200\text{MVA}$ | 0,40% |
| $P_n \geq 200\text{MVA}$ | 0,30% |

Nota: 1) P_n : potência nominal no último estágio de refrigeração.

Fonte: PROREDE - Submódulo 2.3, rev 2.0. (PROREDE, 2011a p. 11)

3.2.3 Disjuntores

Responsáveis pela interrupção de altas correntes, os disjuntores possuem mecanismos especiais para a interrupção do arco elétrico, resultante da abertura dos pólos.

Os disjuntores utilizados nas subestações da rede básica são dimensionados de modo que a sua capacidade de interrupção simétrica seja maior que os níveis de curto-circuito (monofásico e trifásico) de sua barra relacionada. Em situações em que devido a ampliações na subestação o nível de curto-circuito da barra atingir valores superiores à capacidade de interrupção simétrica do disjuntor, este passa a ser considerado como “superado por capacidade de interrupção” e deve ser substituído.

3.2.4 Chaves Seccionadoras

As chaves com lâmina de aterramento das linhas de transmissão devem ser dimensionadas para suportar, na abertura, os valores máximos de tensão e de corrente induzidas do sistema.

Para dimensionar esses equipamentos deve-se considerar a relação X/R (Fator de Assimetria). A relação indicada para a chave seccionadora, pelo fabricante, deve ser menor do que a relação do ponto do sistema onde serão utilizadas estas chaves. (PROREDE, 2011a)

3.2.5 Transformadores de Potencial (TP) e Transformadores de Corrente (TC)

Para monitorar as tensões e correntes do sistema elétrico são necessários equipamentos que convertam os elevados valores de tensão e corrente do sistema em valores compatíveis com os encontrados nos instrumentos de medição, controle e proteção. Estes equipamentos são os transformadores de instrumentos, que podem ser Transformadores de Corrente (TC) ou Transformadores de Potencial (TP)(SOUZA, 2010).

Os princípios de funcionamento e características construtivas são semelhantes aos dos transformadores de potência, contudo estes equipamentos são fabricados

de forma a reproduzir da maneira mais fiel possível em seu secundário a tensão ou a corrente do sistema.

3.2.5.1 Transformadores de Corrente (TC)

O Transformador de Corrente realiza a transdução das correntes do SEP para valores apropriados aos dispositivos de proteção, medição, controle e supervisão.

Conforme (SOUZA, 2010), os principais parâmetros de dimensionamento a serem avaliados nos TCs para uso em proteção são:

- a) A corrente primária nominal;
- b) A relação de transformação de corrente;
- c) O fator de sobrecorrente; e
- d) A classe de exatidão.

Outros parâmetros que merecem atenção no dimensionamento são: tensão máxima e nível de isolamento, frequência nominal, fator térmico, limite térmico, carga nominal e limite de corrente de curta duração nominal (SOUZA, 2010).

3.2.5.1.1 Relação de Transformação de Corrente (RTC)

É a relação de transformação que define o quanto a corrente do primário será reproduzida no secundário.

$$RTC = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

em que,

N_s : é o número de espiras no secundário.

N_p : é o número de espiras no primário.

I_s : é a corrente no secundário.

I_p : é a corrente no primário.

Uma vez que se padronizou a corrente secundária nominal em 5A, podendo ser também 1A para relés digitais, a relação de transformação ficou definida como:

$$RTC = \frac{X}{5}$$

em que X é a corrente primária nominal dada em norma regulamentadora, (NBR 6856, 1992). Na Tabela 3.2 são apresentadas as RTC padronizadas pela norma ABNT.

Tabela 3.2 - Relações de Transformador de Corrente.

| Relação Nominal Simples | | | | | |
|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Corrente Primária Nominal | Relação Nominal | Corrente Primária Nominal | Relação Nominal | Corrente Primária Nominal | Relação Nominal |
| 5 | 1:1 | 100 | 20:1 | 1200 | 240:1 |
| 10 | 2:1 | 150 | 30:1 | 1500 | 300:1 |
| 15 | 3:1 | 200 | 40:1 | 2000 | 400:1 |
| 20 | 4:1 | 250 | 50:1 | 2500 | 500:1 |
| 25 | 5:1 | 300 | 60:1 | 3000 | 600:1 |
| 30 | 6:1 | 400 | 80:1 | 4000 | 800:1 |
| 40 | 8:1 | 500 | 100:1 | 5000 | 1000:1 |
| 50 | 10:1 | 600 | 120:1 | 6000 | 1200:1 |
| 60 | 12:1 | 800 | 160:1 | 8000 | 1600:1 |
| 75 | 15:1 | 1000 | 200:1 | | |

Fonte: (SOUZA, 2010)

3.2.5.1.2 Erro na Relação de Transformação de Corrente

O erro de transformação ocorre devido à corrente de excitação do núcleo do TC. Quanto menor for a corrente de excitação, com relação à corrente do secundário do TC, menor será o erro.

Para TCs de medição o erro deve ser o menor possível, mas para TCs de proteção o erro admissível é de 2,5% ou 10%. Ou seja, o TC deve operar com margem de erro de 2,5% e 10% em torno da região não linear de sua curva de magnetização (SOUZA, 2010).

3.2.5.1.3 Fator de Sobrecorrente

O Fator de Sobrecorrente (FS) fornece a relação entre a máxima corrente primária de curto-circuito ($I_{Pcc_m\acute{a}x}$) que passa pelo TC e sua corrente primária

nominal (I_{Pnom}), de forma que o TC opere dentro dos limites estabelecidos sem entrar em regime de saturação(SILVA, 2011).

$$FS = \frac{I_{Pcc_m\acute{a}x}}{I_{Pnom}}$$

3.2.5.1.4 Classe de Exatidão

Na definição da classe de exatidão do TC, conforme ABNT (NBR 6856, 1992), consideram-se os seguintes aspectos:

- a) Características construtivas, alta ou baixa reatância;
- b) Erro admissível;
- c) Fator de Sobrecorrente; e
- d) Máxima potência aparente consumida pela carga do secundário do TC para uma corrente nominal de 5A.

3.2.5.1.5 Dimensionamento da Relação Nominal do TC

São três os critérios para o dimensionamento da corrente primária do TC(SILVA, 2011):

- Critério da Carga Nominal.
- Critério do Curto-circuito.
- Queda de tensão no Circuito do Secundário.

O critério da Carga Nominal consiste em calcular as correntes primárias nominais do sistema, no primário do TC, e então escolher na norma o valor imediatamente superior.

No critério do Curto-Circuito é calculada a corrente nominal a partir da razão entre a maior corrente de curto-circuito que pode passar pelo TC sobre o seu Fator de Sobrecorrente (FS). E como no critério da Carga Nominal, no critério do Curto-circuito também se escolhe o valor existente na norma imediatamente superior ao valor calculado(SOUZA, 2010).

$$I_{Pnom} = \frac{I_{Pcc_m\acute{a}x}}{FS} \text{ (Critério do Curto-circuito)}$$

No critério da queda de tensão no circuito secundário, o TC é considerado adequado quando a relação entre a maior queda de tensão obtida no circuito secundário ($V_{S\ max}$) e a tensão secundária nominal do TC ($V_{S\ nom}$), for menor ou igual a ⁸0,8.

$$\frac{V_{S\ max}}{V_{S\ nom}} = 0,8 \therefore V_{S\ nom} = 0,8 \times V_{S\ max}$$

Uma vez calculada a maior queda de tensão do circuito secundário ($V_{S\ max}$), obtém-se a tensão secundária nominal do TC ($V_{S\ nom}$) correspondente e, então, utilizando a classe de exatidão do TC, escolhe-se o TC com o valor de tensão secundária existente na norma imediatamente superior ao valor calculado.

Uma vez definida a RTC, calcula-se a corrente primária nominal, e de acordo com a norma escolhe-se a corrente primária do TC adequada, que deve ser o valor imediatamente superior à corrente calculada.

3.2.5.2 Transformador de Potencial

O Transformador de Potencial (TP) realiza a transdução das tensões do SEP para valores apropriados aos dispositivos de proteção, medição, controle e supervisão(SOUZA, 2010).

Os Transformadores de Potencial podem ser de dois tipos:

- a) Transformadores de Potencial Indutivo (TPI)
- b) Transformadores de Potencial Capacitivo (TPC)

Os TPs do tipo indutivo são normalmente usados com tensões até 69 kV. E os TPs do tipo capacitivo são usados em tensões acima de 138 kV. Para os casos de valores entre estas duas tensões, escolhe-se o mais adequado ao caso.

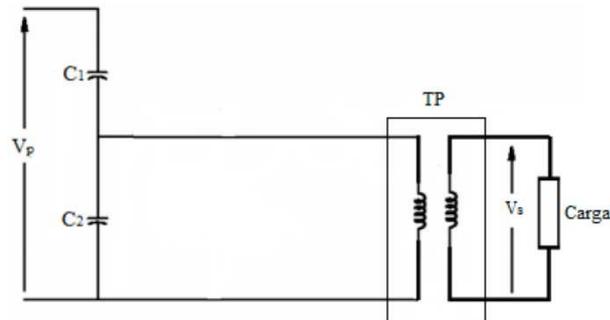
O TPI é um transformador de potência conectado a uma carga pequena, ou seja, a corrente no secundário é muito pequena tornando relevante apenas à transformação da tensão.

O TPC é formado por um Divisor de Potencial Capacitivo (DPC) conectado ao sistema, e um TPI acoplado ao DPC, que seria a saída do secundário do TPC. O

⁸ Valor utilizado pela AES Distribuidora Gaúcha de Energia S/A. Disponível em http://www.aessul.com.br/site/pdf/Calculo_de_Saturacao_de_TCs.pdf. Acesso em Janeiro de 2014.

DPC tem o objetivo de reduzir a tensão para níveis compatíveis ao uso do TPI, que seria uma tensão primária de 15kV ou 23kV. Na Figura 3.3 é apresentado o esquema simplificado do TPC.

Figura 3.3- Esquema Simplificado do TPC.



Fonte: (SOUZA, 2010)

A tensão no secundário do TPC é dada por:

$$V_S = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1}{RTC} \cdot V_P$$

em que,

$$V_P = \frac{V_{Linha}}{\sqrt{3}}$$

Assim, a Relação de Transformação de Potência é obtida através da seguinte fórmula:

$$RTP = \frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S}$$

A tensão secundária nominal entre fases ou entre fase e neutro foi padronizada em 115V, tanto para os relés eletromecânicos quanto para os relés digitais (COTOSCK, 2007).

Assim como o TC, o TP também apresenta erro em sua relação de transformação. Para o caso dos TPs, o erro surge da dispersão dos fluxos no primário e no secundário, e ele ocorre quando a soma das potências dos instrumentos ligados ao secundário do TC ultrapassar sua carga nominal. Para uso em proteção, o erro admissível para a classe de exatidão do TP é de 0,6% (SOUZA, 2010).

Ainda conforme Sousa(2010), outros parâmetros relevantes no dimensionamento do TP são: carga nominal, potência térmica nominal, nível de isolamento, frequência nominal e fator de sobretensão.

3.3 Análisedo Curto-circuito nas Barras da Subestação

Uma vez definidas as características dos equipamentos, das linhas e elaborado o diagrama unifilar, pode-se então iniciar o estudo e a determinação dos curtos-circuitos nas barras da subestação.

Os estudos de curto-circuito de um sistema são extremamente importantes, pois fornecem subsídio para diversas análises, tais como (PROREDE, 2011b):

- a) O cálculo do circuito equivalente do sistema;
- b) O dimensionamento elétrico e mecânico dos disjuntores, chaves seccionadoras, barramentos, linhas de transmissão, transformadores, aterramento das instalações e tantos outros equipamentos;
- c) Especificação dos transformadores de corrente (TC), bobinas de bloqueio e sistemas de proteção; e
- d) Os estudos relativos ao ajuste e coordenação da proteção.

Estes estudos de curto-circuito utilizam em seus cálculos os valores de impedância de sequência positiva, negativa e zero dos elementos do sistema. Para as unidades geradoras e compensadores síncronos estas impedâncias são referentes ao regime subtransitário saturado (X_d'') (PROREDE, 2011b).

3.3.1 Cálculo da Impedância de Sequência da Linha de Transmissão de Circuito Simples

Devido à dificuldade de obtenção direta por meio de ensaios, os parâmetros da LT são calculados com base nas características físicas de seus condutores, da disposição geométrica entre os condutores de uma fase e da disposição geométrica entre as fases. Considera-se, ainda, a resistividade do solo e se o circuito é simples ou não.

Todas estas análises são amplamente discutidas em Anderson(ANDERSON, 1999), Fuchs(FUCHS, 1977),Grigsby(GRIGSBY, 2001) e Ziegler(ZIEGLER, 1999), contudo será adotado o desenvolvimento aplicado por Ziegler, uma vez que suas

análises são mais voltadas para resultados aplicados aos relés digitais, ou seja, uma abordagem mais próxima do que é encontrado nos relés utilizados no mercado atualmente.

Em (ZIEGLER, 1999), para circuitos simples de linhas transpostas como é o caso das linhas utilizadas no simulador, os valores das impedâncias de sequência positiva e de sequência negativa serão definidos pelas equações (1) e (2) respectivamente.

- Impedância de Sequência Positiva:

$$Z'_1 = R'_L + j\omega \cdot 10^{-4} \left(2 \ln \frac{A}{r} + 0.5\mu_1 \right) [\Omega/km] \quad (1)$$

- Impedância de Sequência Zero:

$$Z'_0 = R'_L + 3R'_E + j\omega \cdot 10^{-4} \left(6 \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r \cdot A^2}} + 0.5\mu_1 \right) [\Omega/km] \quad (2)$$

em que,

- r é o raio do condutor em metros.
- $A = \sqrt{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}}$ mé a Distância Média Geométrica entre as fases – DMG.
- a_{12}, a_{23}, a_{31} são as distância entre as fases 1 e 2, 2 e 3, e 1 e 3 respectivamente, em metros.
- R'_L é a resistência do cabo condutor em Ω/km .
- $\rho =$ Resistência específica do solo $\begin{cases} 100 \Omega \cdot m, \text{ para solo molhado} \\ 500 \Omega \cdot m, \text{ para solo seco} \end{cases}$
- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \text{ rad/s}$ é a frequência do sistema.
- $R'_E = \frac{\pi}{2} \cdot \omega \cdot 10^{-4} \Omega/km$ é a resistência do solo.
- $\delta = 1650 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\omega}}$ mé a profundidade de penetração no solo.
- $\mu_1 = 1$ (Permeabilidade relativa tanto para o cobre quanto para o alumínio.)

3.3.2 Cálculo dos Curtos-circuitos nas Barras da Subestação

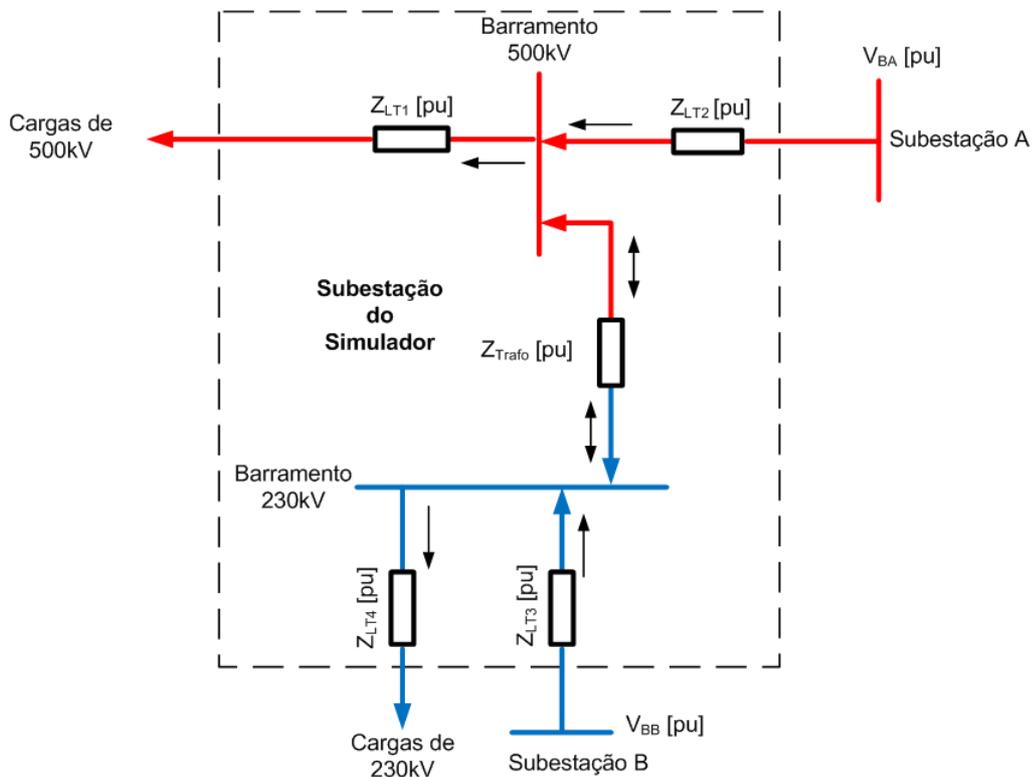
3.3.2.1 Representação equivalente do Sistema

Na Figura 3.4 é apresentado o diagrama de impedância equivalente do diagrama unifilar da subestação de rede básica utilizada no simulador. O objetivo deste

diagrama é representar o sistema de maneira a facilitar tanto a análise quanto o cálculo das correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas nas barras de 500kV e 230kV, quanto a análise e o cálculo das correntes e tensões nos relés, referentes às faltas em diferentes pontos deste sistema.

Para simplificar ainda mais os cálculos, todos os valores de tensão, corrente e impedância foram convertidos para PU. Para isso utilizou-se como potência de base a potência do primário do transformador, e como tensões de base a tensão de 500kV, para o circuito do lado primário do transformador, e 230kV para o circuito do lado do secundário do transformador. Os demais valores de base foram obtidos a partir destes.

Figura 3.4 - Diagrama Unifilar de Impedâncias da Subestação do Simulador.



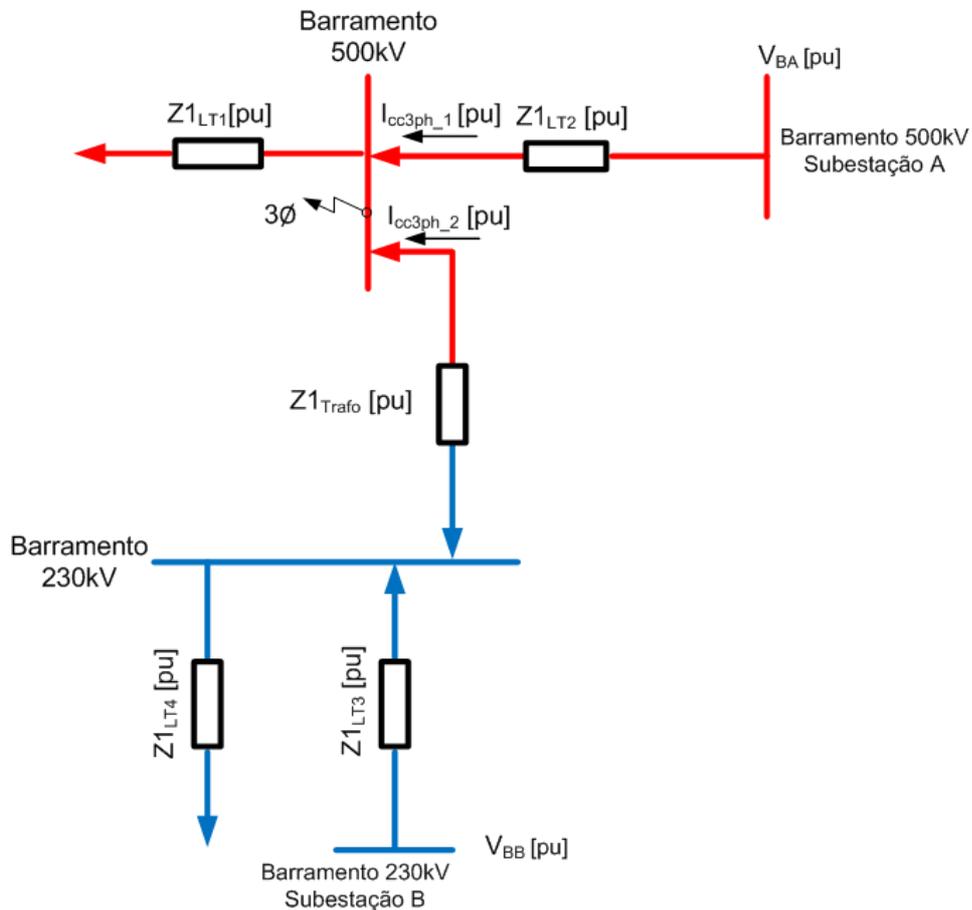
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2.2 Cálculo da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

Em (ANDERSON, 1999), o cálculo da corrente de curto-circuito trifásica utiliza as impedâncias de sequência positiva dos elementos do sistema. Neste caso em particular são desconsideradas eventuais contribuições das cargas para a corrente de curto-circuito.

Assim sendo, na Figura 3.5 é ilustrada a análise do curto-circuito trifásico na barra de 500kV.

Figura 3.5- Curto-circuito Trifásico no Barramento de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2.2.1 Corrente de Curto-Circuito Trifásico no Barramento de 500kV

As correntes de curto-circuito trifásicas, I_{cc3ph_1} e I_{cc3ph_2} em pu, apresentadas na Figura 3.5 são definidas pelas equações (3) e (4), respectivamente.

$$I_{cc3ph_1} = \frac{V_{BA}}{Z_{1_{LT2}}} \quad (3)$$

$$I_{cc3ph_2} = \frac{V_{BB}}{Z_{1_{LT3}} + Z_{1_{Trafo}}} \quad (4)$$

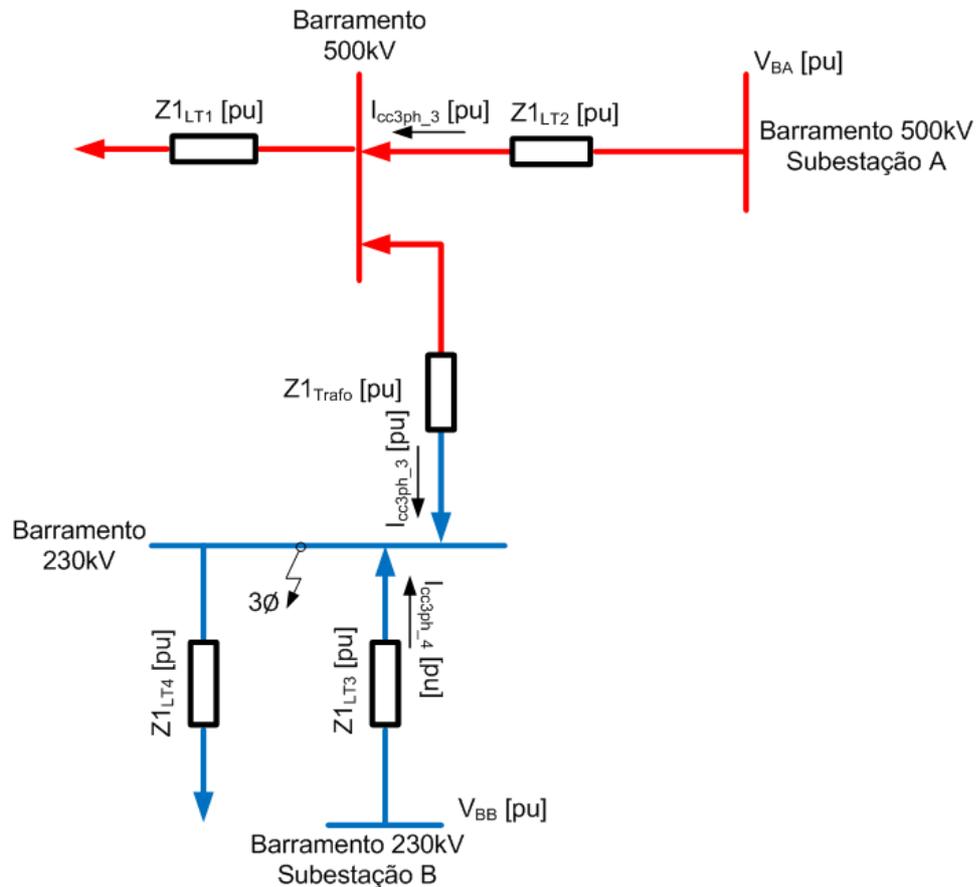
Assim, a corrente de curto-circuito trifásica no barramento de 500kV, I_{cc3ph_500kV} , é definida pela Equação (5).

$$I_{cc3ph_500kV} = I_{cc3ph_1} + I_{cc3ph_2} \quad (5)$$

3.3.2.2.2 Corrente de Curto-Circuito Trifásico no Barramento de 230kV

Na Figura 3.6 é ilustrada a análise do curto-circuito trifásico na barra de 230kV.

Figura 3.6- Curto-circuito Trifásico no Barramento de 230kV.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As correntes de curto-circuito trifásicas, I_{cc3ph_3} e I_{cc3ph_4} em pu, apresentadas na Figura 3.6 são definidas pelas equações (6) e (7), respectivamente.

$$I_{cc3ph_3} = \frac{V_{BA}}{Z_{1LT2} + Z_{1trafo}} \quad (6)$$

$$I_{cc3ph_4} = \frac{V_{BB}}{Z_{1LT3}} \quad (7)$$

Assim, a corrente de curto-circuito trifásica no barramento de 230kV, I_{cc3ph_230kV} , é definida pela Equação (8).

$$I_{cc3ph_230kV} = I_{cc3ph_3} + I_{cc3ph_4} \quad (8)$$

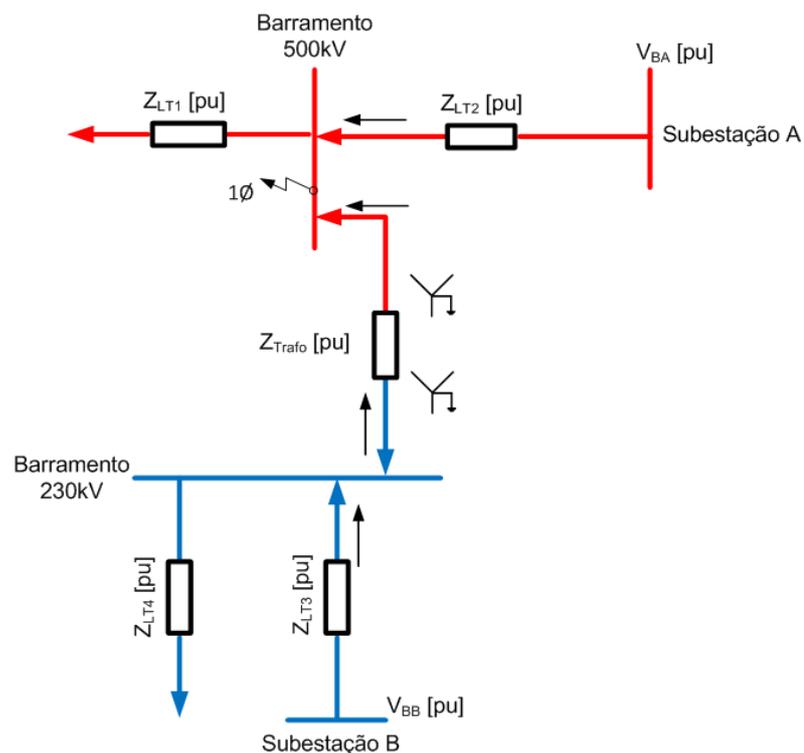
3.3.2.3 Cálculo da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

A corrente de curto-circuito monofásico é obtida através da análise dos circuitos de sequência positiva, negativa e zero que são conectados em série para o cálculo da corrente de curto-circuito. É importante lembrar que para o transformador o circuito equivalente de sequência zero muda conforme o tipo de ligação utilizada, o que torna necessário uma análise específica para cada tipo de ligação do transformador.

3.3.2.3.1 Corrente de Curto-Circuito Monofásico no Barramento de 500kV

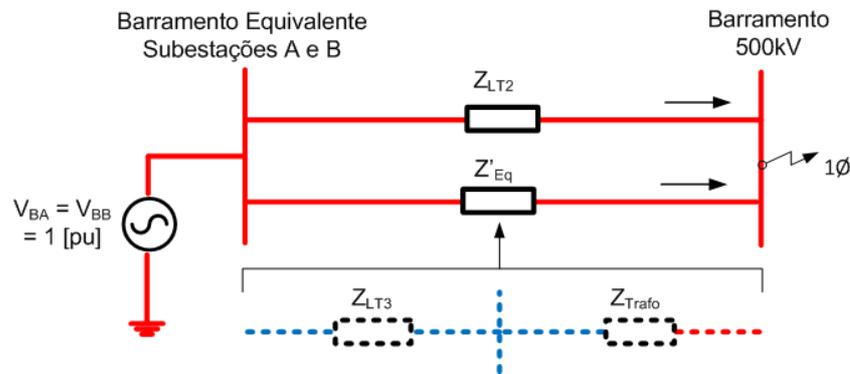
No cálculo do curto-circuito monofásico para o barramento de 500 kV em que o transformador de dois enrolamentos está conectado em estrela aterrado, tanto no primário quanto no secundário, permite afirmar que haverá contribuição das componentes de sequência positiva, negativa e zero para a corrente de curto-circuito proveniente do vão de transformação. O diagrama de impedâncias para a ligação Y-Y aterrado é apresentada na Figura 3.7.

Figura 3.7- Diagrama de Impedância do Curto-circuito Monofásico na Barra de 500 kV para Transformador Conectado em Estrela Aterrado no Primário e no Secundário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.8- Diagrama Equivalente do Curto-circuito Monofásico na Barra de 500 kV para Transformador Conectado em Estrela Aterrado no Primário e no Secundário.



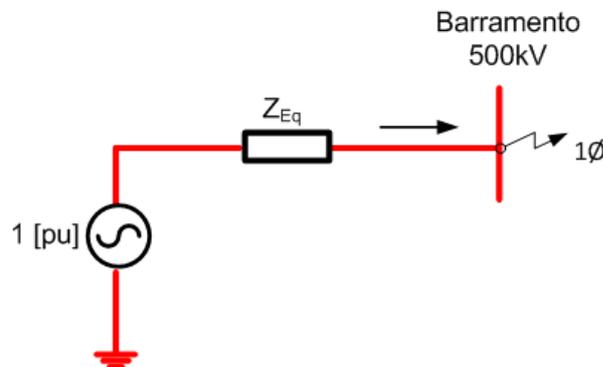
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em que,

$$Z'_{Eq} = Z_{LT3} + Z_{Trafo} \quad (9)$$

Baseado no diagrama da Figura 3.7, obtém-se o circuito equivalente apresentado na Figura 3.8, e deste obtém-se o circuito equivalente Thévenin apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9- Circuito Equivalente Thévenin do Curto-circuito Monofásico na Barra de 500 kV para Transformador Conectado em Estrela Aterrado no Primário e no Secundário.



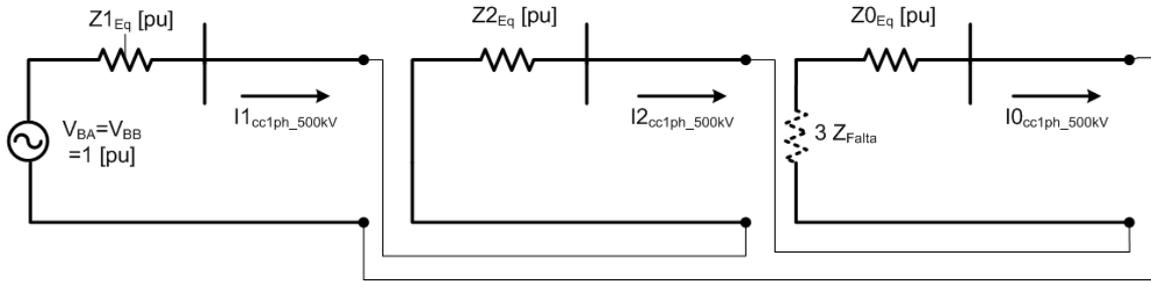
Fonte: Elaborada pelo autor.

Do circuito equivalente da Figura 3.9 obtém-se a impedância equivalente, Z_{Eq} , calculada pela Equação (10).

$$Z_{Eq} = \frac{Z_{LT2} \cdot Z'_{Eq}}{Z_{LT2} + Z'_{Eq}} \quad (10)$$

A corrente de curto-circuito monofásica será obtida por meio dos circuitos equivalentes de Thévenin de sequência positiva, negativa e zero ligados em série (Figura 3.10).

Figura 3.10- Circuito de Sequência para Curto-circuito Monofásico na Barra de 500 kV para Ligação Y-Y aterrado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para esta condição a corrente de curto-circuito monofásica no barramento de 500 kV, I_{cc1ph_500kV} , é calculada pela Equação (11).

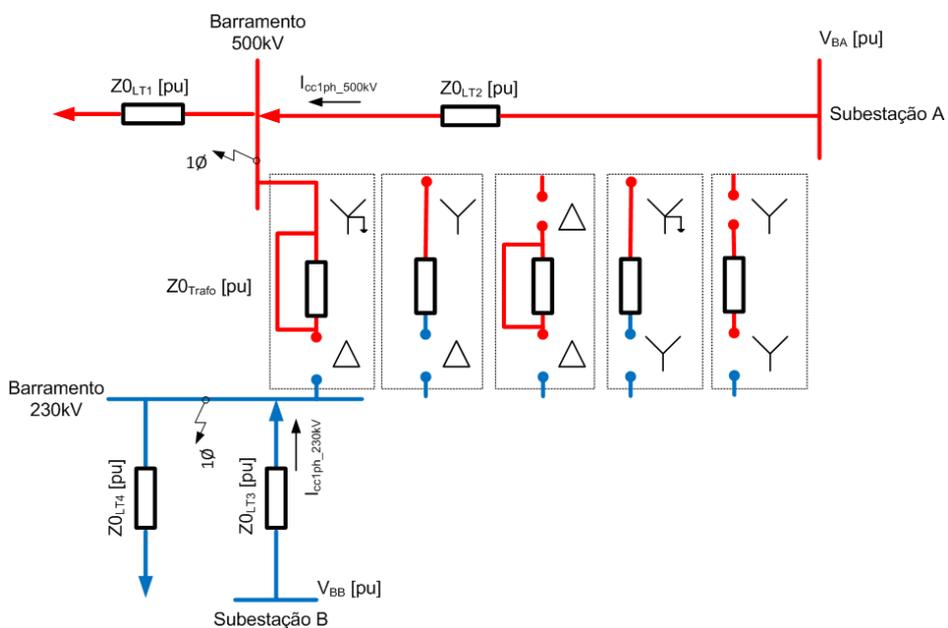
Considerando $3Z_{Falta} \ll Z_{Eq}$,

$$I_{cc1ph_500kV} = I1_{cc1ph_500kV} = I2_{cc1ph_500kV} = I0_{cc1ph_500kV}$$

$$I_{cc1ph_500kV} = \frac{1}{Z1_{Eq} + Z2_{Eq} + Z0_{Eq}} \text{ [pu]} \tag{11}$$

Para o cálculo do curto-circuito monofásico no barramento de 500 kV onde o primário ou o secundário do transformador está conectado em Delta ou Estrela não aterrado, não haverá contribuição da componente de sequência zero proveniente do vão de transformação para o cálculo da corrente de curto-circuito no barramento de 500 kV. Na Figura 3.11 é apresentada a representação do circuito para a componente de sequência zero.

Figura 3.11- Ligações do Transformador sem Contribuição da Componente de Sequência Zero para Corrente de Curto-circuito na Barra de 500 kV.



Fonte: Elaborada pelo autor.

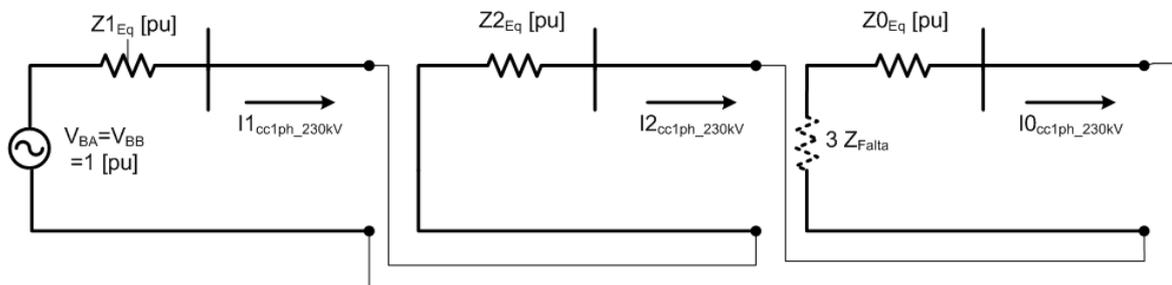
Assim sendo a corrente de curto-circuito monofásica será obtida através dos circuitos equivalentes de seqüência positiva, negativa e zero da linha de transmissão proveniente da subestação A ligados em série (Figura 3.12).

Contudo, as impedâncias equivalentes de seqüência positiva e negativa são as mesmas que foram calculadas para a ligação Y-Y aterrado, dadas pela Equação (10). Neste caso, a impedância equivalente de seqüência zero será igual à impedância de seqüência zero da LT2.

$$Z'_{0Eq} = Z_{0LT2} \quad (12)$$

Assim sendo, a corrente de curto-circuito monofásica no barramento de 500 kV, I_{cc1ph_500kV} , é calculada pela Equação (13).

Figura 3.12- Circuito de Seqüência para Curto-circuito Monofásico na Barra de 500 kV.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando $3Z_{Falta} \ll Z_{Eq}$,

$$I_{cc1ph_500kV} = I1_{cc1ph_500kV} = I2_{cc1ph_500kV} = I0_{cc1ph_500kV}$$

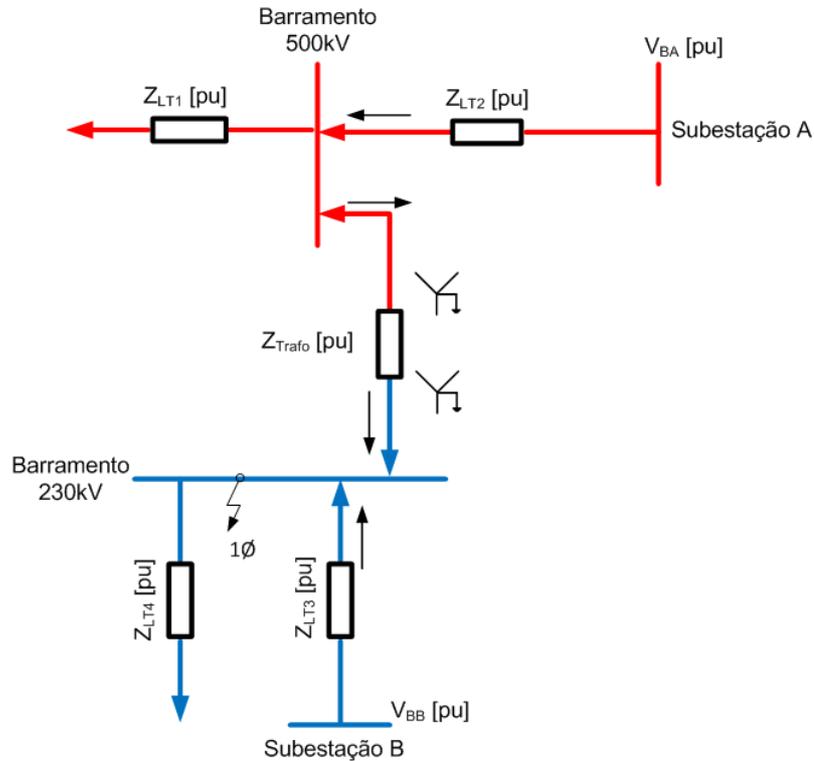
$$I_{cc1ph_500kV} = \frac{V_{BA}}{Z1_{Eq} + Z2_{Eq} + Z'_{0Eq}} \text{ [pu]} \quad (13)$$

3.3.2.3.2 Corrente de Curto-Circuito Monofásica no Barramento de 230kV

O cálculo da corrente de curto-circuito monofásica no barramento de 230kV é realizado de forma análoga ao cálculo para o barramento de 500 kV.

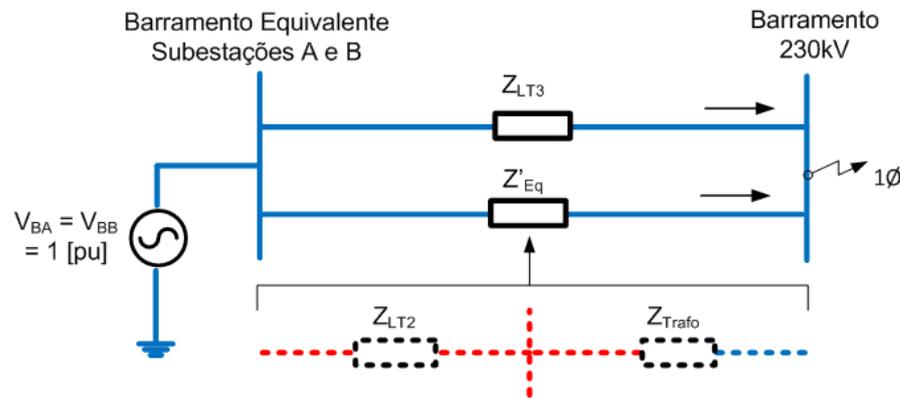
Para o caso do transformador conectado em estrela aterrado, tanto no primário quanto no secundário (Figura 3.13), o diagrama equivalente e o circuito equivalente de Thévenin para o curto-circuito monofásico na barra de 230 kV são apresentados na Figura 3.14 e na Figura 3.15, respectivamente.

Figura 3.13- Diagrama de Impedância do Curto-circuito Monofásico na Barra de 230 kV para Transformador Conectado em Estrela Aterrado no Primário e no Secundário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.14- Diagrama Equivalente do Curto-circuito Monofásico na Barra de 230 kV para Transformador Conectado em Estrela Aterrado no Primário e no Secundário.



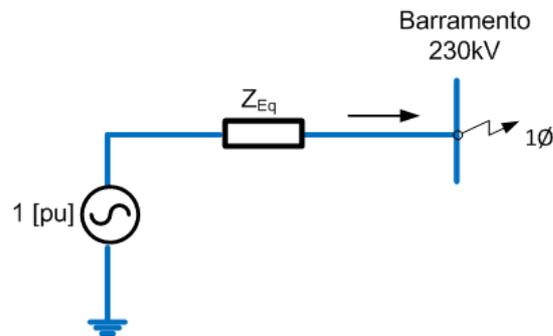
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em que,

$$Z'_{Eq} = Z_{LT2} + Z_{Trafo}$$

(14)

Figura 3.15- Circuito Equivalente de Thévenin do Curto-circuito Monofásico na Barra de 230 kV para Transformador Conectado em Estrela Aterrado no Primário e no Secundário.



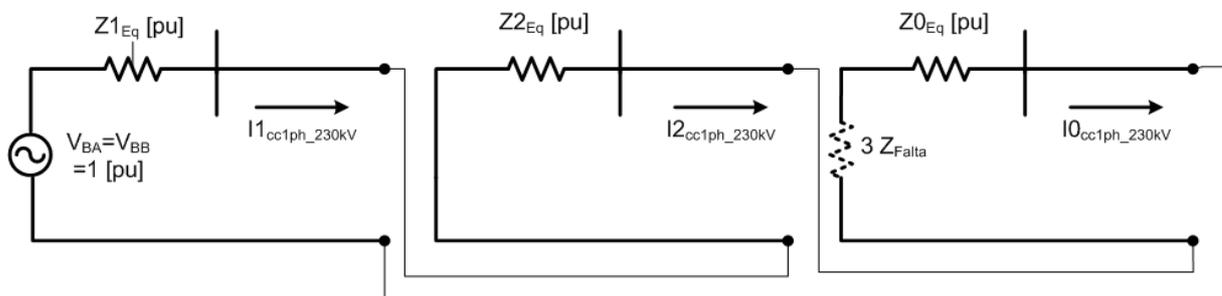
Fonte: Elaborada pelo autor.

Do circuito equivalente da Figura 3.15 obtém-se a impedância equivalente, Z_{Eq} , calculada pela Equação (15).

$$Z_{Eq} = \frac{Z_{LT3} \cdot Z'_{Eq}}{Z_{LT3} + Z'_{Eq}} \quad (15)$$

A corrente de curto-circuito monofásica será obtida através dos circuitos equivalentes de Thévenin de sequência positiva, negativa e zero ligados em série (Figura 3.10).

Figura 3.16- Circuito de Sequência para Curto-circuito Monofásico na Barra de 230 kV para Ligação Y-Y aterrado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para esta condição a corrente de curto-circuito monofásica no barramento de 230 kV, I_{cc1ph_230kV} , é calculada pela Equação (16).

Considerando $3Z_{Falta} \ll Z_{Eq}$,

$$I_{cc1ph_230kV} = I1_{cc1ph_230kV} = I2_{cc1ph_230kV} = I0_{cc1ph_230kV}$$

$$I_{cc1ph_230kV} = \frac{1}{Z1_{Eq} + Z2_{Eq} + Z0_{Eq}} \text{ [pu]} \quad (16)$$

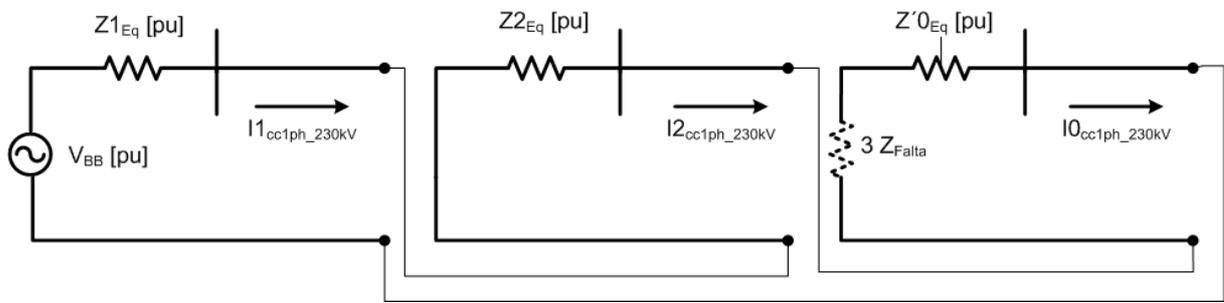
Para o caso onde o primário ou o secundário do transformador está conectado em Delta ou Estrela não aterrado (Figura 3.11), o circuito de sequência correspondente é apresentado na Figura 3.17.

Novamente as impedâncias equivalentes de sequência positiva e negativa são as mesmas que foram calculadas para a ligação Y-Y aterrado, dadas para a barra de 230 kV pela Equação (15). A impedância equivalente de sequência zero para este caso será igual à impedância de sequência zero da LT3.

$$Z'_{0Eq} = Z_{0LT3} \quad (17)$$

Para esta condição a corrente de curto-circuito monofásica no barramento de 230 kV, I_{cc1ph_230kV} , é calculada pela Equação (18).

Figura 3.17- Circuito de Sequência para Curto-circuito Monofásico na Barra de 230 kV.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando $3Z_{Falta} \ll Z_{LT3}$,

$$I_{cc1ph_230kV} = I1_{cc1ph_230kV} = I2_{cc1ph_230kV} = I0_{cc1ph_230kV}$$

$$I_{cc1ph_230kV} = \frac{V_{BB}}{Z1_{Eq} + Z2_{Eq} + Z'0_{Eq}} \text{ [pu]} \quad (18)$$

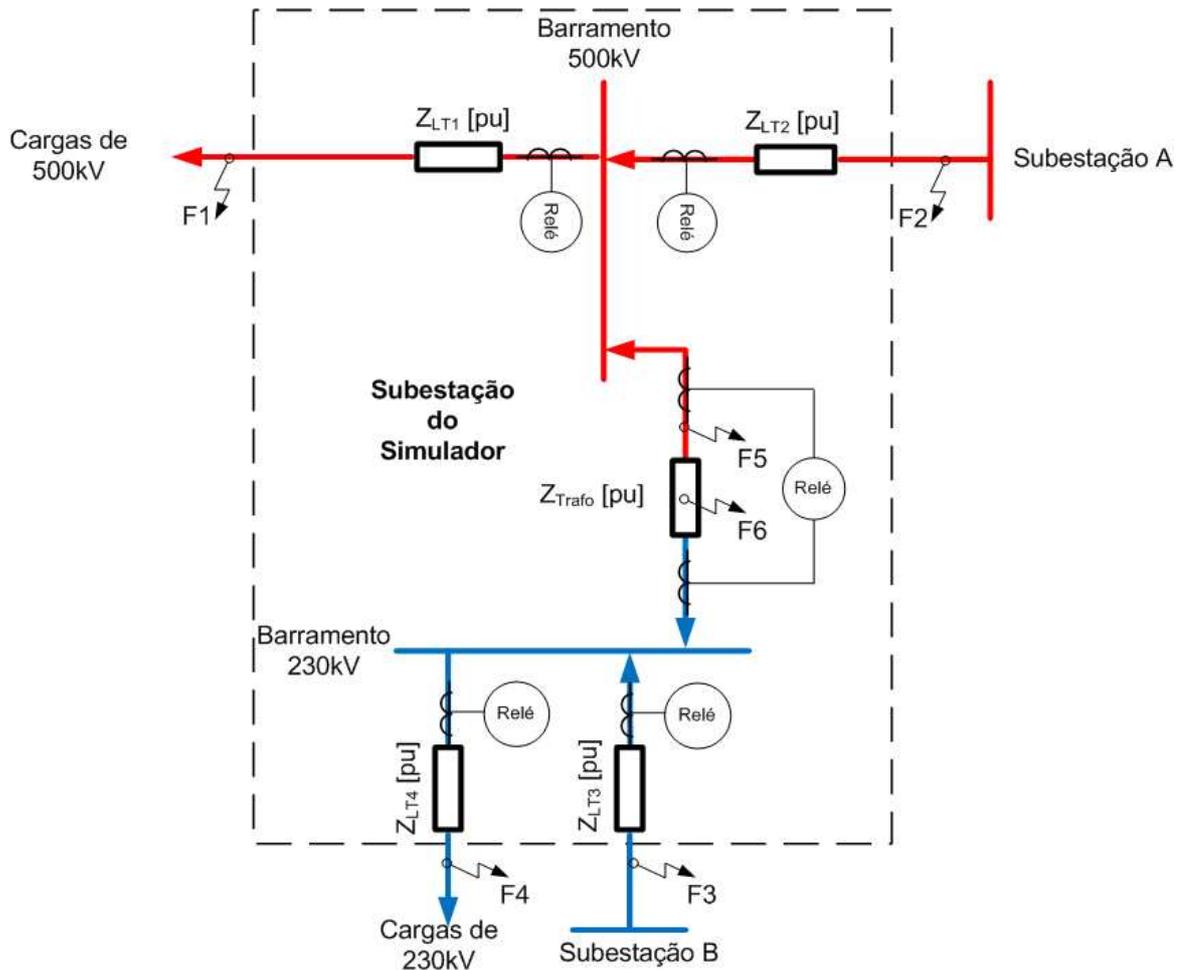
3.4 Simulação de uma Falta na Linha de Transmissão

3.4.1 Proteção de Distância

Neste tópico é apresentado o cálculo da impedância verificada pela proteção de distância, ou seja, a localização da falta ao longo da linha, com base nos valores de tensões e correntes na entrada do relé. É apresentado também, o cálculo das tensões e correntes que devem ser vistas nas entradas do relé, a partir do tipo e distância conhecidos de falta na linha.

No simulador é possível simular a atuação da proteção de distância para as faltas apresentadas na Figura 3.18. Contudo, a falta no ponto 1 (F1) será utilizada para as análises e cálculos desenvolvidos neste capítulo.

Figura 3.18- Locais das Faltas no Simulador.

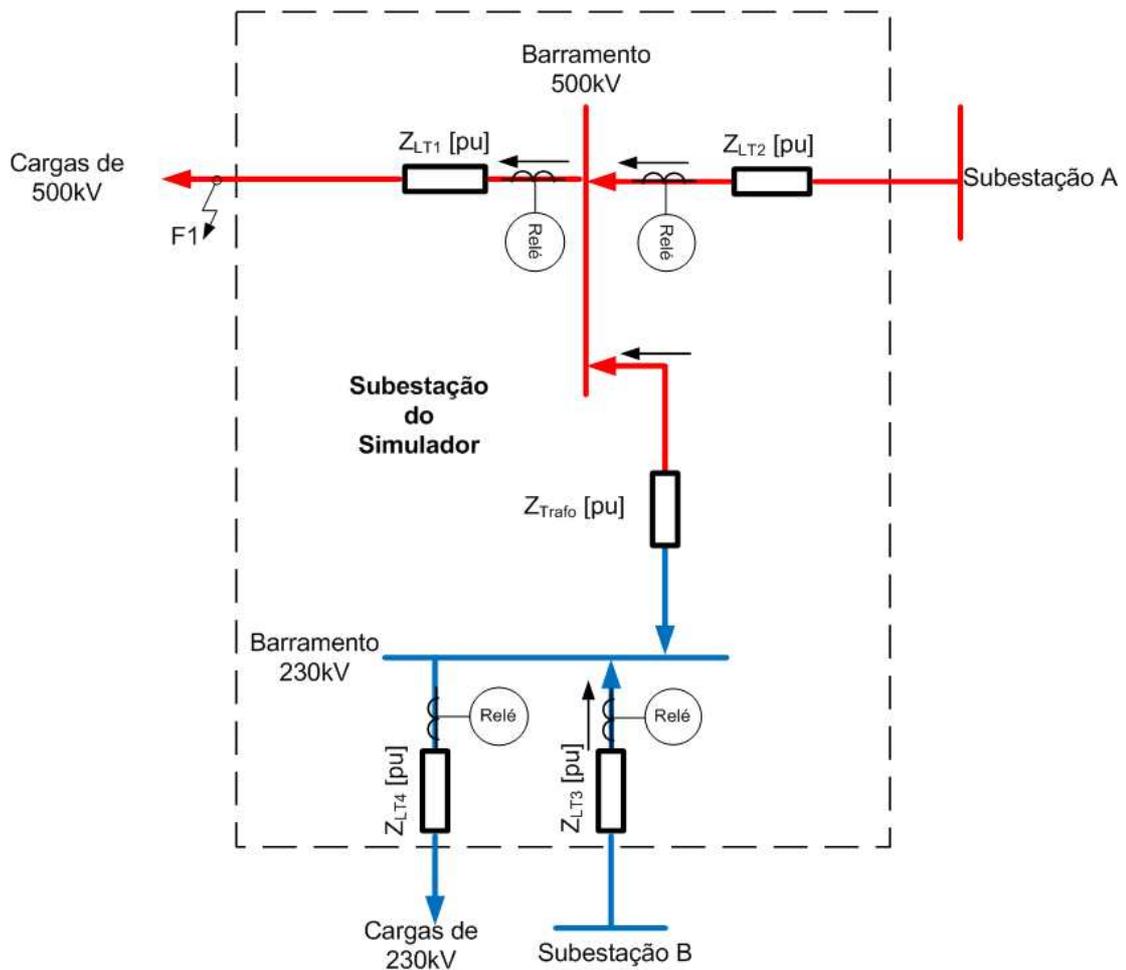


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.1.1 Cálculo das Tensões e Correntes Vistas pelo Relé para a Falta F1

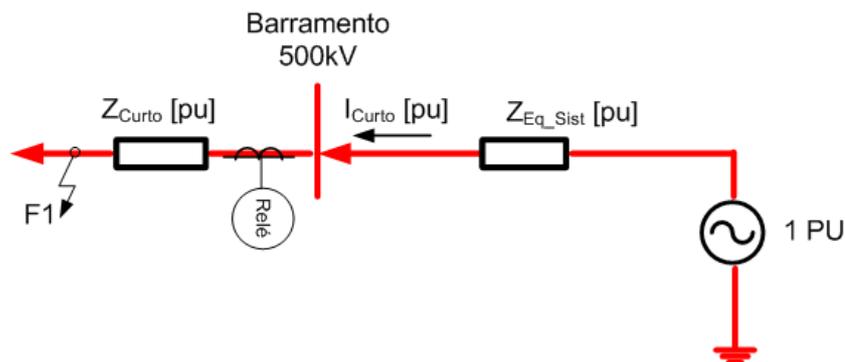
Na Figura 3.19 é apresentado o diagrama de impedância para a falta F1, enquanto que na Figura 3.20 é mostrado o circuito equivalente de Thévenin para a falta F1.

Figura 3.19- Diagrama de Impedância para a Falta F1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.20- Circuito Equivalente Thévenin para a Falta F1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.20, a impedância Z_{Curto} corresponde à impedância entre o local da falta e o relé de proteção da linha, e $Z_{\text{Eq_Sist}}$ é a impedância equivalente do sistema.

Desta forma, a impedância Z_{Curto} é definida pela Equação (19).

$$Z_{\text{Curto}} = L \cdot Z_{\text{LT1}} [\Omega] \quad (19)$$

Em que, L é a distância, em km, entre o local da falta e o relé de proteção, e Z_{LT1} é a impedância da LT1, em Ω/km .

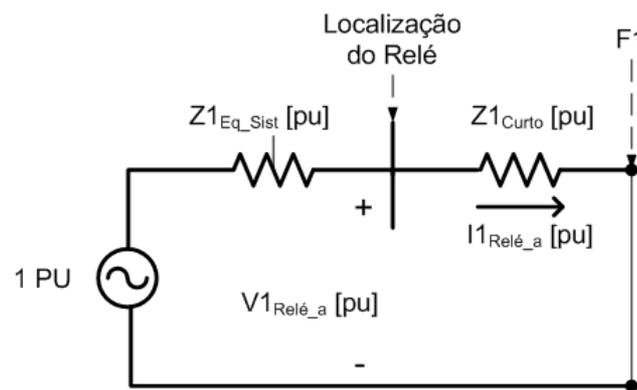
Será aplicado o método de componentes simétricas para calcular as tensões e correntes do relé, e que as redes de sequência serão utilizadas na representação dos tipos de falta em F1.

Os curtos-circuitos simétricos (trifásicos) são equilibrados bastando, portanto, considerar apenas a rede de sequência positiva. Já curtos-circuitos assimétricos (bifásicos, bi e monofásicos para terra) são desequilibrados e a rede de sequência positiva, negativa e zero devem ser utilizadas (KINDERMANN, 2003).

3.4.1.1.1 Falta Trifásica em F1

Na Figura 3.21 é apresentada a rede de sequência positiva para falta trifásica em F1.

Figura 3.21- Rede de Sequência Positiva para Falta Trifásica em F1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

em que,

$Z1_{Eq_Sist}$ é a impedância de sequência positiva do sistema equivalente, em pu.

$Z1_{Curto}$ é a impedância de sequência positiva entre o relé e o local da falta, em pu.

$V1_{Relé_a}$ é a tensão de sequência positiva da fase A no relé, em pu.

$I1_{Relé_a}$ é a corrente de sequência positiva da fase A no relé, em pu.

Em (ZIEGLER, 1999), o autor define a impedância de sequência positiva do sistema equivalente de acordo com a Equação (20).

$$Z1_{Eq_Sist} = \frac{1.1V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot I_{cc3ph}} [\Omega] \quad (20)$$

Ainda em (ZIEGLER, 1999), a impedância de sequência zero do sistema equivalente é dada pela Equação (21).

$$Z0_{Eq_Sist} = \frac{1.1V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot I_{cc1ph}} - Z1_{Eq_Sist} [\Omega] \quad (21)$$

em que,

V_{LL} é a tensão de linha do sistema.

I_{cc3ph} é a corrente de curto-circuito trifásica no barramento.

I_{cc1ph} é a corrente de curto-circuito monofásica no barramento.

Assim sendo, da Figura 3.21, tem-se as Equações (22) e (23).

$$I1_{Relé_a} = \frac{1}{Z1_{Eq_Sist} + Z1_{Curto}} [pu] \quad (22)$$

e,

$$V1_{Relé_a} = I1_{Relé_a} \cdot Z1_{Curto} [pu] \quad (23)$$

Como a falta é representada apenas pela rede de sequência positiva, as demais componentes de sequência são nulas (KINDERMANN, 2003). Logo,

$$I0_{Relé_a} = I2_{Relé_a} = 0$$

e

$$V0_{Relé_a} = V2_{Relé_a} = 0$$

Assim, a matriz de correntes de fases do relé é dada pela Equação (24).

$$I_{Relé}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I1_{Relé_a} \\ 0 \end{bmatrix} [pu] \quad (24)$$

A matriz de tensões de fases do relé é dada pela Equação (25).

$$V_{Relé}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ V1_{Relé_a} \\ 0 \end{bmatrix} [pu] \quad (25)$$

E a corrente de neutro no relé é dada pela Equação (26).

$$I_{Relé}^N = -(I_{Relé}^a + I_{Relé}^b + I_{Relé}^c) [pu] \quad (26)$$

A Matriz de Transformação T é definida através do operador rotacional \hat{a} , sendo

$$\hat{a} = \mathbf{1} |_{\underline{120^\circ}} \text{ (Operador Rotacional na forma polar)}$$

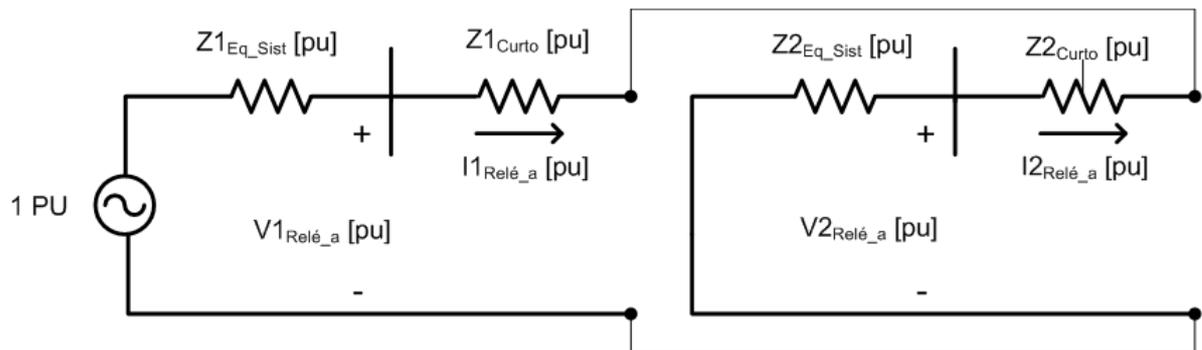
$$\hat{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ (Operador Rotacional na forma retangular)}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \text{ (Matriz de Transformação)}$$

3.4.1.1.2 Falta Bifásica em F1

Na Figura 3.22 são apresentadas as redes de sequência positiva e negativa para uma falta bifásica em F1.

Figura 3.22- Redes de Sequência Positiva e Negativa para uma Falta Bifásica em F1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da Figura 3.23 obtém-se as Equações (27), (28) e (29).

$$I1_{Relê_a} = \frac{1}{Z1_{Eq_Sist} + Z2_{Eq_Sist} + Z1_{Curto} + Z2_{Curto}} [pu] \quad (27)$$

$$V1_{Relê_a} = 1 - (I1_{Relê_a} \cdot Z1_{Eq_Sist}) [pu] \quad (28)$$

$$V2_{Relê_a} = I1_{Relê_a} \cdot Z2_{Eq_Sist} [pu] \quad (29)$$

No curto-circuito bifásico, a corrente de sequência negativa é igual a corrente de sequência positiva defasada de 180° , e a corrente e a tensão de sequência zero são nulas (KINDERMANN, 2003). Assim,

$$I0_{Relê_a} = 0$$

$$V0_{Relê_a} = 0$$

e

$$I2_{Relê_a} = -I1_{Relê_a}$$

Assim, a matriz de correntes de fases do relé é dada pela Equação (30).

$$I_{Relê}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I1_{Relê_a} \\ I2_{Relê_a} \end{bmatrix} [pu] \quad (30)$$

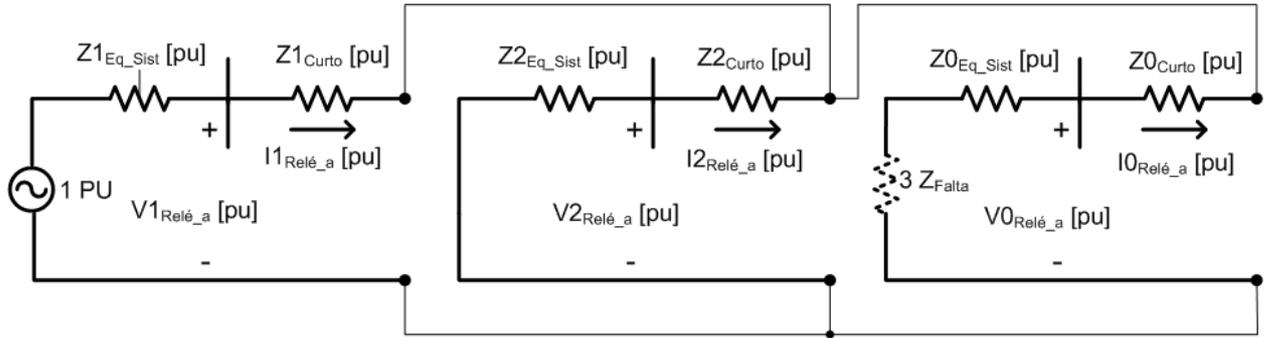
A matriz de tensões de fases do relé é dada pela Equação (31).

$$V_{Relê}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ V1_{Relê_a} \\ V2_{Relê_a} \end{bmatrix} [pu] \quad (31)$$

3.4.1.1.3 Falta Bifásica – Terra em F1

Na Figura 3.23 são apresentadas as redes de sequência positiva, negativa e zero para uma falta bifásica – terra em F1.

Figura 3.23- Redes de Sequência Positiva, Negativa e Zero para uma Falta Bifásica – Terra em F1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da Figura 3.23, tem-se que para $3Z_{Falta} \ll Z_{Curto}$:

$$I1_{Relé_a} = \frac{1}{(Z1_{Eq_Sist} + Z1_{Curto}) + \frac{(Z2_{Eq_Sist} + Z2_{Curto}) \cdot (Z0_{Eq_Sist} + Z0_{Curto})}{Z0_{Eq_Sist} + Z2_{Eq_Sist} + Z0_{Curto} + Z2_{Curto}}} [pu] \quad (32)$$

$$I2_{Relé_a} = \frac{I1_{Relé_a} \cdot (Z0_{Eq_Sist} + Z0_{Curto}) - 1}{Z2_{Eq_Sist} + Z2_{Curto}} [pu] \quad (33)$$

$$I0_{Relé_a} = -(I1_{Relé_a} + I2_{Relé_a}) [pu] \quad (34)$$

e,

$$V0_{Relé_a} = -I0_{Relé_a} \cdot Z0_{Eq_Sist} [pu] \quad (35)$$

$$V1_{Relé_a} = 1 - (I1_{Relé_a} \cdot Z1_{Eq_Sist}) [pu] \quad (36)$$

$$V2_{Relé_a} = -I2_{Relé_a} \cdot Z2_{Eq_Sist} [pu] \quad (37)$$

Assim, a matriz de correntes de fases do relé é dada pela Equação (38).

$$I_{Relé}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} I0_{Relé_a} \\ I1_{Relé_a} \\ I2_{Relé_a} \end{bmatrix} [pu] \quad (38)$$

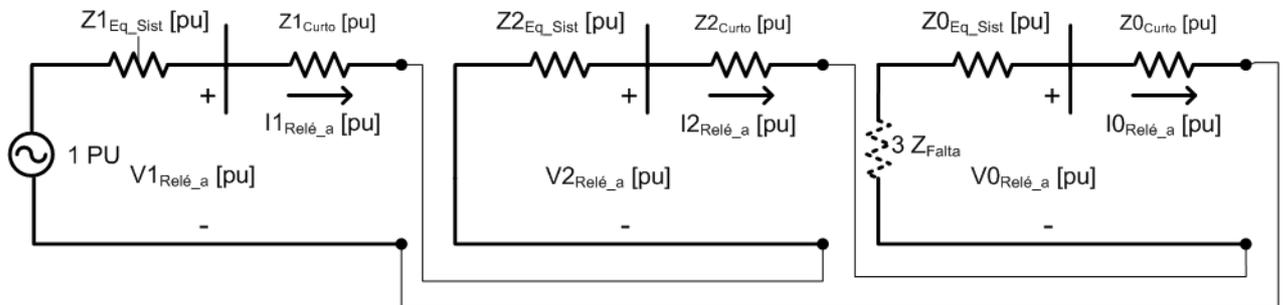
A matriz de tensões de fases do relé é dada pela Equação (39).

$$V_{Relé}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} V0_{Relé_a} \\ V1_{Relé_a} \\ V2_{Relé_a} \end{bmatrix} [pu] \quad (39)$$

3.4.1.1.4 Falta Monofásica – Terra em F1

Na Figura 3.24 são apresentadas as redes de sequência positiva, negativa e zero para uma falta monofásica – terra em F1.

Figura 3.24- Redes de Sequência Positiva, Negativa e Zero para uma Falta Monofásica – Terra em F1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da Figura 3.24, tem-se que para $3Z_{Falta} \ll Z_{Curto}$:

$$I1_{Relé_a} = \frac{1}{Z0_{Eq_Sist} + Z1_{Eq_Sist} + Z2_{Eq_Sist} + Z0_{Curto} + Z1_{Curto} + Z2_{Curto}} [pu] \quad (40)$$

e,

$$V0_{Relé_a} = -I1_{Relé_a} \cdot Z0_{Eq_Sist} [pu] \quad (41)$$

$$V1_{Relé_a} = 1 - (I1_{Relé_a} \cdot Z1_{Eq_Sist}) [pu] \quad (42)$$

$$V2_{Relé_a} = -I1_{Relé_a} \cdot Z2_{Eq_Sist} [pu] \quad (43)$$

Assim, a matriz de correntes de fases do relé é dada pela Equação (44).

$$I_{Relé}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} I1_{Relé_a} \\ I1_{Relé_a} \\ I1_{Relé_a} \end{bmatrix} [pu] \quad (44)$$

A matriz de tensões de fases do relé é dada pela Equação (45).

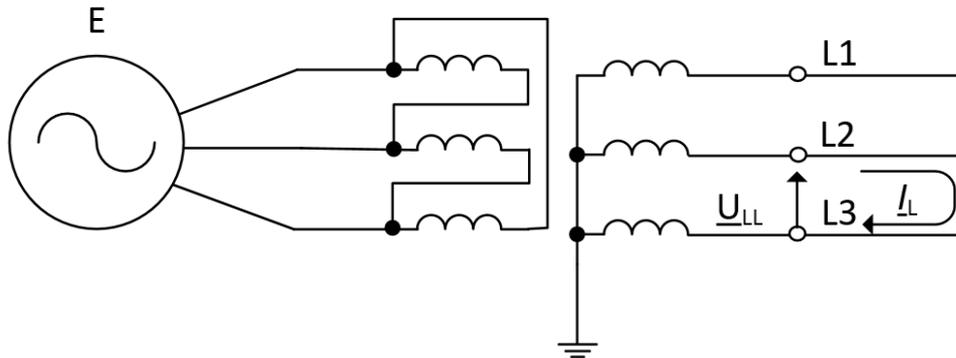
$$V_{Relé}^{abc} = T \cdot \begin{bmatrix} V0_{Relé_a} \\ V1_{Relé_a} \\ V2_{Relé_a} \end{bmatrix} [pu] \quad (45)$$

3.4.1.2 Cálculo da Impedância Vista pelo Relé para a Falta F1

Em (ZIEGLER, 1999), o autor apresenta as bases teóricas utilizadas nos relés de distância digitais para calcular a impedância da falta, isto é, as equações apresentadas pelo autor são aplicáveis quando as tensões e correntes presentes nas entradas do relé são conhecidas.

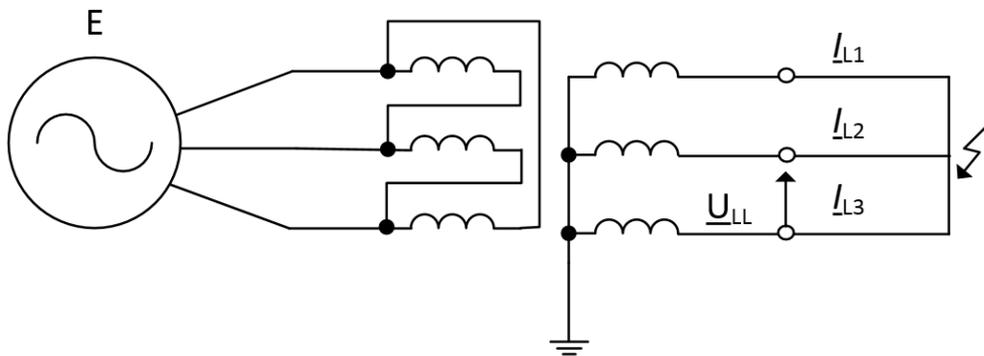
3.4.1.2.1 Falhas (Fase – Fase) em F1

Figura 3.25- Curto-circuito Bifásico.



Fonte: (ZIEGLER, 1999).

Figura 3.26- Curto-circuito Trifásico.



Fonte: (ZIEGLER, 1999)

Considerando os circuitos apresentados nas Figura 3.25 e Figura 3.26, segundo Ziegler, a impedância de falta vista pelo relé de proteção de distância para faltas (fase – fase) é dada pelas Equações (46) e (47).

$$R_{L2-L3} = \frac{U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \cos(\Delta1) + U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\Delta2) - U_{L2} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\Delta3) - U_{L3} \cdot I_{L2} \cdot \cos(\Delta4)}{I_{L2}^2 - 2 \cdot I_{L2} \cdot I_{L3} \cos(\Delta5) + I_{L3}^2} \quad (46)$$

$$X_{L2-L3} = \frac{U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \sin(\Delta1) + U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \sin(\Delta2) - U_{L2} \cdot I_{L3} \cdot \sin(\Delta3) - U_{L3} \cdot I_{L2} \cdot \sin(\Delta4)}{I_{L2}^2 - 2 \cdot I_{L2} \cdot I_{L3} \cos(\Delta5) + I_{L3}^2} \quad (47)$$

em que,

$$\Delta_1 = \varphi_{U2} - \varphi_{I2}, \text{ em graus.}$$

$$\Delta_2 = \varphi_{U3} - \varphi_{I3}, \text{ em graus.}$$

$$\Delta_3 = \varphi_{U2} - \varphi_{I3}, \text{ em graus.}$$

$$\Delta_4 = \varphi_{U3} - \varphi_{I2}, \text{ em graus.}$$

$\Delta_5 = \varphi_{I2} - \varphi_{I3}$, em graus.

U_{L2} e U_{L3} , são os módulos das tensões das fases L2 e L3, respectivamente.

I_{L2} e I_{L3} , são os módulos das correntes das fases L2 e L3, respectivamente.

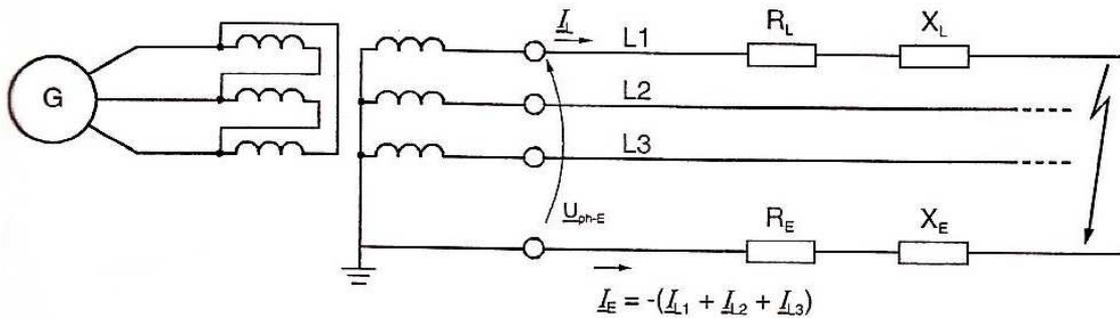
φ_{U2} e φ_{U3} , são os ângulos das tensões das fases L2 e L3, respectivamente, em graus.

φ_{I2} e φ_{I3} , são os ângulos das correntes das fases L2 e L3, respectivamente, em graus.

3.4.1.2.2 Faltas (Fase – Terra) em F1

As fórmulas apresentadas são aplicáveis a todos os tipos de falta à terra (ZIEGLER, 1999).

Figura 3.27- Curto-circuito Monofásico.



Fonte: (ZIEGLER, 1999).

Considerando os elementos apresentados na Figura 3.27, tem-se que a impedância de falta vista pelo relé é dada por:

$$R_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E}}{I_L} \cdot \frac{\cos(\varphi_U - \varphi_L) - \frac{I_E}{I_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E}{X_L} + \frac{R_E}{R_L}\right) \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_L) + \frac{R_E}{R_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \left(\frac{I_L}{I_L}\right)^2} \quad (48)$$

$$X_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E}}{I_L} \cdot \frac{\sin(\varphi_U - \varphi_L) - \frac{I_E}{I_L} \cdot \frac{R_E}{R_L} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E}{X_L} + \frac{R_E}{R_L}\right) \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_L) + \frac{R_E}{R_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \left(\frac{I_L}{I_L}\right)^2} \quad (49)$$

em que,

U_{Ph-E} , é a tensão de fase de curto-circuito.

I_L , é a corrente de fase do curto-circuito.

I_E , é a corrente para terra do curto-circuito.

φ_U , é o ângulo da tensão de fase do curto-circuito, em graus.

φ_L , é o ângulo da corrente de fase do curto-circuito, em graus.

φ_E , é o ângulo da corrente para terra do curto-circuito, em graus.

$\frac{R_E}{R_L} e \frac{X_E}{X_L}$, são os parâmetros de ajuste no relé para compensação residual.

$\frac{R_E}{R_L} = \frac{(R_0 - R_1)}{3.R_1}$, onde R_1 e R_0 são as resistências de sequência positiva e zero respectivamente, em $[\Omega/\text{km}]$.

$\frac{X_E}{X_L} = \frac{(X_0 - X_1)}{3.X_1}$, onde X_1 e X_0 são as reatâncias de sequência positiva e zero respectivamente, em $[\Omega/\text{km}]$.

Uma simulação com os modelos e equações apresentados neste tópico está disponível em (PAIVA, 2013).

3.4.2 Proteção de Sobrecorrente da Linha de Transmissão

A proteção de sobrecorrente da linha de transmissão da Rede Básica fica predisposta e será habilitada caso a proteção principal, relé de distância, estiver desabilitada ou inoperante. Nesta situação, a proteção de sobrecorrente é considerada uma proteção de emergência da linha e sua temporização deve ser igual ou maior que a temporização de 4ª Zona da proteção de distância, para que não prejudique a coordenação das demais proteções da linha (CHESF, 2012).

Neste trabalho são utilizados os critérios de ajuste baseados na carga máxima da linha.

3.4.2.1 Conceitos para o Ajuste da Proteção de Sobrecorrente Temporizada (51)

Em Silva(2011), o autor cita alguns conceitos importantes para o ajuste da proteção de sobrecorrente. São eles:

a) Corrente de *pick-up* ($I_{pick-up}$):

Definida como sendo a menor corrente de operação ajustada no relé que proporciona o fechamento dos seus contatos e a abertura do disjuntor.

b) TAP ou Faixas de Ajuste:

Trata-se das derivações da bobina do relé que permitem o ajuste para diversas correntes de atuação.

c) Curvas Características:

Definem o tempo de atuação do relé, e podem ser de dois tipos:

- De tempo definido:

Uma vez ajustado o tempo de atuação, o relé irá operar para qualquer valor de corrente igual ou maior que o mínimo ajustado.

- De tempo dependente:

O tempo de atuação do relé é inversamente proporcional ao valor da corrente. Ou seja, o relé irá atuar em tempos decrescentes para valores de corrente igual ou maior à corrente mínima de atuação.

As curvas de tempo dependente podem ser classificadas como: Normalmente Inversa (NI), Muito Inversa (MI) e Extremamente Inversa (EI).

O tempo de operação de um relé é definido por Silva(2011) pela equação (50).

$$t = \frac{k \times \beta}{\left(\frac{I_{CC}}{I_{pick-up}}\right)^\alpha - 1} \quad (50)$$

Sendo que,

t , é o tempo de operação do relé;

k , é o Dial ou tempo multiplicador;

I_{CC} , é a Corrente de curto-circuito;

$I_{pick-up}$, é a Corrente de atuação do relé;

α e β , são constantes definidas pelo tipo de curva utilizada pelo relé, e que definem a inclinação da curva característica do relé.

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores de α e β , conforme a curva utilizada.

Tabela 3.3 - Valores de α e β

| Tipo de Curva | α | β |
|----------------------|----------|---------|
| Inversa | 0,02 | 0,14 |
| Muito Inversa | 1,00 | 13,50 |
| Extremamente Inversa | 2,00 | 80 |

Fonte: (SILVA, 2011).

- d) Dial de tempo ou Multiplicador de tempo:

Define o tempo exato de operação do relé.

- e) Múltiplo:

É definido como sendo a relação entre a corrente de curto-circuito (I_{CC}) e a corrente de *pick-up* ($I_{pick-up}$). O múltiplo indica o quanto a corrente I_{CC} é maior que a corrente $I_{pick-up}$.

$$M = \frac{I_{CC}}{I_{pick-up}} = \frac{I_{CC}}{RTC \times TAP} \quad (51)$$

em que,

M , é o Múltiplo do relé;

TAP , é a corrente ajustada para o relé;

RTC , é a Relação de Transformação do TC;

I_{CC} , é a Corrente de curto-circuito;

$I_{pick-up}$, é a Corrente de atuação do relé.

3.4.2.2 Critérios para o Cálculo do Ajuste da Proteção de Sobrecorrente Temporizada (51)

Ainda em Silva(2011), os critérios para o cálculo do ajuste da função 51 são:

$$TAP_{51} = \frac{1,5 \times I_{nom \text{ da LT}}}{RTC} \quad (52)$$

$$M = \frac{I_{CC3\phi \text{ na barra}}}{I_{pick-up}} \quad (53)$$

O autor define ainda que o tempo de operação é igual a 0,15 segundos. Contudo, para este caso a temporização deve ser igual ou maior que o tempo ajustado para a atuação da última Zona da proteção de distância(CHESF, 2012).

3.4.2.3 Conceitos para o Ajuste da Proteção de Sobrecorrente Instantânea (50)

Além dos conceitos já definidos na Proteção de Sobrecorrente Temporizada, tem-se para a unidade instantânea adicionalmente o conceito de Fator de Assimetria (K_{FA}).

O Fator de Assimetria deve ser considerado por conta da influência da componente contínua na corrente de curto-circuito que provoca elevação da mesma, tendo seu máximo a um quarto do ciclo após a ocorrência da falta.

Segundo (SILVA, 2014), uma das formas de obter o valor de K_{FA} é calculando a tangente do ângulo da corrente de falta, que representa a relação X/R, aplicando o

valor encontrado em uma curva específica. Todavia, para linhas radiais, como é o caso das linhas representadas no simulador deste trabalho, o autor sugere as equações (54) e (55), a seguir:

$$K_{FA}(fase) = \frac{X}{R} (f_{\text{fase}}) = \frac{X_1}{R_1} \quad (54)$$

$$K_{FA}(neutro) = \frac{X}{R} (n_{\text{neutro}}) = \frac{2X_1 + X_0}{2R_1 + R_0} \quad (55)$$

em que,

X_1 , Reatância de Sequencia Positiva da Linha;

R_1 , Resistencia de Sequencia Positiva da Linha.

3.4.2.4 Critérios para o Cálculo do Ajuste da Proteção de Sobrecorrente Instantânea (50)

Segundo Silva(SILVA, 2014), a proteção instantânea deve ser sensibilizada em 120% da corrente de curto-circuito assimétrica. Silva ressalta ainda que para os relés digitais, que filtram a componente continua de corrente, o K_{FA} não precisa ser aplicado.

$$TAP_{50} = \frac{1,2 \times K_{FA} \times I_{CC3\phi} \text{ na barra}}{RTC} \quad (56)$$

3.4.2.5 Critérios para o Cálculo do Ajuste da Proteção de Sobrecorrente Temporizada Neutro (51N)

Ainda segundo (SILVA, 2014), considerando como ajuste mínimo 20% de desequilíbrio da carga máxima, bem como utilizando o ajuste da unidade temporizada de fase (TAP_{51}), os critérios para o cálculo do ajuste da função 51N são:

$$TAP_{51N} = 0,2 \times TAP_{51} \quad (57)$$

3.4.2.6 Critérios para o Cálculo do Ajuste da Proteção Sobrecorrente Instantânea Neutro (50N)

Por fim, os critérios para o cálculo do ajuste da função 50N são similares aos utilizados na unidade instantânea de fase, contudo utiliza-se o curto-circuito Monofásico para o cálculo do ajuste, conforme equação (58) a seguir:

$$TAP_{50N} = \frac{1,2 \times K_{FA} \times I_{CC1\phi \text{ na barra}}}{RTC} \quad (58)$$

3.5 Considerações Finais

Neste Capítulo foram apresentadas bases teóricas necessárias à elaboração dos diagramas unifilares e definição das características exigidas para os equipamentos, possibilitando a obtenção das impedâncias necessárias ao cálculo dos níveis de curto-circuito nas barras da subestação. Além disto, foi apresentado o equacionamento para obter as tensões e correntes de falta vistas pelo relé, as quais serão utilizadas pela ferramenta para simular a atuação de proteções como a Proteção de Distância (21) e de Sobrecorrente (50, 51, 50N e 51N), também apresentadas neste capítulo.

CAPÍTULO 4

4 DESENVOLVIMENTO DO LABORATÓRIO VIRTUAL DE PROTEÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO DA REDE BÁSICA

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são abordados alguns aspectos do desenvolvimento do Laboratório Virtual, tais como a análise dos requisitos, a definição das classes utilizadas e as funcionalidades implementadas. Para apresentar estes aspectos são utilizados alguns conceitos e diagramas da Linguagem de Modelagem Unificada (UML).

4.2 Análise dos Requisitos

Com base nos objetivos propostos neste trabalho, o Laboratório Virtual deve apresentar funcionalidades que permitam ao usuário explorar conceitos sobre o Sistema Elétrico de Potência e suas proteções. Desta forma, a ferramenta deve permitir ao usuário interagir com os elementos da subestação de maneira que ele possa alterar parâmetros do sistema e simular faltas.

Assim sendo, as seguintes funcionalidades foram definidas:

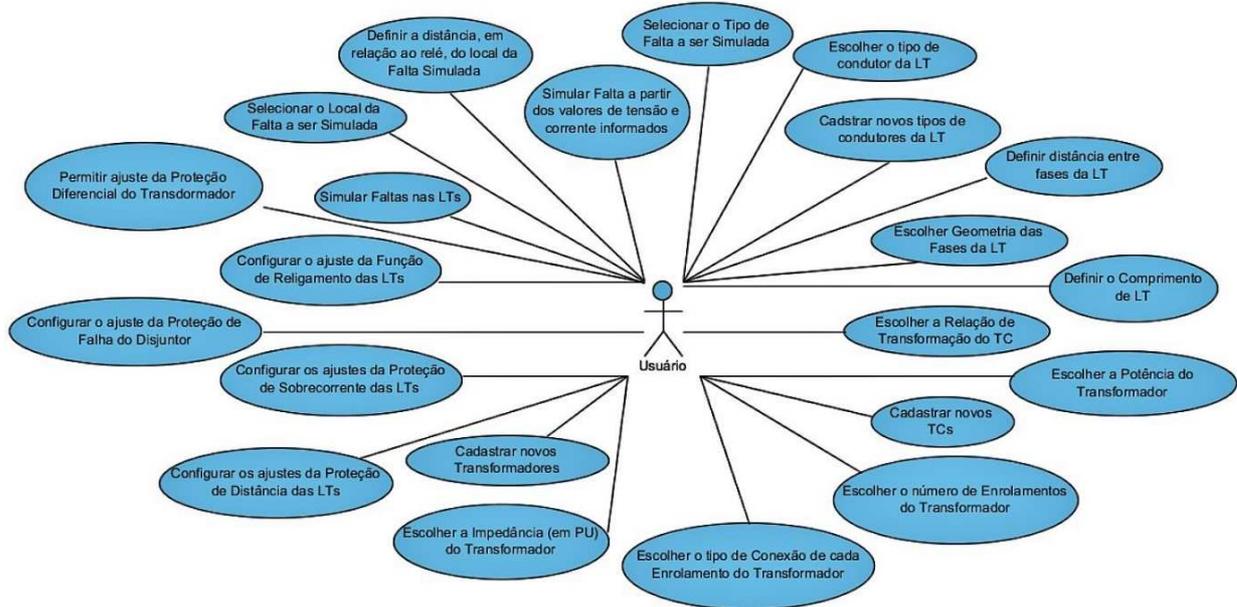
- Configurar características das Linhas de Transmissão da Subestação;
 - Permitir a escolha do tipo de condutor da LT;
 - Permitir o cadastro de novos tipos de condutores;
 - Permitir a escolha das distâncias entre as fases da LT;
 - Permitir a escolha da geometria da fase da LT;
 - Permitir a escolha do comprimento da LT;
- Configurar características dos Transformadores de Corrente (TCs);
 - Permitir a escolha da Relação de Transformação (RTC) do TC selecionado;
 - Permitir o cadastro de novos tipos/modelos de TCs;
- Configurar características do Transformador;
 - Permitir a escolha da Potência do Transformador;

- Permitir a escolha do número de enrolamentos do Transformador;
- Permitir a escolha do tipo de conexão de cada enrolamento do Transformador;
- Permitir a escolha da impedância (em PU) do Transformador;
- Permitir o cadastro de novos modelos de Transformador;
- Configurar características de proteções da LT;
 - Permitir o ajuste da Proteção de Distância (21);
 - Permitir o ajuste da Proteção de Sobrecorrente (50/51);
 - Permitir o ajuste da Proteção de Falha do Disjuntor (50BF);
 - Permitir o ajuste da Função de Religamento (79);
- Configurar características de proteções do Transformador;
 - Permitir o ajuste da Proteção Diferencial (87);
- Configurar características das faltas e como estas serão simuladas;
 - Permitir a seleção do local da Falta;
 - Permitir a seleção do Tipo de Falta simulada;
 - No caso das LT, a distância em relação ao relé em que a falta ocorreu;
 - Permitir que o usuário informe os valores de tensão e corrente vistos pelo relé para a simulação da falta;
 - Simular a falta do disjuntor e atuação do esquema de Falha.

Para ajudar na identificação dos atores do sistema (usuários, outros sistemas ou hardwares especiais, por exemplo), um Diagrama de Casos de Uso preliminar foi elaborado a partir das funcionalidades definidas. Na Figura 4.1 é apresentado este Diagrama de Casos de Uso.

Após analisar o Diagrama da Figura 4.1, ficou evidente a necessidade de definir melhor os atores do sistema e de organizar as funcionalidades e os demais elementos do sistema em grupos de afinidades que permitissem uma melhor organização e compreensão do sistema. Então, um segundo Diagrama de Casos de Uso foi elaborado. Este segundo diagrama, mais evoluído, é apresentado na Figura 4.2 e organiza o sistema em quatro grandes grupos: Interfaces, Objetos ou Elementos do Sistema, Figuras e Utilitários.

Figura 4.1- Diagrama de Casos de Uso Preliminar



Fonte: Elaborado pelo autor.

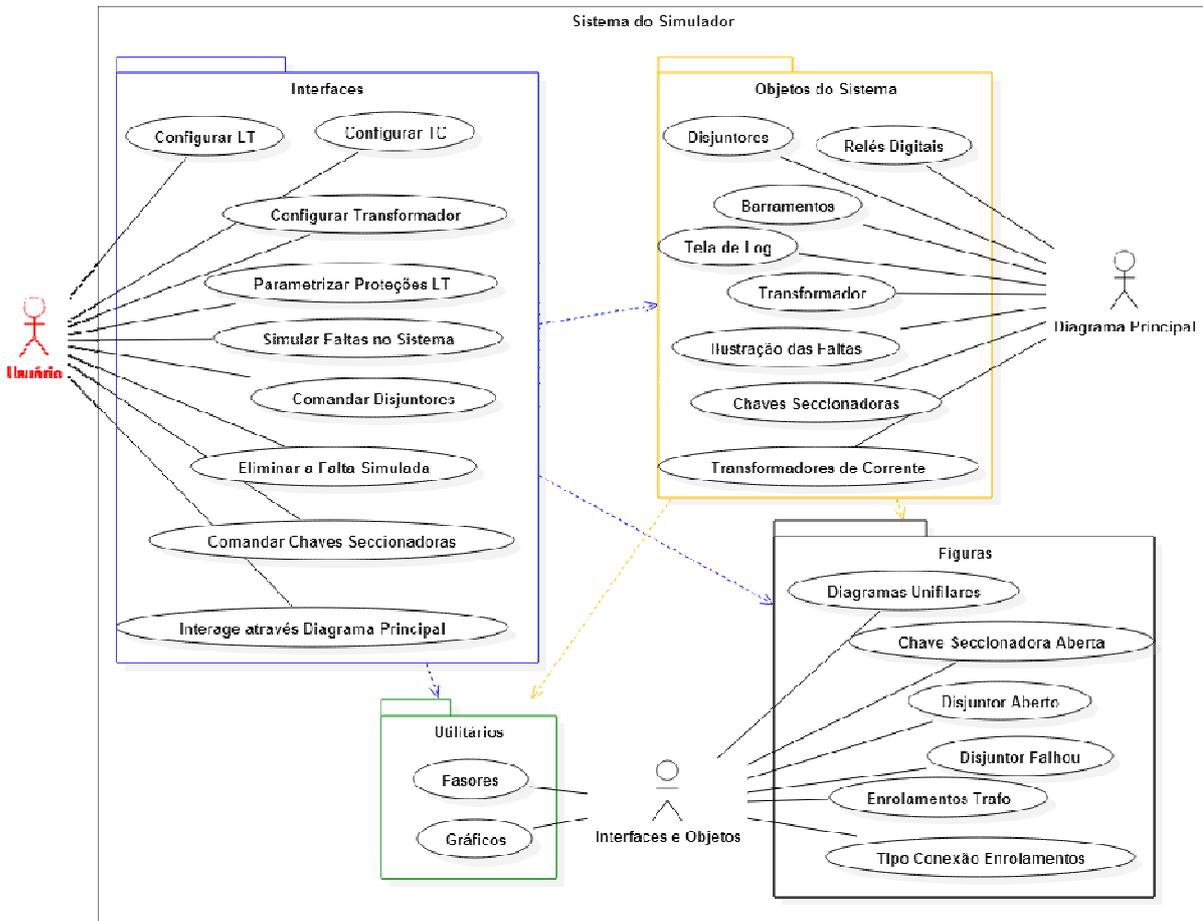
O grupo Interfaces, como a designação sugere, é composto pelos elementos ou funcionalidades que são implementados por meio de interfaces gráficas do Java para que o usuário possa interagir com o sistema.

No grupo Objetos/Elementos do Sistema estão os elementos e/ou funcionalidades que compõem o diagrama unifilar da subestação apresentado na tela principal do sistema. Os elementos deste grupo, em sua maioria, representam os elementos reais do sistema elétrico que compõem uma subestação.

No grupo Figuras estão as imagens que são utilizadas pelo sistema para compor a representação gráfica dos elementos da subestação, bem como de boa parte das interfaces gráficas.

E por fim, no grupo Utilitários estão os elementos que são úteis na implementação das funcionalidades que o sistema deve possuir.

Figura 4.2 - Evolução do Diagrama de Casos de Uso



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Implementação do Código

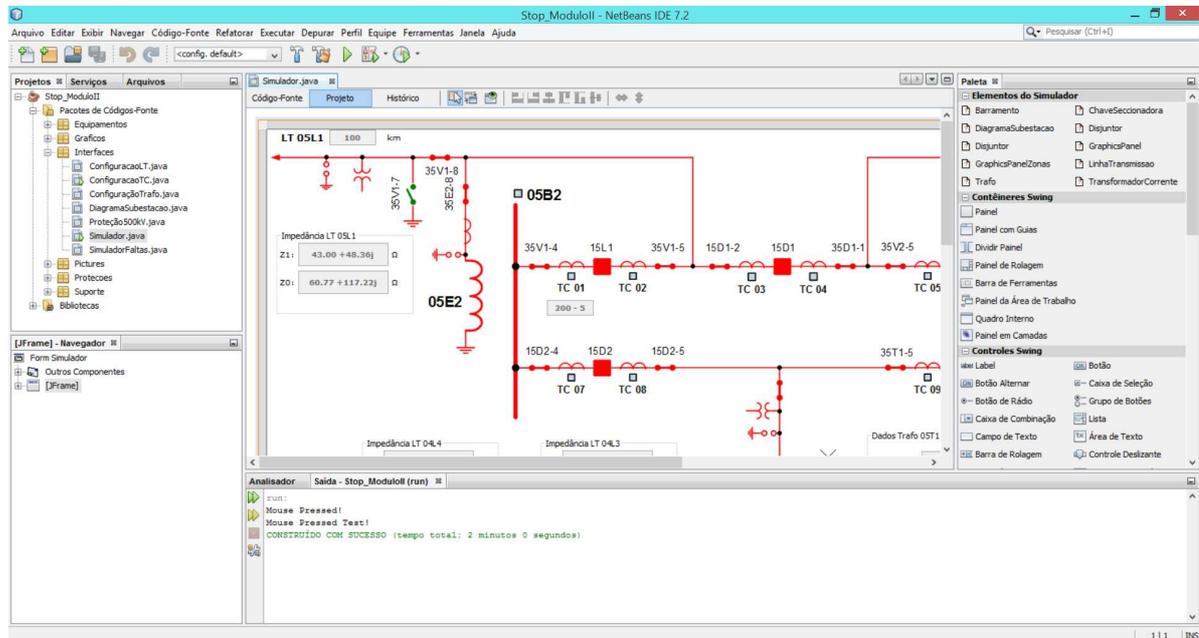
Para desenvolver um programa em Java é necessário apenas um editor de texto e um compilador Java (`javac.exe`) para converter o programa em um arquivo (*bytecode*) que será executado pela Máquina Virtual Java. Contudo, o uso de uma IDE (*IntegratedDevelopmentEnvironment*), ou seja, de um Ambiente Integrado de Desenvolvimento para o Java é de grande ajuda, uma vez que as IDEs auxiliam na organização do código, facilitando tanto a escrita (desenvolvimento) quanto a busca de erros no programa (*debug*). Além disso, algumas IDEs possuem recursos de pré-visualização de interfaces e geram boa parte desse código automaticamente, representando um ganho significativo no tempo de programação.

Existem atualmente diversas IDEs, dentre as quais se destacam: *Eclipse*, *NetBeans*, *JCreator*, *BlueJ*, *JBuilder*, entre outras. Todavia, as mais completas, em

termos de recursos, e populares entre os programadores são o *Eclipse* e o *NetBeans*. Neste trabalho foi utilizado o *NetBeans 7.2*.

Na Figura 4.3 é apresentada uma das telas do programa sendo desenvolvido no *NetBeans*.

Figura 4.3 - NetBeans sendo utilizado no desenvolvimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Pacotes e Classes do Sistema

O desenvolvimento dos pacotes e classes do sistema teve início com base na análise de requisitos do sistema e nos diagramas de casos de uso apresentados nas Figura 4.1 e Figura 4.2. O sistema, denominado *Stop_ModuloII*, é composto por 21 classes agrupadas em 6 pacotes.

Na Tabela 4.1 são apresentados os pacotes e uma breve descrição dos mesmos.

Tabela 4.1 - Tabela de Pacotes do Sistema

| Pacote | Descrição |
|---------------------|--|
| Equipamentos | Reúne as classes que reproduzem o comportamento dos equipamentos existentes na subestação. Exemplo: Disjuntor, Chave Seccionadora. |
| Graficos | Reúne as classes que implementam painéis para representação de fasores no plano cartesiano, bem como ilustrações de faltas em determinados locais da subestação. |
| Interfaces | Reúne as classes que implementam as janelas de interfaces que serão |

| | |
|------------------|--|
| | utilizadas para interação com o usuário. |
| Pictures | Reúne as imagens utilizadas no sistema. |
| Protecoes | Reúne as classes que reproduzem o comportamento das funções de proteção implementadas nos relés. |
| Suporte | Reúne as classes que desempenham funções |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As classes do sistema foram criadas buscando representar de forma mais próxima do real possível os elementos existentes no Sistema Elétrico de Potência, mais especificamente em uma Subestação de Transmissão da Rede Básica. Além dos elementos físicos, tais como disjuntores, chaves seccionadoras, relés e transformadores, outras classes que representassem os elementos lógicos ou abstratos, como a representação visual de uma falta ou os fasores de tensão, corrente e impedâncias do sistema, também foram implementadas.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as Classes do Sistema e suas principais características.

Tabela 4.2 - Classes do Sistema e suas principais características

| Classe | Pacote | Características Principais |
|--------------------------|--------------|---|
| Barramento | Equipamentos | Código operacional, nível de tensão e nível de curto circuito Monofásico e Trifásico. |
| ChaveSeccionadora | Equipamentos | Código operacional, nível de tensão, representação gráfica de estado (aberta/fechada) e condições de Intertravamento. |
| ConfiguracaoLT | Interfaces | Janela de Interface que permite ao usuário configurar a Linha de Transmissão definindo parâmetros como: Tipo de condutor, cadastro de novos tipos de condutores, comprimento da Linha, distância entre as fases, geometria das fases e coeficiente de resistência do solo. |
| ConfiguracaoTC | Interfaces | Janela de Interface que permite ao usuário configurar Transformador de Corrente (TC) definindo parâmetros como: Modelo de TC (Fabricante), cadastro de novos modelos e a Relação de Transformação do TC (RTC). |
| ConfiguracaoTrafo | Interfaces | Janela de Interface que permite ao usuário configurar o Transformador definindo parâmetros como: Modelo de Transformador (Fabricante), cadastro de novos modelos, potência, número de enrolamentos, tipo de conexão dos enrolamentos primário, secundário e terciário e a impedância (em pu). |

| | | |
|-------------------------------|--------------|---|
| ConfiguracaoProtecaoLT | Interfaces | Janela de Interface que permite ao usuário configurar as proteções da Linha de Transmissão definindo os ajustes e habilitando ou não as proteções disponíveis. |
| DiagramaSubestação | Interfaces | Representação gráfica do diagrama unifilar da subestação onde é possível interagir com os elementos, acessar menus e observar os resultados das simulações realizadas. |
| Disjuntor | Equipamentos | Código operacional, nível de tensão, representação gráfica de estado (aberta/fechada/falha), condições de Intertravamento, condições de bloqueio e esquema de falha. |
| Fasor | Suporte | Processa operações matemáticas entre objetos do tipo Fasor e pode converter o fasor para PU ou exibir o Fasor em formato de texto (String) tanto na forma polar quanto na forma retangular. |
| FuncaoProtecao | Protecao | Classe genérica da qual derivam proteções mais específicas como a Proteção de Distância (21) e a Proteção de Sobrecorrente (50/51). |
| GraphicsPanel | Graficos | Representa graficamente um ou mais fasores. |
| GraphicsPanelZonas | Graficos | Representa graficamente as Zonas da Proteção de Distância (21). |
| ImagemCurtoCircuito | Graficos | Representa graficamente a ocorrência de uma falta em um determinado local do sistema. |
| LinhaTransmissao | Equipamentos | Código operacional, nível de tensão, tipo de condutor, comprimento, distância entre as fases, geometria das fases e coeficiente de resistência do solo. |
| Protecao21 | Protecoes | Impedância da linha, ajuste das zonas de proteção, disparo da proteção (<i>trip</i>). |
| Protecao5051 | Protecoes | Definição do TAP, Fator de sobrecarga, corrente de carga máxima, RTC, corrente de <i>pickup</i> , Múltiplo e tempo de atuação (51 e 51N). |
| ReleDigital | Equipamentos | Composto pelas proteções, verifica se as mesmas atuam e se for o caso enviam as mensagens de <i>trip</i> para os equipamentos relacionados à proteção atuada. |
| Simulador | Interfaces | Classe principal (<i>Main</i>) onde o programa é iniciado. Janela de Interface que permite acesso do usuário aos recursos do Simulador |
| SimuladorFaltas | Interfaces | Janela de Interface que permite ao usuário configurar o tipo e local das faltas que serão simuladas. |
| Trafo | Equipamentos | Código operacional, nível de tensão do primário, nível |

| | | |
|------------------------------|--------------|---|
| | | de tensão do secundário, nível de tensão do terciário, quantidade de enrolamentos, tipo de conexão dos enrolamentos, impedância e representação gráfica dos enrolamentos. |
| TransformadorCorrente | Equipamentos | Código operacional, nível de tensão, relação de transformação do TC (RTC). |

Fonte: Elaborado pelo autor.

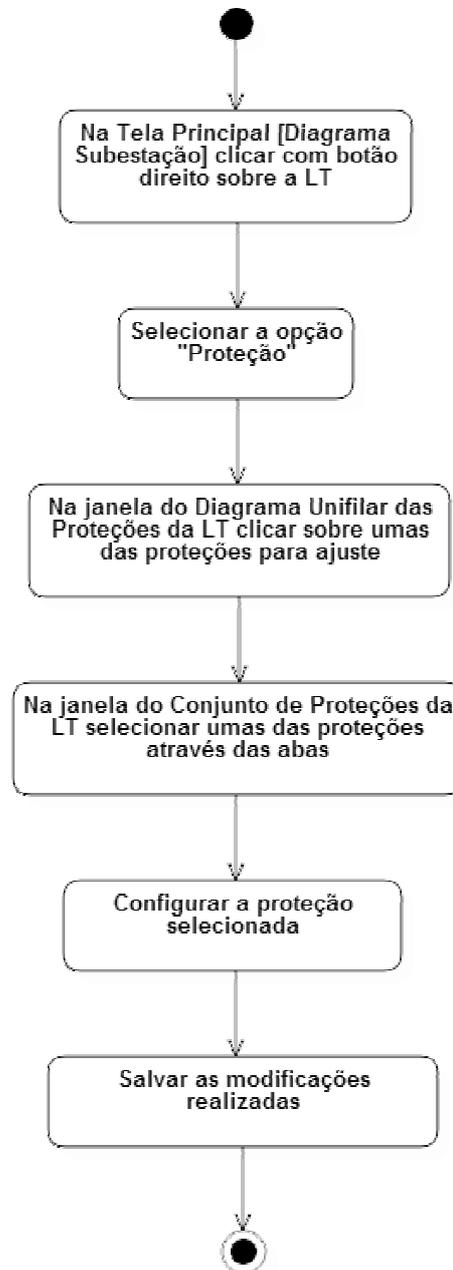
Na Figura 4.4 é apresentado o detalhe do Diagrama de Classes da Ferramenta. Este diagrama foi elaborado para ilustrar a inter-relação entre as classes do sistema, ou seja, quais classes se comunicam, que tipo de classe são, relações de dependência, entre outras.

Além dos diagramas apresentados até o momento, outros diagramas, como os Diagramas de Atividades e de Sequência, também foram elaborados a fim de ilustrar as etapas de desenvolvimento da ferramenta.

Na Figura 4.5 e na Figura 4.6 são apresentados, respectivamente, o detalhe do Diagrama de Sequência e o Diagramas de Atividade elaborados durante o processo de desenvolvimento. Os diagramas completos das Figura 4.4 e Figura 4.5 estão disponíveis no APÊNDICE – Diagramas .

Figura 4.6 - Diagrama de Atividade: Configuração dos Parâmetros de Proteção da LT.

Configurando Parâmetros de Proteção da Linha de Transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os demais detalhes sobre as classes do sistema podem ser verificados por meio dos arquivos de documentação (pasta *Javadoc*) gerados pelo NetBeans e que são fornecidos juntamente com o simulador. Neles estão descritos de forma mais detalhada a composição das classes, suas variáveis e os métodos implementados.

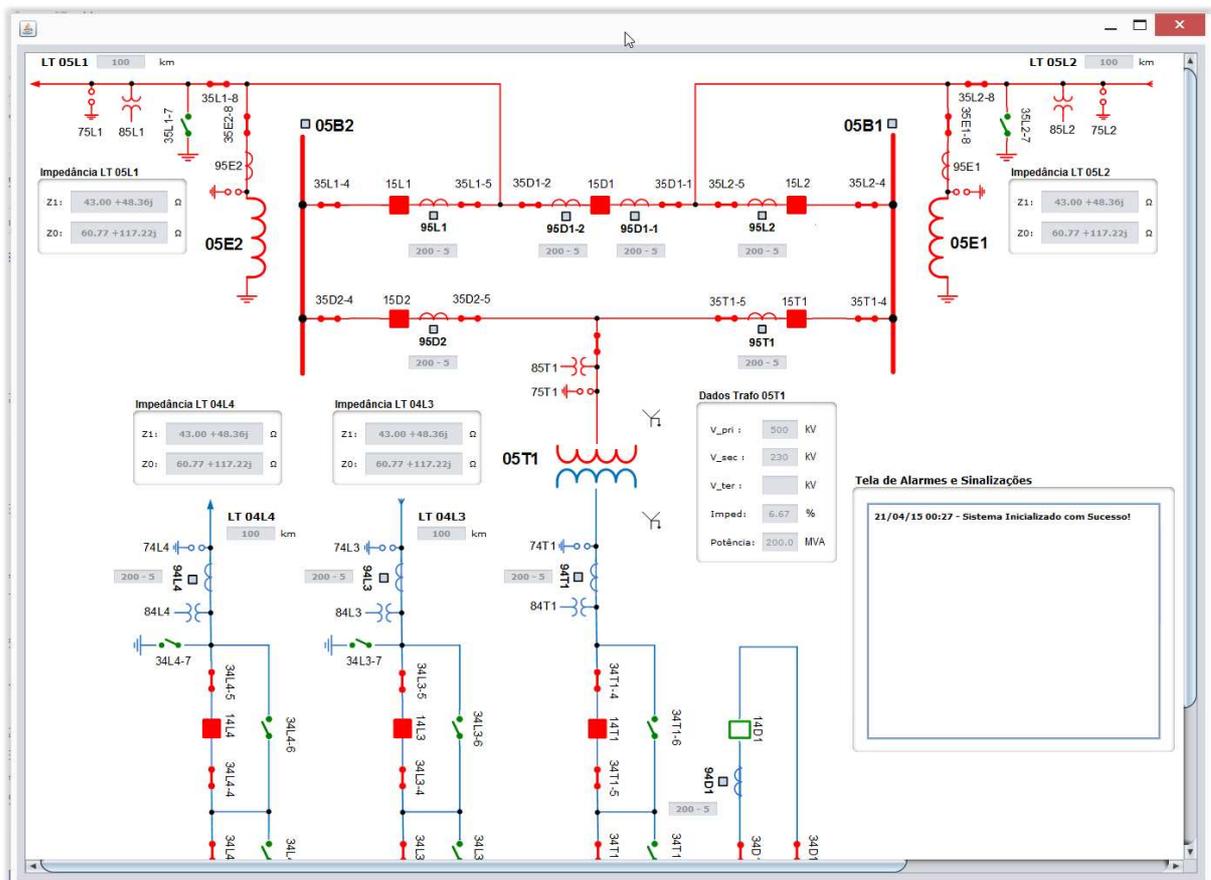
4.5 Interfaces da Ferramenta

4.5.1 Tela Principal: Diagrama Unifilar da Subestação

A tela inicial do Simulador é representada pelo o diagrama unifilar da subestação e será exibida assim que o sistema for iniciado. A partir desta tela o usuário interage com o sistema, acessa os menus de opções, acessa as demais telas de configuração e simulação, visualiza as mensagens de alerta do sistema, bem como as alterações de estado dos equipamentos conforme as opções selecionadas, as faltas simuladas e a atuação das proteções.

Na Figura 4.7 é apresentada a Tela inicial do Sistema, nela estão presentes os equipamentos da subestação como: os disjuntores, as chaves seccionadoras, os barramentos, as linhas de transmissão (LTs), o transformador, os transformadores de Corrente (TCs), os para-raios, etc.

Figura 4.7- Tela Inicial do Sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos equipamentos, estão presentes também painéis informativos como:

- Painéis de Impedância das LTs: Informam os valores de impedância de sequência positiva (Z_1) e de sequência zero (Z_0) da LT. Esta informação é importante caso o usuário queira ajustar as proteções da LT, ou calcular o nível de curto-circuito dos barramentos.
- Painel de Dados do Transformador: Assim como o Painel de Impedância de LT, este painel fornece informações importantes para ajuste de proteções e cálculo dos níveis de curto circuito. No caso do Transformador, as informações são sobre os níveis de tensão dos enrolamentos, a impedância (em PU) e a potência trifásica do Transformador.
- Tela de Alarmes e Sinalizações: Este painel tem o propósito de registrar as ações do usuário sobre o sistema, possibilitando tanto a confirmação das ações realizadas quanto a análise posterior para uma melhor compreensão das ações tomadas, contribuindo para a assimilação dos conceitos e conteúdos explorados através do uso do simulador.

Na Figura 4.8 é apresentado o Painel de Impedâncias de uma das Linhas de Transmissão.

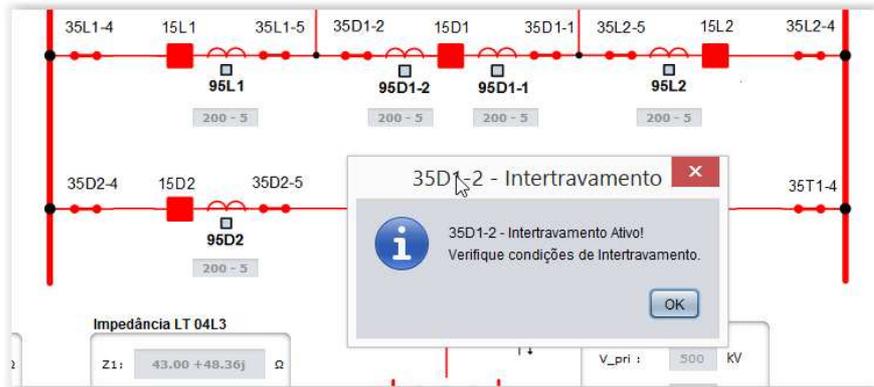
Figura 4.8 – Painel de Impedâncias da LT05L1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mensagens de alerta do sistema são exibidas para informar ao usuário sobre ações incorretas ou indevidas. Na Figura 4.9 é apresentada uma das mensagens de alerta do sistema.

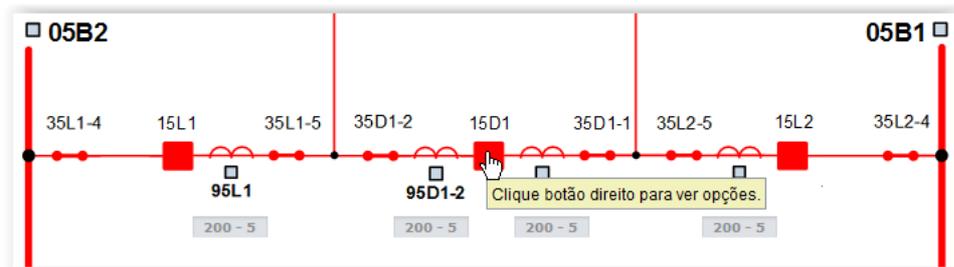
Figura 4.9 - Mensagem de Alerta sobre o Intertravamento da Chave.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na tela principal do diagrama unifilar da subestação, os elementos que permitem algum tipo de interação com o usuário são identificados pela mudança do ponteiro do mouse de "seta" para "mão" ao passar o ponteiro sobre o respectivo elemento, como é mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Identificação dos elementos que permitem interação com o usuário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização do Diagrama Unifilar da Subestação como base de representação da tela principal possibilita uma abordagem didática de conceitos como: a representação dos sistemas elétricos por meio de diagramas; o uso da simbologia para representar elementos do sistema elétrico (disjuntores, chaves seccionadores, transformadores, etc.), a identificação dos esquemas elétricos da subestação (exemplo: a opção de barramento duplo com disjuntor e meio no setor de 500kV), o uso da codificação operacional nos equipamentos, dentre outras possibilidades.

4.5.2 Telas de Configuração de Equipamentos

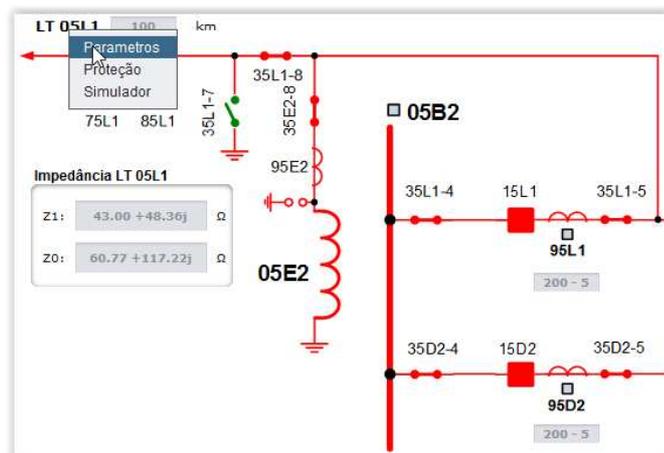
4.5.2.1 Tela de Configuração da Linha de Transmissão

A tela de Configuração da LT está disponível por meio do *menu pop-up* que será exibido ao clicar com o botão direito do mouse sobre a codificação operacional da LT, escolhendo a opção “Parâmetros”, como é apresentado na Figura 4.11.

Esta tela de configuração tem o propósito de explorar a obtenção dos valores de impedância de Sequência Positiva e de Sequência Zero da Linha de Transmissão. Estas impedâncias são utilizadas, por exemplo, para definição dos ajustes de proteção da LT, para o cálculo dos níveis de curto circuitos nos barramentos ou estudos do fluxo de potência.

Para tanto, na tela é possível que o usuário defina o tipo de condutor utilizado na LT, seu comprimento, a distância entre as fases e sua geometria, bem como o coeficiente de resistividade do solo. Na Figura 4.12 é apresentado um exemplo de Tela de Configuração da Linha de Transmissão.

Figura 4.11 - Acessando Parâmetros da Linha de Transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.12 - Tela de Configuração da Linha de Transmissão LT05L1.

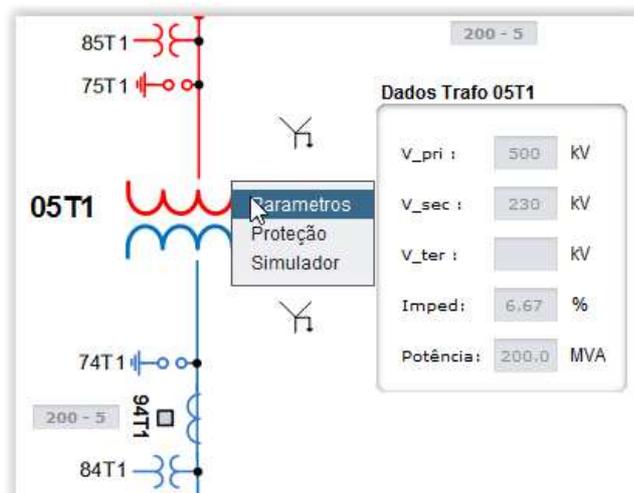
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2.2 Tela de Configuração do Transformador

A tela de Configuração do Transformador está disponível por meio do *menu pop-up* que será exibido ao clicar com o botão direito do mouse sobre o símbolo do transformador, escolhendo a opção “Parâmetros”, como é apresentado na Figura 4.13.

A tela de Configuração do Transformador é apresentada na Figura 4.14. Por meio desta tela pode-se explorar a influência das características do Transformador na análise dos níveis de curto circuito dos barramentos. Detalhes desta influência foram abordados no Capítulo 3 (3.2- Análise do Curto-circuito nas Barras da Subestação).

Figura 4.13- Acessando Parâmetros do Transformador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.14 - Tela de Configuração do Transformador 05T1.

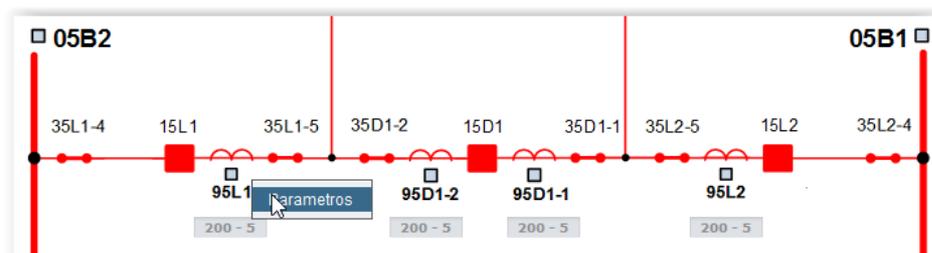
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta tela é possível selecionar a potência, a quantidade de enrolamentos do Transformador e o tipo de conexão utilizada nos enrolamentos, bem como a impedância em PU do Transformador.

4.5.2.3 Tela de Configuração do Transformador de Corrente (TC)

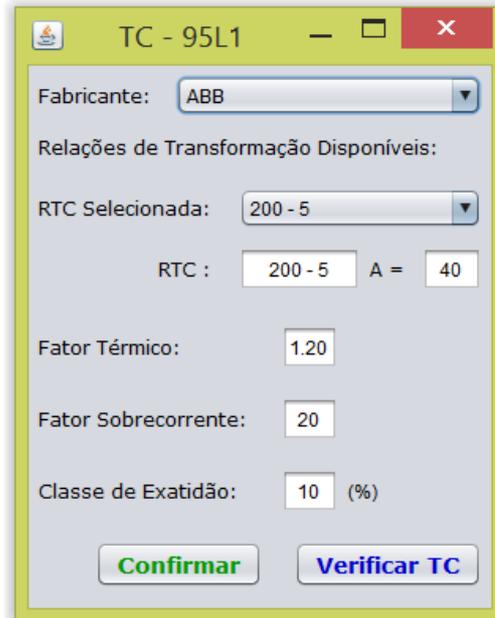
A tela de Configuração do Transformador de Corrente está disponível por meio do *menu pop-up* que será exibido ao clicar com o botão direito do mouse sobre o código operacional do TC, clicando na opção “Parâmetros”, como ilustram asFigura 4.15 eFigura 4.16.

Figura 4.15- Acessando Parâmetros do Transformado de Corrente (TC).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.16 - Tela de Configuração do TC 95L1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tela de configuração do TC o usuário pode selecionar a Relação de Transformação do Transformador de Corrente (RTC). Após definida a RTC, o usuário pode verificar se a RTC está adequada aos critérios de dimensionamento da corrente primária do TC, vistos no Capítulo 3 no item 3.1.5.1.5 - Dimensionamento da Relação Nominal do TC.

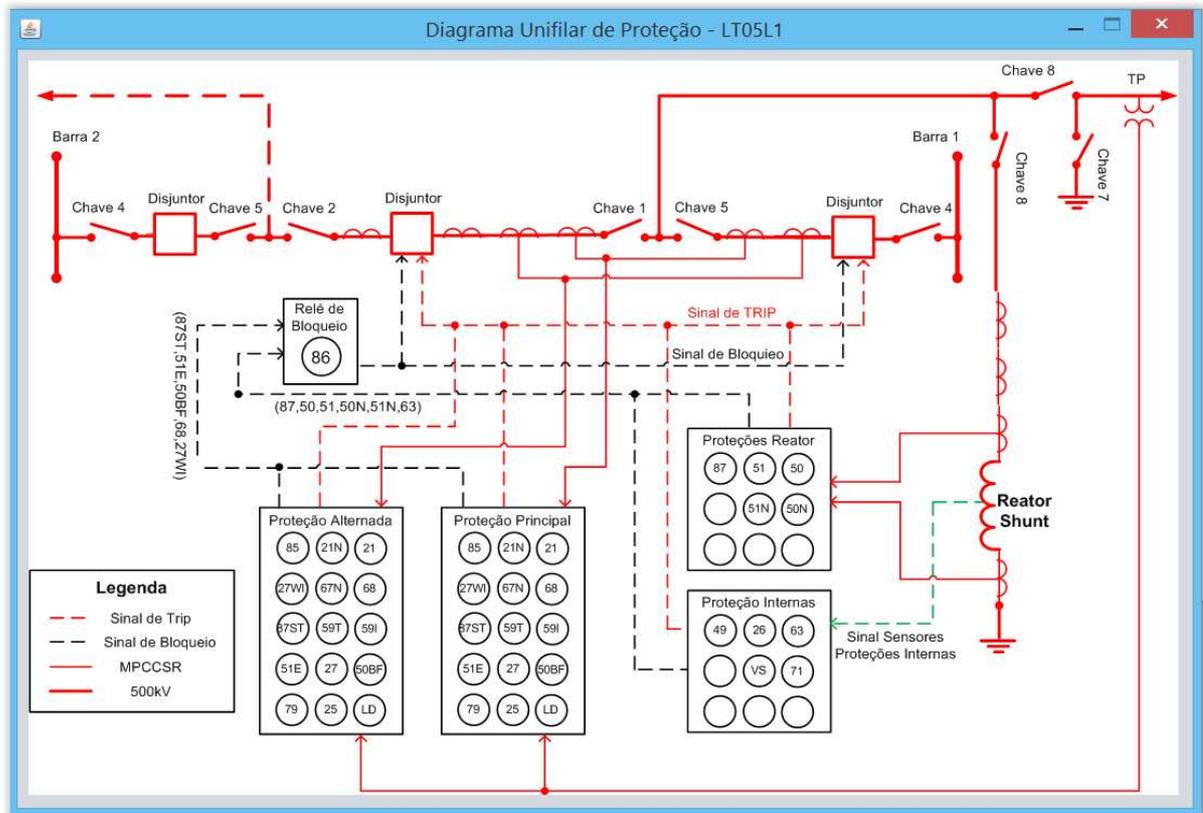
4.5.3 Telas de Configuração da Proteção

4.5.3.1 Proteção da Linha de Transmissão

4.5.3.1.1 Tela do Diagrama Unifilar de Proteção da Linha de Transmissão

Assim como a Tela de Configuração da LT, a tela do Diagrama Unifilar de Proteção da LT também é acessada por meio do *menu pop-up* da LT, contudo deve ser selecionada a opção “Proteção”. Ao selecionar esta opção, a Tela do Diagrama Unifilar de Proteção será exibida, como mostra a Figura 4.17.

Figura 4.17 - Tela do Diagrama Unifilar de Proteção da LT05L1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta tela de Proteções tem o propósito de destacar que as proteções existentes na linha de transmissão estão de acordo com as definições do ONS, ilustrar de forma didática a forma como as proteções são implementadas no sistema e as sinalizações necessárias para o funcionamento adequado, bem como os pontos do sistema onde são obtidos os valores de tensão e correntes que são utilizados pelas proteções, facilitando a compreensão de conceitos como o de Zonas de Proteção, Zonas de Sobreposição, etc.

4.5.3.2 Tela do Conjunto de Proteções da Linha de Transmissão

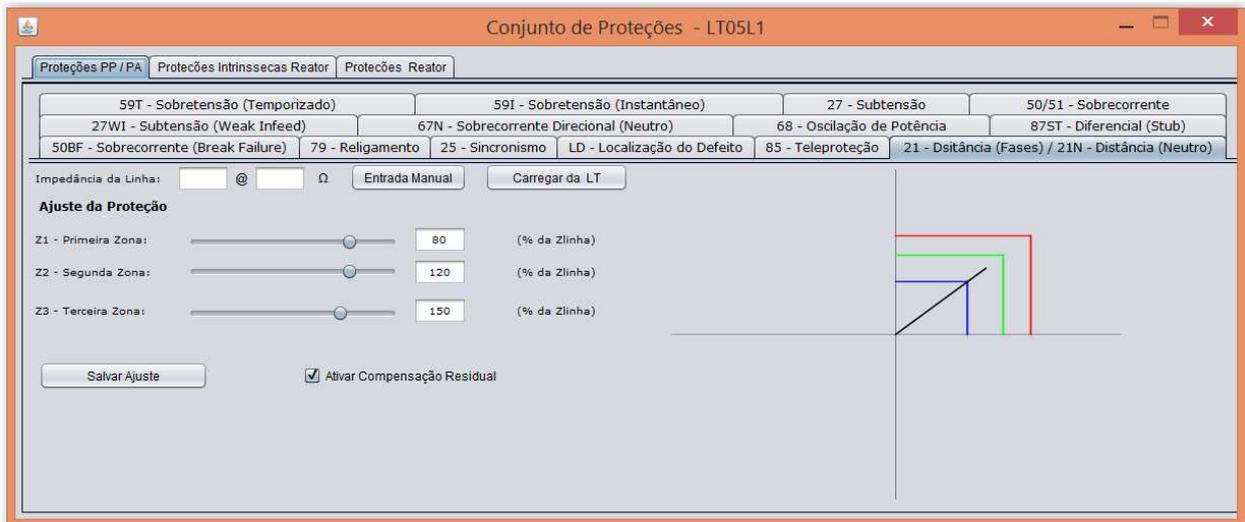
A partir da tela do Diagrama Unifilar de Proteções (Figura 4.17), é possível clicar sobre o código ANSI da proteção para exibir a Tela do Conjunto de Proteções, onde o usuário poderá realizar ajustes na proteção selecionada.

Na tela do Conjunto de Proteções há uma aba para cada função de proteção. Em algumas delas, como é o caso da Proteção de Distância (21), Esquema de Falha do Disjuntor (50BF), Religamento (79) e Proteções de Sobrecorrente (50/51 fase e neutro), é possível alterar o ajuste da proteção. Nas demais abas de proteção, onde

não é possível realizar ajustes, é exibido um texto sobre os critérios de utilização ou sobre a filosofia da proteção.

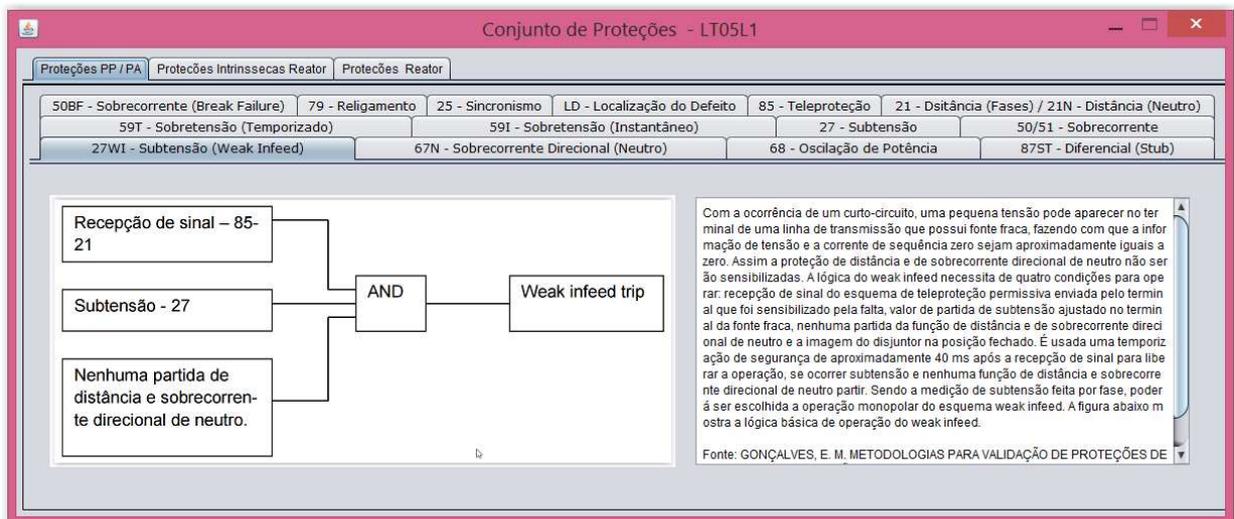
Na Figura 4.18 é apresentada uma das proteções onde é possível alterar o ajuste, e na Figura 4.19 é apresentada uma das proteções onde há somente as informações sobre a proteção.

Figura 4.18 - Tela de ajuste da Proteção de Distância (21).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.19- Tela informativa sobre a Proteção 67N.



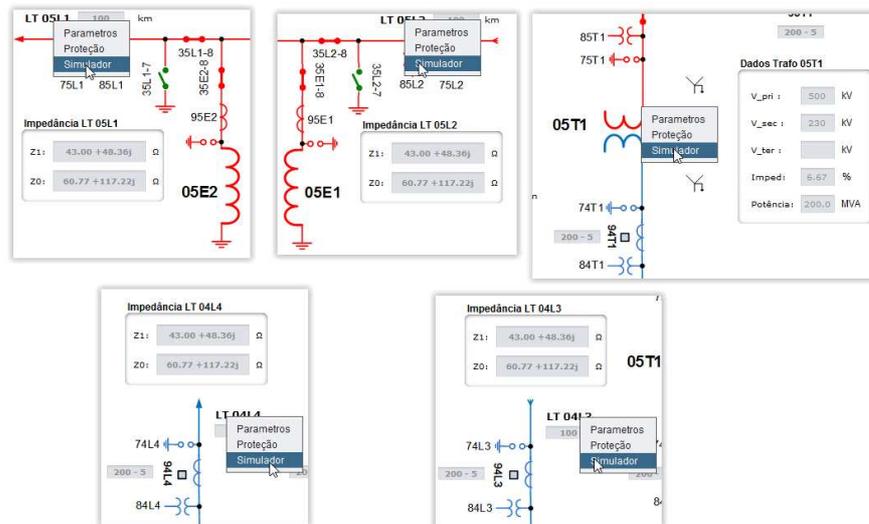
Fonte: Elaborado pelo autor.

O propósito destas telas de proteção é fazer com que o usuário consiga compreender tanto a importância de cada uma das proteções para o equipamento ao qual estão associadas, como também tenha a possibilidade de implementar ajustes e verificar os resultados através das simulações de faltas.

4.5.4 Tela de Simulação de Faltas

A tela do Simulador de Faltas está disponível por meio do *menu pop-up* que será exibido ao clicar com o botão direito do mouse sobre as Linhas de transmissão ou sobre o Transformador. Na Figura 4.20 são apresentados os acessos à tela do Simulador de Faltas, que pode ser feita tanto pelas LTs quanto pelo Transformador.

Figura 4.20 - Locais de acesso a Tela do Simulador



Fonte: Elaborado pelo autor.

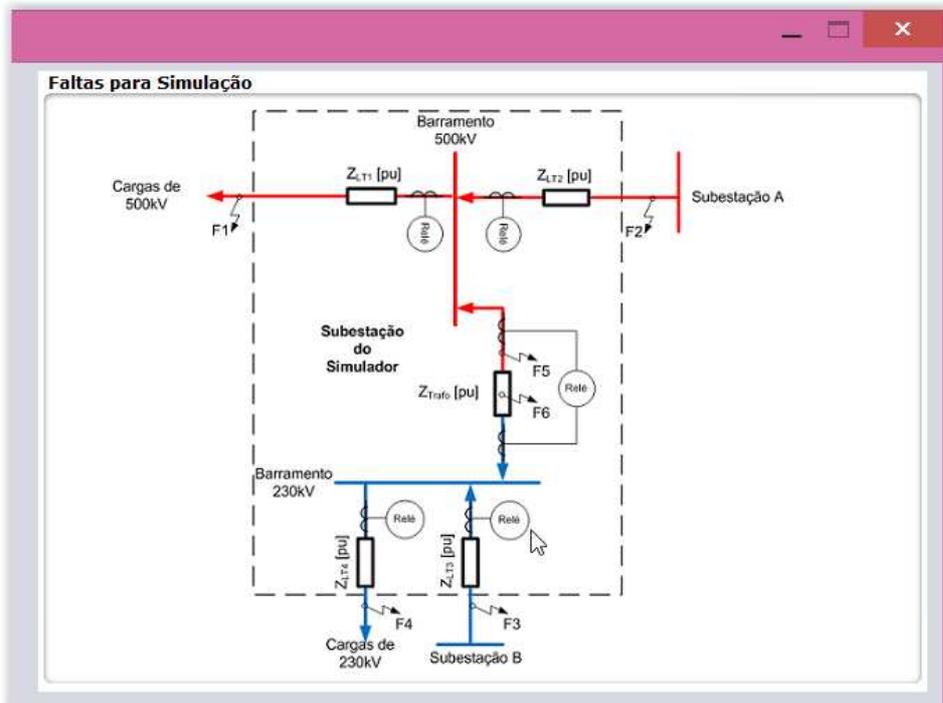
A Tela do Simulador é apresentada na Figura 4.21. Nesta tela o usuário visualiza um diagrama unifilar simplificado de impedâncias da subestação (detalhe apresentado na Figura 4.22), onde estão representados os principais elementos e os locais onde é possível simular faltas. Além disso o usuário pode, entre as opções de local apresentadas no diagrama simplificado, selecionar o local onde deseja que a falta seja simulada, selecionando ainda o seu tipo (trifásica, bifásica, bifásica-terra ou monofásica) e a distância da falta em relação ao relé (local da falta), como pode ser verificado através do detalhe da tela apresentado na Figura 4.23.

Ao selecionar estas opções, a tela do Simulador mostrará as tensões, correntes e impedâncias de falta vistas pelo relé, bem como o gráfico dos fasores destas grandezas. Para simular esta falta basta clicar no botão “Simular Falta pela Distância”.

Figura 4.21 - Tela do Simulador de Falhas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.22 – Detalhe do Diagrama Unifilar Simplificado na Tela de Simulação de Falhas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.23 – Detalhe da Seleção do Tipo e do Local da Falta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso o usuário tenha calculado as tensões e correntes vistas pelo relé para um dos locais de falta indicados no diagrama simplificado, é possível simular esta falta utilizando estes valores. Para isto, basta colocá-los na área de entradas manuais no canto inferior direito da tela e clicar no botão “Simular Falta pelas Tensões e Correntes Informadas”. Ainda na área de entradas manuais, o usuário pode verificar a distância da falta que seria vista pelo relé para os valores de tensão e corrente informados. Estas opções estão destacadas na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Detalhe da Área de Entrada Manual da Tela de Simulação de Faltas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O propósito da tela de Simulação de Faltas é proporcionar ao usuário uma melhor compreensão das características das faltas, através da apresentação dos

valores percebidos pelos relés e da visualização dos seus fasores correspondentes, além da visualização das ações da proteção para a falta simulada conforme os ajustes realizados pelo usuário. Espera-se que o usuário, por meio da interação com as funcionalidades da ferramenta, assimile mais facilmente os conceitos e lógicas de proteção empregados nas simulações.

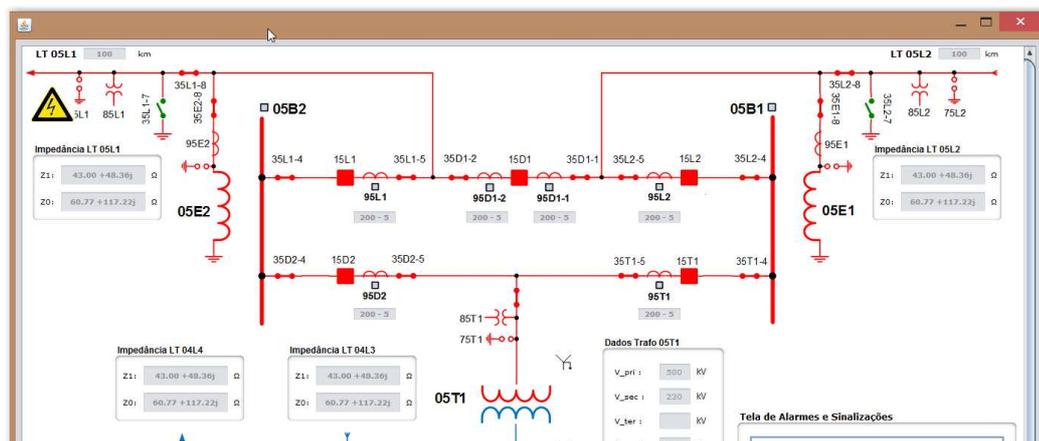
4.6 Caso de Uso: Simulando uma Falta na LT

Para simular uma falta é necessário apenas acessar a tela do Simulador de Faltas, como descrito em 4.5.4 – Tela de Simulação de Faltas, e escolher umas das formas de simulação:

- Pelo local, tipo e distância da Falta; ou
- Pelo local, tensões e correntes informadas (entrada manual).

Contudo, se as proteções referentes ao local da falta não estiverem configuradas, a falta será simulada e tudo que o usuário irá observar é a representação da falta no local indicado pela simulação, mas nenhuma ação da proteção em relação à falta (abertura dos disjuntores), como pode ser visto na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Detalhe da Simulação da Falta na LT05L1 sem atuação da Proteção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na prática, esta situação seria equivalente à de uma subestação cujas proteções não atuam e que iria ficar alimentando um curto circuito até que as proteções das subestações adjacentes atuassem isolando não só o trecho faltoso como também a subestação com problema nas proteções.

Assim sendo, para que a simulação retrate algo mais próximo da realidade, é importante que o usuário configure as proteções corretamente para que estas respondam às condições de falta simuladas e atuem devidamente isolando o defeito.

É neste contexto que o conhecimento sobre as proteções se torna relevante, e surge a oportunidade para que os usuários consolidem estes conhecimentos, apoiados por um professor/tutor.

Para configurar as proteções de uma LT, por exemplo, o usuário deve seguir os passos descritos em 4.5.3.1 – Proteção da Linha de Transmissão até a proteção que deseja ajustar. No detalhe apresentado na Figura 4.26, observa-se o ajuste das zonas da Proteção de Distância (21) onde é possível definir a impedância de referência (impedância da LT):

- Inserindo manualmente o valor e clicando no botão “Entrada Manual” para salvá-lo; ou
- Clicando no botão “Carregar da LT” para preencher o campo automaticamente como valor da tela de Configuração da referida LT.

Figura 4.26 – Detalhe do Ajuste das Zonas da Proteção de Distância.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, o usuário ajusta as Zonas da Proteção 21 definindo o percentual de cada Zona em relação à impedância da LT. Além disto, o usuário pode definir se deseja que a proteção utilize a Compensação Residual⁹ na simulação, selecionando ou não esta opção na tela de ajuste da proteção.

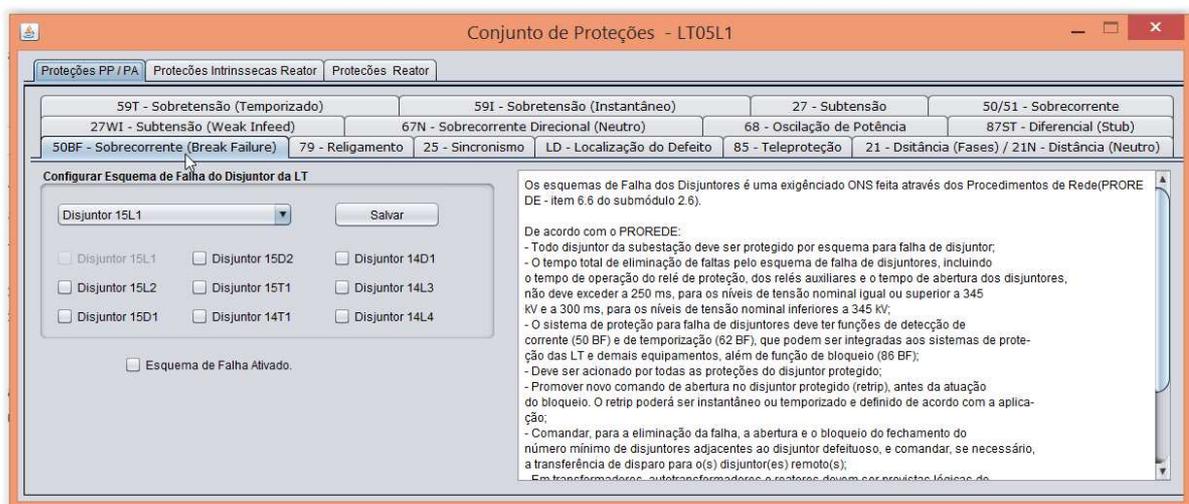
Outra proteção que pode ser ajustada é o Esquema de Falha dos Disjuntores cuja tela é apresentada na Figura 4.27. Nesta tela o usuário define quais disjuntores devem ser acionados pela proteção caso um determinado disjuntor falhe, isto é, não

⁹ Compensação utilizada para uma maior precisão do relé com relação a atuação em falta para terra.

aceite o comando de abertura enviado pela proteção (*Trip* da proteção) e salva a configuração clicando no botão “Salvar”. Para que este ajuste seja considerado durante a simulação da falta e atuação da proteção, a opção “Esquema de Falha Ativa” deve estar selecionada.

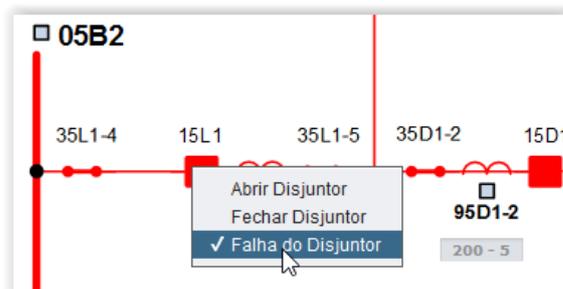
Neste caso, além de definir os ajustes do Esquema de falha do disjuntor na tela de Ajuste das Proteções e deixar marcada a opção de ativação do Esquema de Falha, o usuário deve ativar a opção “Falha do Disjuntor” no *menu pop-up* do disjuntor que deseja simular a falha, como é mostrado na Figura 4.28.

Figura 4.27 – Detalhe do Ajuste do Esquema de Falha do Disjuntor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.28 – Ativação da Falha do Disjuntor 15L1.



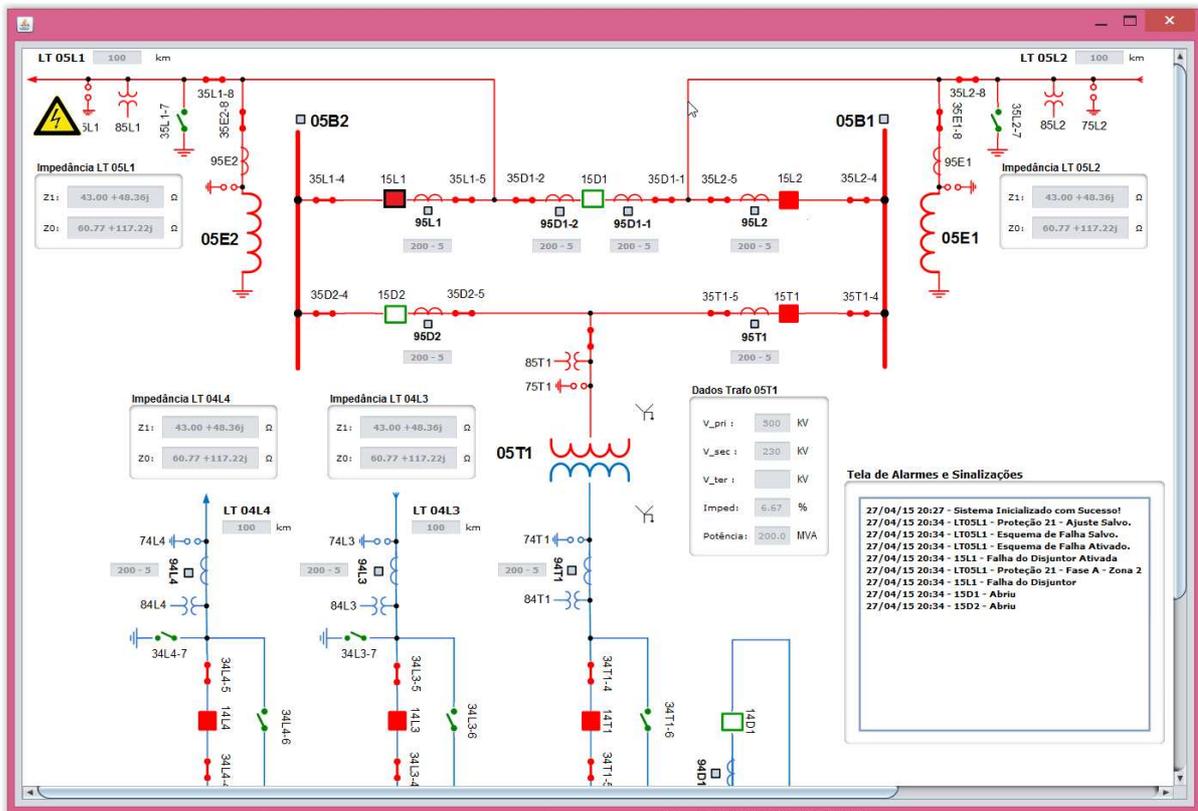
Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez ajustadas corretamente as proteções, a simulação da falta deve apresentar a atuação das proteções comandando a abertura dos disjuntores necessários para isolar o trecho defeituoso. Na Figura 4.29 é apresentada a simulação de uma falta monofásica, na 2ª Zona de atuação da Proteção 21 da LT05L1, e com atuação do esquema de Falha do Disjuntor 15L1.

Na Figura 4.30 é apresentado o detalhe da Tela de Alarmes e Sinalizações que contém toda a sequência de ações tanto do usuário, durante o ajuste das proteções,

quanto da atuação das proteções, permitindo tanto a confirmação das ações realizadas como uma análise dos resultados da simulação.

Figura 4.29 – Simulação de uma Falta Monofásica na LT05L1 e Atuação do Esquema de Falha do 15L1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.30 – Detalhe da Tela de Alarmes e Sinalizações para o Ajuste e Simulação de Falta com Atuação do Esquema de Falha do Disjuntor.



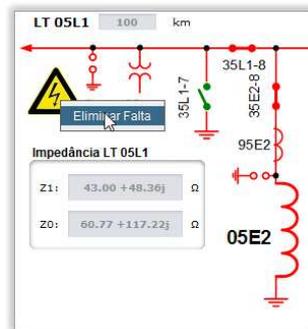
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a simulação da falta e a análise da atuação da proteção, o usuário pode recompor o sistema, clicando sobre o ícone da falta para eliminá-la e em seguida fechado os disjuntores necessários, ou como no caso do exemplo dado na Figura 4.29, isolando o disjuntor que falhou (abrindo suas chaves associadas) e só então

proceder com o fechamento dos demais disjuntores para recomposição da subestação.

Na Figura 4.31 é apresentado o detalhe da eliminação da Falta para permitir a recomposição da subestação e na Figura 4.32 é apresentada a subestação recomposta com o disjuntor que falhou já isolado.

Figura 4.31 – Eliminando a Falta Simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.32 – Subestação Recomposta com o Disjuntor que Falhou Isolado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados alguns dos conceitos e etapas utilizados no desenvolvimento da ferramenta de simulação apresentada neste trabalho. Foram apresentados alguns diagramas UML no intuito de ilustrar e facilitar a compreensão do processo de desenvolvimento permitindo que trabalhos futuros possam ser desenvolvidos mais facilmente a partir deste.

Foram também apresentadas as interfaces da ferramenta, descrevendo suas características principais e seus propósitos didáticos, para que fique claro tanto a forma de utilizá-las como o que se espera que o usuário aprenda ao utilizar a ferramenta.

Por fim foi demonstrado um caso de uso (Simulação de uma falta na LT e recomposição da subestação) para uma visão mais prática da ferramenta.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Análise do Trabalho e Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um simulador de proteções de uma subestação da Rede Básica do SEP. Inicialmente foram apresentados os trabalhos anteriores, SPTO e STOP, destacando sua origem, aspectos positivos e oportunidades de melhoria no intuito de tornar evidentes as contribuições deste trabalho em relação aos anteriores.

Em seguida foram apresentados os estudos, diretrizes e critérios para a análise e o estudo das proteções da subestação de transmissão da rede básica proposta no simulador, além de detalhes do desenvolvimento da ferramenta computacional, destacando os aspectos didáticos alcançados por meio da interação do usuário com a ferramenta, configurando elementos e proteções da subestação, simulando faltas e verificando a atuação das proteções.

O estágio atual de desenvolvimento do simulador contempla uma tela principal (Diagrama Unifilar da Subestação) e as telas auxiliares de configuração de equipamentos e de suas proteções. Na tela principal o usuário identifica elementos da subestação como vão de entradas de linha, vão de saída de linha, barramentos, vão de transformação e equipamentos como disjuntores, transformadores de potência, potencial, corrente e reatores, relés etc. Nas telas auxiliares, de parametrização das linhas de transmissão, de parametrização do transformador de potência, de parametrização dos TCs, de ajuste das proteções, e as interfaces de simulação e análise de faltas, o usuário explora as características dos equipamentos e das proteções, analisando sua importância e impactos dentro das situações de falta simuladas. É possível simular faltas por meio das características de tipo da falta (trifásica, bifásica para terra, etc.) e local (distância entre o local da falta e o relé de proteção), ou pelos valores de tensão e correntes nas entradas do relé que irá atuar para a referida falta. Estes recursos reforçam a percepção do usuário sobre as diferentes formas de analisar as faltas, contribuindo na internalização destes conceitos de proteção e de análise dentro do SEP.

O simulador desenvolvido neste trabalho será incorporado ao STOP e integrado à plataforma de ensino a distância Moodle, com a denominação de Módulo II – Proteções de Subestações da Rede Básica.

Este novo módulo com suas novas funcionalidades, aproveitando as vantagens de compatibilidade com os sistemas operacionais e a integração com plataformas de ensino a distância presentes atualmente no STOP, contribui significativamente para evolução do STOP como ferramenta de capacitação presencial e a distância de profissionais e estudantes na área de proteção e operação de sistemas elétricos.

Esta evolução pode ser mais facilmente observada através da Tabela 5.1 onde são apresentadas as principais funcionalidades do Módulo I (Distribuição) e em paralelo com as principais funcionalidades Módulo II (Transmissão) do STOP.

Tabela 5.1 – Principais Funcionalidades do Módulo I (Distribuição) e do Módulo II (Transmissão) do STOP.

| STOP – Módulo I (Distribuição) | STOP – Módulo II (Transmissão) |
|---|---|
| Especificação Transformadores de Corrente e Transformadores de Potência utilizando dados reais. | Especificação da Linha de Transmissão, Transformadores de Corrente e Transformadores de Potência utilizando dados reais. |
| Potências e correntes de curto-circuito informados manualmente pelo usuário. | Cálculo das potências e correntes de curto-circuito baseadas na configuração dos elementos da subestação. |
| Cálculo de curto circuito baseado no Método das Potências. | Cálculo de curto circuito baseado no Método das Componentes Simétricas. |
| Simulação de Falhas 1ph e 3ph. | Simulação de Falhas 3ph, 2ph, 2phE e 1ph. |
| Coordenograma | Telas com Diagramas Unifilares da Proteção. |
| | Simulação da Proteção de Distância (21). |
| | Tela de LOG da simulação |
| | Informação gráfica das tensões e correntes da simulação de falta |
| | Possibilidade de Simular Falhas tanto pelo local e tipo de falta, quanto pelas características de tensão e corrente da falta. |
| | Simulação de intertravamentos, da atuação do Esquema de Falha de Disjuntor (50BF) e da recomposição da SE. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de novos módulos e funcionalidades, dentre as quais estão:

- Permitir ao aluno alterar a topologia da subestação incluindo e retirando elementos do diagrama unifilar;
- Gerar relatório contendo dados como: Ordem de Ajuste das Proteções ou das características dos Equipamentos da subestação;
- Implementar as demais funções de proteção da subestação da rede básica. Como exemplo, tem-se a proteção diferencial do transformador de potência, teleproteção, proteções especiais e sistêmicas;
- Integrar diversas subestações com topologias diferentes permitindo a simulação de faltas sistêmicas e/ou cálculo do fluxo de carga;
- Implementar um módulo de simulação dos serviços auxiliares da subestação.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. **Power system protection**, New York: IEEE Press, 1999.
- ARAUJO, A. S. 2002. **Treinamento de Operadores de Sistema utilizando Simulador Amigável no Centro Regional de Operações do Sistema Leste**. Foz do Iguaçu : 3º Simpósio de Especialistas em Operação de Centrais Hidrelétricas, 2002.
- BEZERRA, H. **Sistema Simulador para Treinamento Presencial e a Distância de Operação da Proteção de Sistemas Elétricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.
- BHUVANESH, A. Oza e SUKUMAR, M. Brahma. **Development of Power System Protection Laboratory Through Senior Design Projects**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 20, Nº 2. 2005, pp. 532 - 537.
- BRITO, Nubia S. D., et al. **PROPOSIÇÃO DO USO DE SOFTWARES DE SIMULAÇÃO EM PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**. Belém - PA, 2012
- CHESF. **Instrução Operativa de Proteção da SE Sobral III – IOP SBT**. Documento Interno.[Fortaleza].2012
- COTOSCK, K. R. **Proteção de Sistemas Elétricos: Uma Abordagem Técnico-Pedagógica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- FERRARA, C. A., JUNIOR, H. J., PEREIRA, J. S., SILVA, J. M., OLIVEIRA, M. E., GARROFÉ, P. H. **Experiência de Furnas no Desenvolvimento e Utilização de um Simulador de Treinamento para os Centros de Operação**. XX SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Recife, 2009.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**, Rio de Janeiro: LTC / EFEI, 1977.
- GRAINGER, J. J., STEVENSON, J. W. **Power System Analysis**, New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2003.
- GRIGSBY, L. L. **The Electric Power Engineering Handbook**, Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- KINDERMANN, G. **Curto Circuito**, Ed. 3º, Florianópolis: UFSC-EEL-LABPLAN, 2003.
- LAZARIN, Samuel D. M. **SIMULADOR DE AUTOMATISMOS E PROCESSOS PARA TREINAMENTO DE OPERADORES DE USINAS HIDRELÉTRICAS**. XX SNPTEE -

SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2009.

MIRANDA, A. R, VIEIRA, T. V. e OLIVEIRA, J..**Experiência da CHESF com Treinamentos Simulados de Operadores através da utilização de Simuladores de Manobras Reais nas Instalações e Centros de Operação.** X EADO - Encontro de Debates de Assusntos de Operação. 2008.

MIU, Karen, et al..**A Distribution Power Flow Experiment for Outreach Education.** IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 25, Nº. 1. 2010, pp. 3 - 9.

MOUTINHO, J. A.**Simulador de Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão: Uma aplicação nos Sistemas Elétricos do Tramo Oeste e SE Boa Vista da Eletronorte.** III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém: ELETRONORTE,2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR 6856:Transformador de Corrente.** Rio de Janeiro, 1992.

PAIVA, Anderson T. S..**Metodologia para Desenvolvimento de um Simulador de Proteções em uma Subestação da Rede Básica.** Monografia, Universidade Federal do Ceará - UFC. Sobral, Ceará, 2013.

PROCEDIMENTOS DE REDE. **Submódulo 2.3: Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos. (rev.2.0).**2011a. Disponível em:<<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>.Acesso em: 18 de Janeiro de 2013.

_____.**Submódulo 23.3: Diretrizes e critérios para estudos elétricos. (rev.2.0).**2011b. Disponível em:<<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>.Acesso em: 18 de Janeiro de 2013.

SILVA, C. H. C.**Desenvolvimento de um Laboratório Virtual para Capacitação Tecnológica a Distância em Proteção de Sistemas Elétricos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

SILVA, Eliel Celestino da.**Proteção de Sistemas Elétricos de Potência : Guia Prático de Ajustes.** Rio de Janeiro : Qualitymark, 2014. ISBN 978-85-414-0181-4.

SOUZA, M. P.**Coordenação da Proteção de um Sistema Elétrico de Potência Interligado Utilizando Relés de Sobrecorrente e de Distância.** Monografia. Universidade Federal doRio de Janeiro. Rio de Janeiro,2010.

ZIEGLER, G. **Numerical Distance Protection: Principles and Applications,** Nuremberg: Siemens,1999.

APÊNDICE – DIAGRAMAS UML

Diagrama de Casos de Uso (Preliminar)

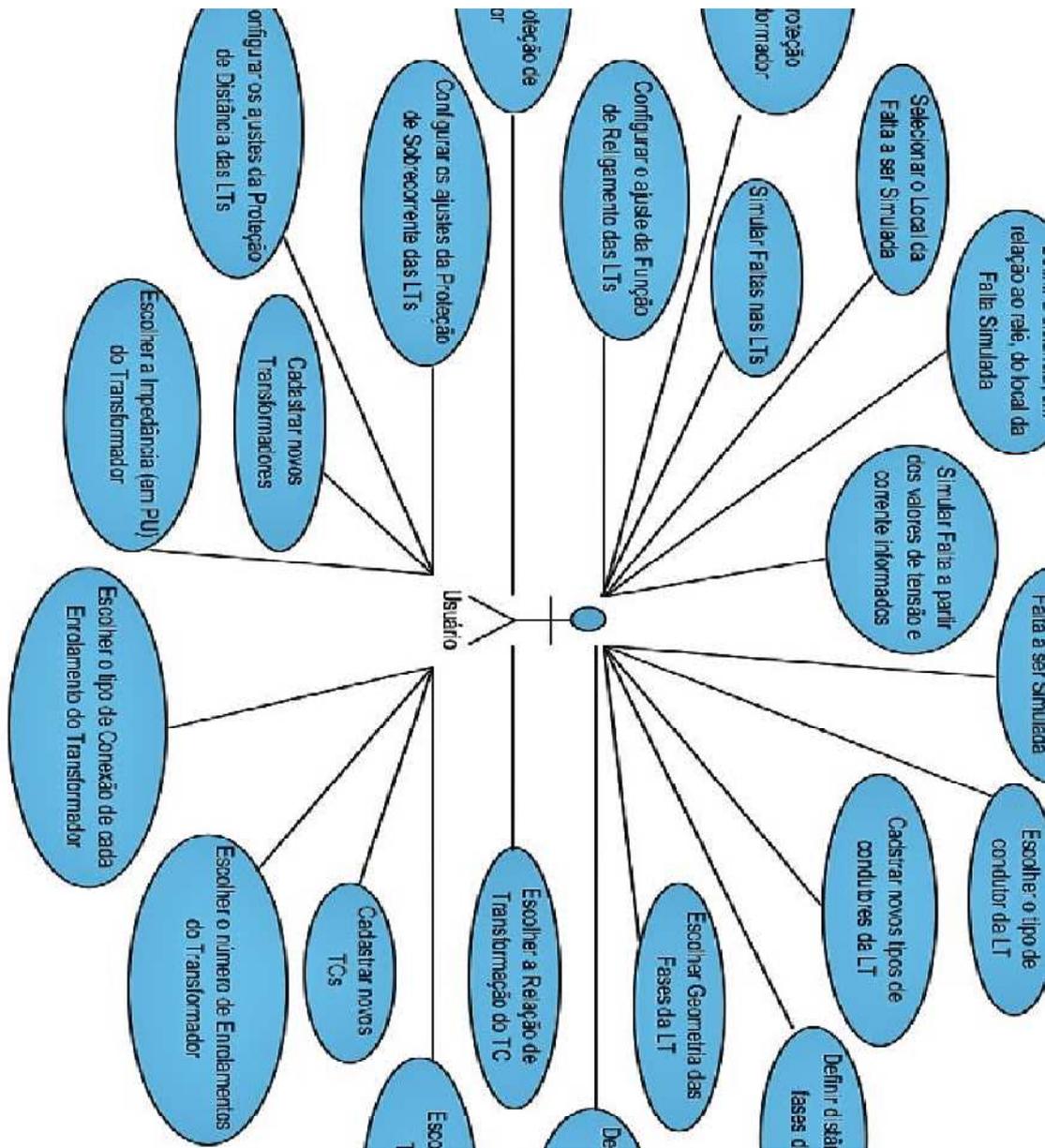


Diagrama de Casos de Uso (Mais Detalhado)

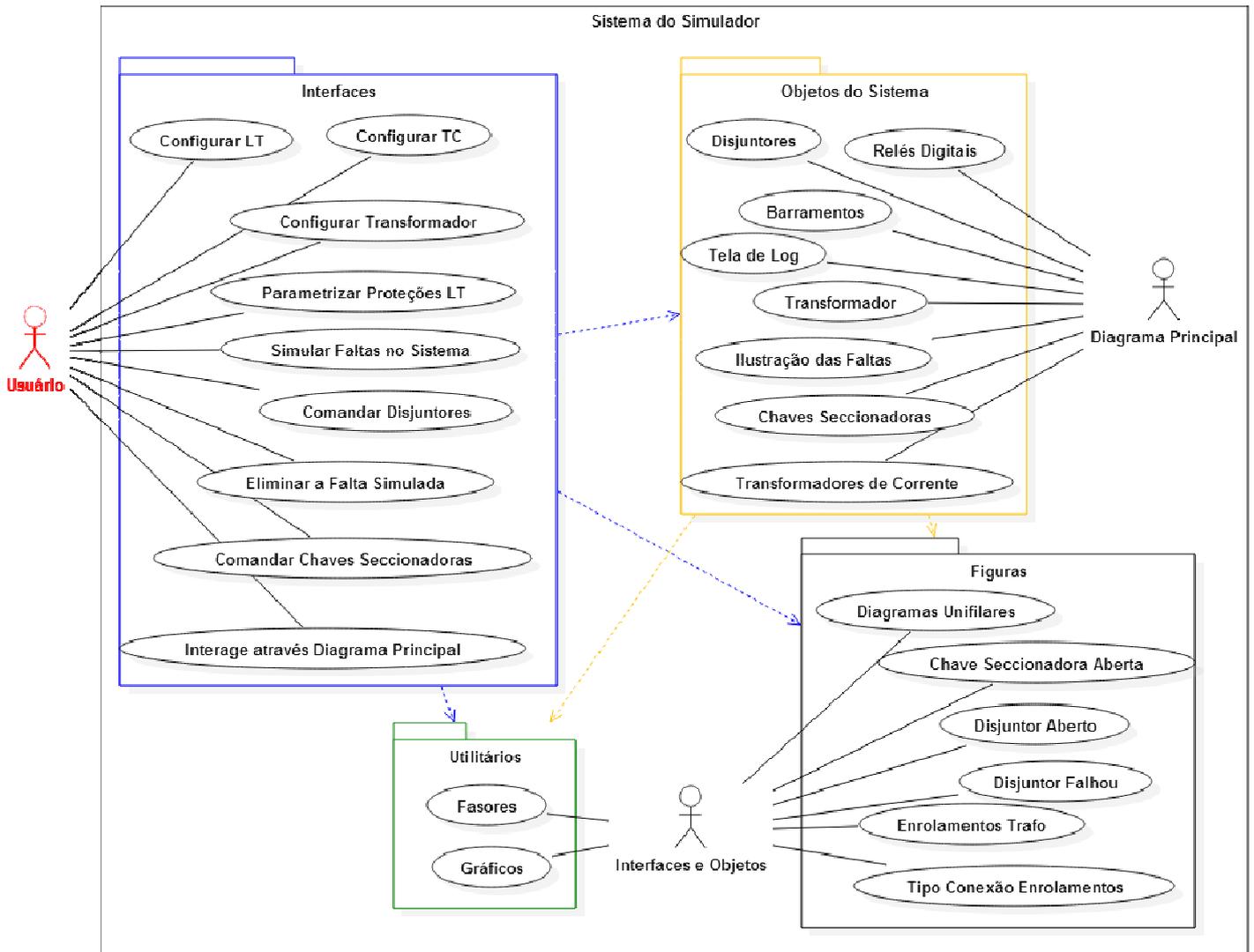


Diagrama de Sequência – Configuração do Condutor da LT

