

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CONRADO GABRIEL SODRÉ ALVES DE MORAES
GUSTAVO BATISTA DE SOUZA

**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE
COMPUTACIONAL DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

CONRADO GABRIEL SODRÉ ALVES DE MORAES
GUSTAVO BATISTA DE SOUZA

**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE
COMPUTACIONAL DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina TCC2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto

CURITIBA

2016

Conrado Gabriel Sodré Alves de Moraes
Gustavo Batista de Souza

Uma proposta de metodologia para análise computacional de sistemas de proteção

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 11 de março de 2016.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Ulisses Chemin Netto, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Ulisses Chemin Netto, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alvaro Augusto W. de Almeida, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Andrea Lucia Costa, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

MORAES, Conrado G. S. A. de; SOUZA, Gustavo B. **Uma proposta de metodologia para análise computacional de sistemas de proteção**. 2016. 90 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Esse trabalho apresenta uma metodologia para analisar qualquer sistema de proteção seja ele fictício ou real. Essa análise é realizada através do *software CAPE*, cujo objetivo é facilitar o dia a dia dos engenheiros de proteção que podem utilizar essa tecnologia, evitando possíveis problemas potenciais no SEP como, por exemplo, um grande trecho do sistema elétrico ficar sem fornecimento de energia. O trabalho mostra de forma detalhada o funcionamento dos sistemas de proteção e os componentes que atuam em conjunto para realizar a proteção do sistema. É apresentado um sistema de proteção fictício com todos os parâmetros dos equipamentos que o compõe a fim de aproximá-los dos sistemas reais. Esse sistema é submetido a diversas condições de falta para verificar o seu comportamento perante a essas.

Palavras-chave: Sistemas de Proteção. Análise Computacional. *CAPE*. Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

MORAES, Conrado G. S. A. de; SOUZA, Gustavo B. **A proposed methodology for computational analysis of protection systems**. 2016. 90 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This work presents a methodology to analyze any security system be it fictional or real. This analysis is performed using the CAPE software, which aims to facilitate the day -to-day protection engineers can use this technology avoiding any potential problems in the SEP as for example a large electrical system stretch run out of energy supply. The work shows in detail the functioning of protective systems and components that work together to perform system protection. A fictitious protection system is displayed with all the parameters of the equipment that makes up the order to bring it closer to real systems. This same system is subjected to various fault conditions to verify its behavior towards these.

Keywords: Protection Systems. Computational Analysis. CAPE. Electric Power Systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - DIAGRAMA UNIFILAR BÁSICO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	22
FIGURA 2.2 - DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO.	24
FIGURA 2.3 - UNIDADE DE COMANDO.....	25
FIGURA 2.4 - MECANISMO DE ATUAÇÃO DE UM DISJUNTOR TIPO VGA – FABRICAÇÃO TOSHIBA...	26
FIGURA 2.5 - MECANISMO DE ATUAÇÃO DE UM DISJUNTOR TIPO 3AC – FABRICAÇÃO SIEMENS...	27
FIGURA 2.6 - ACIONAMENTO A AR COMPRIMIDO.	27
FIGURA 2.7 - ACIONAMENTO HIDRÁULICO.	28
FIGURA 2.8 - MODELOS DE DISJUNTORES A SOPRO MAGNÉTICO TIPOS DHP, DR E MAGNET-BLAST – FABRICAÇÃO WESTINGHOUSE, SARCE E GENERAL ELECTRIC.....	29
FIGURA 2.9 - MODELO DE DISJUNTOR A AR COMPRIMIDO – FABRICAÇÃO ALSTOM.	30
FIGURA 2.10 - MODELO DE DISJUNTOR A GRANDE VOLUME DE ÓLEO – FABRICAÇÃO WESTINGHOUSE.	31
FIGURA 2.11 - MODELO DE DISJUNTOR A PEQUENO VOLUME DE ÓLEO TIPO HPTW – FABRICAÇÃO SPRECHER.....	32
FIGURA 2.12 - MODELO DE DISJUNTOR A SF6 TIPO FLUARC – FABRICAÇÃO MERLIN GERLIN.	33
FIGURA 2.13 - MODELO DE DISJUNTOR A VÁCUO TIPO VGA – FABRICAÇÃO TOSHIBA.	33
FIGURA 2.14 - LIGAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE.	34
FIGURA 2.15 - TC TIPO BUCHA.	35
FIGURA 2.16 - TC TIPO JANELA.....	36
FIGURA 2.17 - TC TIPO BARRA.....	36
FIGURA 2.18 - TC TIPO PEDESTAL.	37
FIGURA 2.19 - LIGAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.....	38
FIGURA 2.20 - TP INDUTIVO.	39
FIGURA 2.21 - TP CAPACITIVO.....	39
FIGURA 2.22 - CONEXÃO PARA A ALIMENTAÇÃO AUXILIAR.....	40
FIGURA 2.23 - LIGAÇÃO DO BANCO DE BATERIAS.	40
FIGURA 2.24 - RELÉ DE ÊMBOLO.....	43
FIGURA 2.25 - RELÉ DE ALAVANCA.....	43
FIGURA 2.26 - RELÉ DE DISCO DE INDUÇÃO.	44
FIGURA 2.27 - RELÉ CILINDRO DE INDUÇÃO.	45
FIGURA 2.28 - RELÉS ESTÁTICOS.	46
FIGURA 2.29 - PRINCIPAIS BLOCOS DE UM RELÉ DIGITAL.	47
FIGURA 3.1 - CARREGANDO BASE DE DADOS DO CAPE.	49
FIGURA 3.2 - SELEÇÃO DA BASE DE DADOS.FONTE: ELETROCON (2016).	50

FIGURA 3.3 - TELA INICIAL DO CAPE. FONTE: ELETROCON (2016).	51
FIGURA 3.4 – EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS NO SOFTWARE CAPE.	53
FIGURA 3.5 - ADIÇÃO DE SUBESTAÇÕES NO SOFTWARE CAPE.	54
FIGURA 3.6 - ADIÇÃO DE BARRAMENTOS NO SOFTWARE CAPE.	54
FIGURA 3.7 - ADIÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO SOFTWARE CAPE.	55
FIGURA 3.8 - ADIÇÃO DE GERADORES NO SOFTWARE CAPE.	56
FIGURA 3.9 - ADIÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE NO SOFTWARE CAPE.	57
FIGURA 3.10 - ADIÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAL NO SOFTWARE CAPE.	58
FIGURA 3.11 - ADIÇÃO DAS LZOPs NO SOFTWARE CAPE.	59
FIGURA 3.12 - ADIÇÃO DOS RELÉS NO SOFTWARE CAPE.	60
FIGURA 3.13 - BIBLIOTECA DE RELÉS DISPONÍVEIS NO SOFTWARE CAPE.	60
FIGURA 3.14 - PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS NO CAPE.	61
FIGURA 3.15 - ESCOLHA DO TIPO DE FALTA E DA IMPEDÂNCIA.	62
FIGURA 3.16 - SELEÇÃO DO MODO DE EXIBIÇÃO DA TELA INICIAL.	63
FIGURA 3.17 - EXIBIÇÃO DO RELATÓRIO DE FALTAS.	64
FIGURA 3.18 - SELEÇÃO DA DISTÂNCIA DE FALTA EM RELAÇÃO A UM BARRAMENTO.	64
FIGURA 3.19 - RELATÓRIO DA FALTA APLICADA.	65
FIGURA 3.20 - ESCOLHA DO RELÉ E DA FUNÇÃO PARA ANÁLISE)	66
FIGURA 3.21 - CURVA TOC.....	67
FIGURA 3.22 - MÉTODO DE SELEÇÃO PARA ESTUDO DE FALTAS.	68
FIGURA 3.23 - CURVA TOC COM APLICAÇÃO DE UMA FALTA.	68
FIGURA 3.24 - CURVA DIST.	69
FIGURA 3.25 - CURVA DIST COM APLICAÇÃO DE UMA FALTA.	70
FIGURA 4.1- SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA ANALISADO.	71
FIGURA 4.2 - DIMENSÕES TÍPICAS DE UMA TORRE AUTOPORTANTE UTILIZADA EM PROJETOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 440 kV.....	72
FIGURA 4.3 - CABO CONDUTOR ENCORDADO DE ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO (26 AL – 7 AÇO) GROSBEAK 636 MCM.....	73
FIGURA 4.4 - PADRÃO ESTRUTURAL DE CONDUTORES METÁLICOS ENCORDADOS DE ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO.	73
FIGURA 4.5 - DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE FALTAS SIMULADAS NO SISTEMA.....	78
FIGURA 4.6 - DIAGRAMA FUNCIONAL DO SEL-311C.....	80
FIGURA 4.7 - FALTA APLICADA A 10 KM DO BARRAMENTO E.	81
FIGURA 4.8 - FALTA APLICADA A 75 KM DO BARRAMENTO E..	81
FIGURA 4.9 - FALTA APLICADA A 140 KM DO BARRAMENTO E.	81
FIGURA 4.10 - FALTA FASE-TERRA.	82
FIGURA 4.11 - FALTA FASE-FASE.	82

FIGURA 4.12 - FALTA FASE-FASE-TERRA.	83
FIGURA 4.13 - FALTA TRIFÁSICA.	83
FIGURA 4.14 - FALTA SEM IMPEDÂNCIA.	84
FIGURA 4.15 - FALTA COM IMPEDÂNCIA DE 50 Ω	84
FIGURA 4.16 - CURVA DIST DO RELÉ SEL-311C..	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE 440 KV.....	72
TABELA 4.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE CABOS CONDUTORES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 440 KV	74
TABELA 4.3 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE CABOS PARA-RAIOS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 440 KV	74
TABELA 4.4 – PARÂMETROS DOS EQUIVALENTES DE GERAÇÃO DAS BARRAS D E G.....	75
TABELA 4.5 – DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO D E G.....	75
TABELA 4.6 – DADOS DO TC UTILIZADO.	75
TABELA 4.7 – DADOS DO TP UTILIZADO	76
TABELA 4.8 – VALORES DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA E ZERO PARA DIFERENTES PONTOS DE APLICAÇÃO DA FALTA	82
TABELA 4.9 – VALORES DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA E ZERO PARA DIFERENTES TIPOS DE FALTA.	84
TABELA 4.10 – VALORES DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA E ZERO PARA DIFERENTES VALORES DE RESISTÊNCIA.....	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

87T	Proteção diferencial de transformadores
A/D	Analógico/ Digital
CAPE	<i>Computer Aided Protection Engineering</i>
CC	Corrente Contínua
CPU	Central Processing Unit
LT	Linhas de Transmissão
LZOP	Zonas Locais de Proteção
SEP	Sistema elétrico de potência
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	12
1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 OBJETIVO GERAL	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 JUSTIFICATIVA.....	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 VISÃO GERAL DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO	18
2.1INTRODUÇÃO	18
2.2 OBJETIVOS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO.....	19
2.3 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO	19
2.4 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO	21
2.5 COMPONENTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO	23
2.5.1 DISJUNTORES.....	24
2.5.1.1 Unidade de comando.....	25
2.5.1.2 Sistema de acionamento.....	25
2.5.1.3 Unidade interruptora	28
2.5.2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	34
2.5.3 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL	37
2.5.4 ALIMENTAÇÃO AUXILIAR.....	39
2.5.5 RELÉS.....	41
2.5.5.1 Relés Eletromecânicos.....	42
2.5.5.2 Relés Estáticos.....	45
2.5.5.3 Relés Digitais.....	46
3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA	49
3.1INICIANDO O CAPE	49
3.1 ELEMENTOS INTERFACE	50
3.2 INSERÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NO CAPE.....	52
3.3 ADIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS EQUIPAMENTOS	53
3.3.1 SUBESTAÇÕES.....	53
3.3.2 BARRAMENTOS	54

3.3.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	55
3.3.4 GERADORES.....	55
3.3.5 TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	56
3.3.6 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL.....	57
3.3.7 ZONAS LOCAIS DE PROTEÇÃO (LZOP).....	58
3.3.8 RELÉS.....	59
3.4 APLICANDO UMA FALTA NO SISTEMA.....	61
3.4.1 FALTA EM BARRAMENTO.....	62
3.4.2 FALTA EM LINHA DE TRANSMISSÃO.....	64
3.5 ANÁLISES DAS CURVAS.....	65
3.5.1 ANÁLISE DA CURVA TOC.....	66
3.5.2 ANÁLISE DA CURVA DIST.....	69
4 SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO.....	71
4.1 INTRODUÇÃO.....	71
4.2 PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO.....	71
4.2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	71
4.2.2 BARRAMENTOS DE GERAÇÃO.....	75
4.2.3 TRANSFORMADOR DE CORRENTE.....	75
4.2.4 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.....	76
4.3 FERRAMENTA UTILIZADA.....	76
4.4 CONDIÇÕES DE FALTAS ANALISADAS.....	77
4.5 RELÉ UTILIZADO.....	78
4.6 RESULTADOS OBTIDOS.....	80
4.6.1 ANÁLISE DA DISTÂNCIA DA FALTA.....	80
4.6.2 ANÁLISE DO TIPO DE FALTA.....	82
4.6.3 ANÁLISE DO VALOR DA IMPEDÂNCIA.....	84
4.6.4 ANÁLISE DAS CURVAS DO RELÉ.....	85
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	87
5.1 CONCLUSÃO.....	87
5.2 TRABALHOS FUTUROS.....	87
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O sistema de proteção pode ser entendido como o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curto-circuito e para outras condições de operação anormais em componentes de um sistema elétrico de potência (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2009). Ou seja, o sistema de proteção deve prevenir danos permanentes aos equipamentos que o compõe, salvaguardar a integridade física das pessoas que o operam e seus usuários, buscar tempos de interrupção no fornecimento de energia elétrica tão pequenos quanto possível e minimizar a influência de um defeito local sobre o restante do Sistema Elétrico de Potência (ANDERSON, 1999).

Para que o sistema de proteção atinja seus objetivos é necessário que seja confiável para atuar apenas em caso de falhas; ser rápido para que danos em equipamentos sejam evitados e a continuidade do serviço seja reestabelecida o mais depressa possível; ser seletivo para isolar apenas a parte do sistema em que a falha está ocorrendo e para ser capaz de detectar em qual caso é preciso ou não sua atuação; e por fim, ser sensível para responder às anormalidades na operação do sistema elétrico, tomando como base determinadas especificações de projeto (BLACKBURN, 2006).

O sistema de proteção tem como principais componentes os transformadores para instrumentos (transformadores de corrente e transformadores de potencial), relés, disjuntores e alimentação segura em corrente contínua. Os transformadores para instrumentos têm como função reduzir o nível de corrente ou tensão, para valores em que o relé possa fazer a leitura. Os relés têm a função de processar as informações de corrente e tensão e verificar se extrapolam valores pré-definidos. Os disjuntores têm a função de isolar uma parte do circuito, abrindo os seus contatos principais. A alimentação segura em corrente contínua serve como alimentação auxiliar para os relés, esquemas de proteção, controle e sinalização, além de prover outras cargas prioritárias na subestação (BRITTO, 2008).

Devido às dificuldades encontradas por engenheiros eletricitistas em estudar o comportamento dinâmico do sistema de proteção por meios analíticos de definição de ajustes de proteção, esse trabalho desenvolverá uma metodologia que auxilie engenheiros a analisar sistemas de proteção. Essa análise será realizada através do *software CAPE (Computer-Aided Protection Engineering)* desenvolvido pela Eletrocon International, Inc. Este *software* pode analisar diversas situações de operação e falta do sistema elétrico, evitando possíveis problemas potenciais que dificilmente seriam percebidos através de métodos analíticos, os quais enfocam, em geral, apenas uma situação de operação/falta.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A filosofia da proteção de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), não é absoluta, muda com o passar do tempo, de acordo com a concessionária que opera o sistema local e principalmente em função das necessidades específicas de cada área onde é aplicada. O estabelecimento e a análise de desempenho de sistemas de proteção é uma parte vital em qualquer SEP confiável.

Uma proteção de qualidade e bem projetada mantém-se invisível durante a operação normal do sistema, sem interferir em seu funcionamento, mas atua de forma adequada para situações de operação distintas do estado normal e seguro do SEP, assegurando a continuidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica e preservando equipamentos (BLACKBURN, 2006).

No Brasil, com a abertura do mercado de energia elétrica em 1998 às empresas privadas, houve uma desregulamentação do setor elétrico, a partir da qual novas condições de operação do sistema foram introduzidas, um maior número de agentes geradores agregados ao sistema trouxe a necessidade de expandir sua infraestrutura de transmissão e distribuição, como consequência, uma resposta adequada dos sistemas de proteção foi exigida para adaptá-los a esta nova perspectiva (BRITTES, 1996).

Devido a essa introdução de novas condições de operação do sistema, é necessário desenvolver e aplicar novas metodologias e ferramentas para

analisar os sistemas de proteção, principalmente para reduzir a interrupção de serviço e evitar danos nos equipamentos. Dentro desse novo cenário, o *software CAPE* torna-se importante para a análise do sistema de proteção, pois nele é possível simular faltas e verificar o comportamento simultâneo de todos os dispositivos de proteção, ao contrário de métodos analíticos.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa será desenvolver uma metodologia que auxilie engenheiros a analisar de forma dinâmica sistemas de proteção com o intuito de prevenir problemas potenciais (como por exemplo: grandes trechos do SEP ficarem sem o fornecimento de energia devida a falta da correta seletividade; e até mesmo danos permanentes em equipamentos que não foram protegidos de maneira adequada), que em geral, não observados por meios analíticos de definição de ajustes de proteção, devido ao fato da abordagem analítica analisar apenas uma única situação do SEP ou defeito.

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral consiste em elaborar uma metodologia para análise de sistemas de proteção a partir de simulações computacionais pelo uso da ferramenta computacional *CAPE (Computer-Aided Protection Engineering)*.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema;
- ii) Ambientação ao *software CAPE*;
- iii) Definição do sistema elétrico a ser simulado;
- iv) Representação computacional do sistema elétrico selecionado;
- v) Ajuste das funções de proteção utilizadas;
- vi) Definição das condições de operação e falta a serem consideradas;
- vii) Análise e discussão dos resultados;
- viii) Proposição da metodologia de análise para sistemas de proteção;

ix) Redação da monografia de conclusão de curso.

1.4 JUSTIFICATIVA

Devido à necessidade de melhor desempenho de sistemas de proteção, em razão da demanda por boa qualidade de serviços, redução de custos, continuidade do serviço e confiabilidade, torna-se fundamental que o sistema de proteção atue com bom desempenho evitando assim possíveis interrupções desnecessárias. Para responder adequadamente a estas necessidades, os engenheiros de sistemas de proteção contemporâneos devem lançar mão de novos métodos de análise.

O grande problema na Proteção de Sistemas Elétricos é a determinação, pelos relés, do local do defeito ou curto-circuito, para desligar somente o componente defeituoso. Esta seletividade é alcançada normalmente em detrimento do tempo de atuação da proteção. Para o caso de uma linha de transmissão, a localização de defeitos pelos relés de proteção torna-se problemática devido a:

- Comprimento das linhas.
- Curtos-circuitos com elevada resistência de arco ou de contato.
- Imprecisões nas medidas efetuadas, introduzidas por TPs, TCs.

A aplicação de sistemas de proteção em alta tensão tem seu desempenho comprometido pela presença de determinados elementos típicos componentes de um Sistema Elétrico de Potência, como por exemplo:

- Linhas de transmissão não transpostas: linhas não transpostas possuem impedâncias de fase desbalanceadas, o que resulta no surgimento de correntes de sequência negativa e sequência zero no sistema. Estas correntes podem se tornar grandes o suficiente para causar falsas respostas nos relés de proteção.
- Reatores de compensação shunt: reatores conectados em shunt podem submeter o circuito de proteção a um potencial oscilatório quando a linha é desenergizada, podendo gerar uma saída de parâmetros indesejada no instante do religamento do circuito.

- Capacitores de compensação série: capacitores conectados em série introduzem problemas adicionais ao relé devido a ondas distorcidas causadas por este tipo de compensação reativa.

Nesse contexto, abordagens computacionais representam uma alternativa pertinente para análise dos sistemas de proteção.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente será realizada uma revisão bibliográfica sobre sistemas de proteção com o intuito de conhecer mais a fundo o tema desta pesquisa e sanar dúvidas que possam aparecer no decorrer da redação da monografia. Feita a revisão bibliográfica, será estudado mais a fundo o funcionamento do *software CAPE*, através de tutoriais, que explicam o funcionamento das principais ferramentas, disponíveis eletronicamente na página do desenvolvedor do *software*. Então, será definido o sistema elétrico a ser simulado, buscando torná-lo mais próximo possível dos sistemas reais, facilitando assim a utilização desse material para outros trabalhos.

Com o sistema definido e com o domínio da ferramenta *CAPE*, este sistema será representado computacionalmente. Com o sistema representado, serão ajustadas as funções de proteção utilizadas nas simulações para que estas sejam fieis à realidade. Posteriormente, serão definidas quais serão as condições de operações e de falta a serem consideradas, para que a análise mostre várias situações de operação e diferentes faltas que possam ocorrer. Com os resultados das simulações, será feita a análise e as conclusões que podem ser tiradas destas simulações.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo consiste na introdução da monografia, no qual será abordado de forma sucinta o tema pesquisado, os problemas e premissas que são encontrados em relação aos sistemas de proteção, os objetivos a serem alcançados durante a realização da pesquisa, a justificativa pela escolha do

tema que será trabalhado, além dos procedimentos que serão tomados durante o decorrer do trabalho.

O segundo capítulo abordará o sistema de proteção como um todo. Será explicado de forma detalhada o seu funcionamento e os componentes que atuam em conjunto para realizar a proteção do SEP.

O terceiro capítulo abordará a metodologia desenvolvida, ou seja, a partir de um sistema fictício, mostrará como realizar o estudo, verificação e simulação de qualquer sistema de proteção.

O quarto capítulo mostrará o sistema elétrico a ser simulado. Neste capítulo, serão apresentados os parâmetros e justificativas pela escolha do sistema e serão definidas as condições de operação e de falta, além de mostrar quais foram os ajustes das funções de proteção usadas, finalizando, serão mostrados os resultados obtidos das simulações realizadas.

O quinto capítulo consiste na conclusão da monografia e análise para possíveis trabalhos futuros sobre o tema sistema de proteção.

2 VISÃO GERAL DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Mediante ao sistema de concessões isoladas das décadas de 1930 e 1940, o Brasil adotava diferentes níveis de frequência e tensão operacionais em seus sistemas de geração, transmissão e distribuição. Os padrões americano (60 Hz) e europeu (50 Hz) eram ambos utilizados, os níveis de tensão eram determinados exclusivamente pelas empresas concessionárias e não havia critérios e normas que estabelecessem as diretrizes operacionais do sistema como um todo (BICHELS, 2015).

No Brasil da década de 1950, com a evolução e o crescimento dos sistemas elétricos de potência, e a política governamental de aproveitamento dos grandes potenciais hidrelétricos, foram construídas grandes usinas, para operar na frequência de 60 Hz e surgiu então o problema da interligação dos sistemas para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos dos diversos sistemas isolados que, já nesta época, representavam uma carga significativa. Uma vez que a Europa ainda passava por um período de intensa reestruturação do pós Segunda Guerra Mundial, seus parques fabris extremamente danificados voltaram-se à produção e consumo interno, abrindo a possibilidade para os equipamentos americanos operando em 60 Hz dominassem outros mercados onde antes havia forte concorrência (BICHELS, 2015).

No início da década de 1960 o Ministério das Minas e Energia criou o Comitê Coordenador de Estudos Energéticos da Região Centro-Sul com a finalidade de estudar os potenciais hidráulicos, o mercado de energia elétrica da região e a questão da unificação das frequências que definiu como padrão para o Sistema Interligado Nacional a frequência de 60 Hz, padrão adotado devido à predominância desta frequência sob as demais, fato decorrente da grande disponibilidade de equipamentos norte-americanos no mercado, (BICHELS, 2015).

Este período histórico do setor elétrico brasileiro marcado pelo estabelecimento dos padrões operacionais de todo o sistema traz consigo uma realidade desafiadora, o planejamento, a unificação e expansão do Sistema Interligado Nacional. Para que esta nova e complexa infraestrutura de

suprimento de energia fosse estabelecida de forma concreta e a confiabilidade e continuidade do abastecimento energético não fossem comprometidas foi necessário adotar uma cultura de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência adequada a esta nova realidade (BICHELS, 2015).

2.2 OBJETIVOS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO

O objetivo principal de qualquer sistema de proteção é manter alto o nível de qualidade e continuidade de serviço, atuando com eficiência na eliminação de contingências que comprometam a operação normal e segura do sistema elétrico, minimizando danos e riscos. Um sistema de proteção eficiente impede a ação prolongada dos efeitos nocivos gerados por faltas permanentes ou temporárias que venham a atingir o SEP (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

Quando faltas consequentes de condições adversas ocorrem, sejam elas de origem natural ou mesmo provocadas pela ação humana, é imprescindível minimizar os danos causados ao sistema e restaurar o mais brevemente possível o suprimento energético adequado (BLACKBURN, 2006).

É importante frisar que o sistema de proteção não impede que problemas ocorram, ou seja, não se antecipa ao problema. Os relés atuam somente após a ocorrência de uma condição anormal. Então a proteção não significa prevenção, mas limita a duração da falha e reduz os possíveis danos causados (BLACKBURN, 2006).

2.3 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Os princípios fundamentais através dos quais se baseiam todos os sistemas de proteção, determinam que a proteção não deva atuar em caso de inexistência de falhas e ainda que a proteção deva atuar de maneira adequada considerando a localização e intensidade das falhas incidentes sobre o SEP.

A proteção de Sistemas Elétricos de Potência consiste na habilidade em aplicar soluções em engenharia, lançando mão de ferramentas matemáticas e computacionais na criação e implementação de um conjunto de dispositivos e controles, cuja sensibilidade seja capaz de diferenciar

perturbações no SEP oriundas de contingências, e neste caso agir corretamente evitando danos, desligando e isolando os equipamentos, e ao mesmo tempo evitar que aqueles dispositivos atuem sob condições de perturbação toleráveis como as observadas em regimes transitórios (BLACKBURN, 2006).

É importante reconhecer que a “janela de tempo” de ação de um sistema de proteção é muito estreita, em geral da ordem de 100 milissegundos. Quando uma falta ocorre, qualquer procedimento que envolva tempo adicional na tomada das ações estabelecidas no plano de proteção é indesejável. É vital que os dispositivos de proteção atuem corretamente, pois ambos, falta e operação incorreta, podem resultar em problemas maiores para o sistema envolvendo danos crescentes aos equipamentos, risco de vida e possivelmente longas interrupções de serviço (BLACKBURN, 2006).

A ocorrência de faltas no sistema elétrico cria a necessidade de coordenação entre a proteção e as ações de controle para extinguir as perturbações no SEP, com a finalidade de evitar a propagação da degradação de equipamentos e restaurar o seu estado operativo normal (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

Na proteção de sistemas elétricos, precisam ser analisados três tipos de situações:

- Situação Normal de Funcionamento: Nenhuma falha nos equipamentos é encontrada.
- Situação Anormal de Funcionamento: é a situação que pode provocar distúrbios na rede elétrica, tais como oscilações de tensão, sem apresentar aumento da corrente elétrica em termos de curto-circuito. Um exemplo de situação anormal é a perda de sincronismo.
- Situação de Curto-Circuito: é a situação mais crítica e que pode provocar danos severos no sistema se a devida proteção não atuar de maneira correta (KINDERMANN, 2005).

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO

As características específicas buscadas na concepção de um sistema de proteção como, por exemplo, tempo de abertura dos disjuntores, sensibilidade, seletividade e coordenação dos relés são estabelecidas a partir dos critérios individuais de cada projeto (condições e regimes operativos das máquinas, capacidade máxima dos equipamentos, entre outros), portanto variam de acordo com a complexidade, a dimensão do circuito a ser protegido e seus parâmetros elétricos operacionais tais como: potência, frequência, tensão e corrente nominais e níveis de curto-circuito (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

Como mencionado anteriormente, o objetivo principal dos sistemas de proteção é isolar rapidamente uma falta para que o menor trecho possível do sistema seja afetado. Partindo desse princípio, existem cinco critérios básicos em relação à proteção:

- **Confiabilidade:** A confiabilidade possui dois aspectos fundamentais: a confiança propriamente dita e a segurança. A confiança é a habilidade do sistema de proteção de atuar corretamente quando for exigido enquanto que a segurança é a capacidade do sistema em não atuar quando não for exigido, ou seja, em caso de operação normal. De modo geral, um aumento de segurança tende a diminuir a confiança e vice e versa. Para ilustrar essa situação pode-se observar a figura 2.1 que contém apenas um relé representando alta confiança, porém este pode acidentalmente ter seus contatos fechados por transitórios imprevistos ou falhas humanas. (BLACKBURN, 2006).

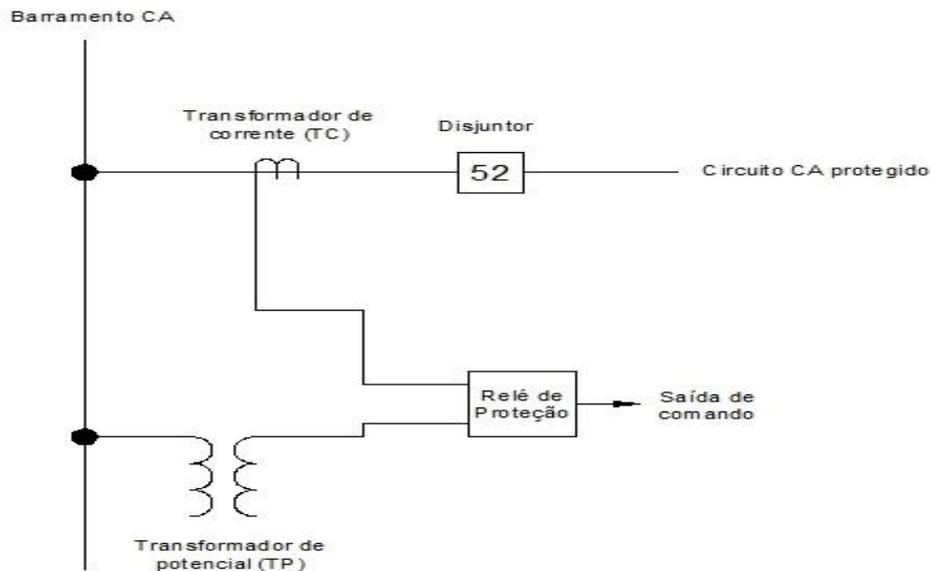


Figura 2.1 - Diagrama unifilar básico de um sistema de proteção. Fonte: Blackburn (2006).

- **Velocidade:** É desejável que a proteção isole o mais rapidamente possível a falha para que esta não cause sérios danos ao sistema. Os relés de alta velocidade atuam em menos de 50 milissegundos (três ciclos em 60hz) o que pode ser considerado instantâneo. (BLACKBURN, 2006). Atualmente há modernos relés que atuam em $\frac{1}{4}$ de ciclo. Tipicamente a função 87T atua em até dois ciclos.
- **Seletividade:** É a capacidade de o sistema selecionar e isolar somente as partes do SEP que estão operando em modo anormal, evitando que uma grande extensão desse seja desligada, ou seja, a seletividade é importante para garantir a maior continuidade de serviço com o menor número de partes do sistema desconectadas (BLACKBURN, 2006).
- **Simplicidade:** O sistema de proteção deve ser o mais simples possível para cumprir seus objetivos. Todos os componentes do sistema precisam ser avaliados cuidadosamente para garantir que eles realmente contribuam para a devida proteção do SEP. Cada adição de componentes fornece uma fonte potencial de problemas e manutenção (BLACKBURN, 2006).

- Economia: É de extrema importância obter a maior proteção com o menor custo possível. Os equipamentos que fazem parte do sistema de proteção são considerados caros quando analisados isoladamente, porém deve ser avaliado o custo dos equipamentos que eles estão protegendo e o custo de uma interrupção ou perda de equipamento protegido através de uma proteção inadequada (BLACKBURN, 2006).

2.5 COMPONENTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Nota-se um determinado padrão quando estudamos os principais equipamentos que compõem a proteção de um SEP. Para que opere de maneira adequada, a aplicação de determinados dispositivos é essencial. Disjuntores, transformadores de corrente, transformadores de potencial e relés, juntos, constituem o cerne de qualquer sistema de proteção bem estruturado (KINDERMANN, 2005).

O bom desempenho da proteção visa minimizar a extensão da falta no equipamento, a probabilidade de que o seu efeito se propague pelo circuito atingindo outros equipamentos e o tempo que o equipamento atingido permanece indisponível (KINDERMANN, 2005). Ao se analisar a composição estrutural e os princípios de funcionamento de um sistema de proteção elétrica típico, como o ilustrado no diagrama unifilar da figura 2.2 a seguir, percebe-se que todo o arranjo é controlado basicamente pela ação dos relés, recebendo informações (níveis de tensão e corrente) através do TP e TC, todos estes parâmetros medidos são transmitidos ao relé, quando o risco de danos físicos é detectado, o relé então dispara o comando de ação para os disjuntores executarem a manobra de abertura do trecho do circuito em falta. (KINDERMANN, 2005).

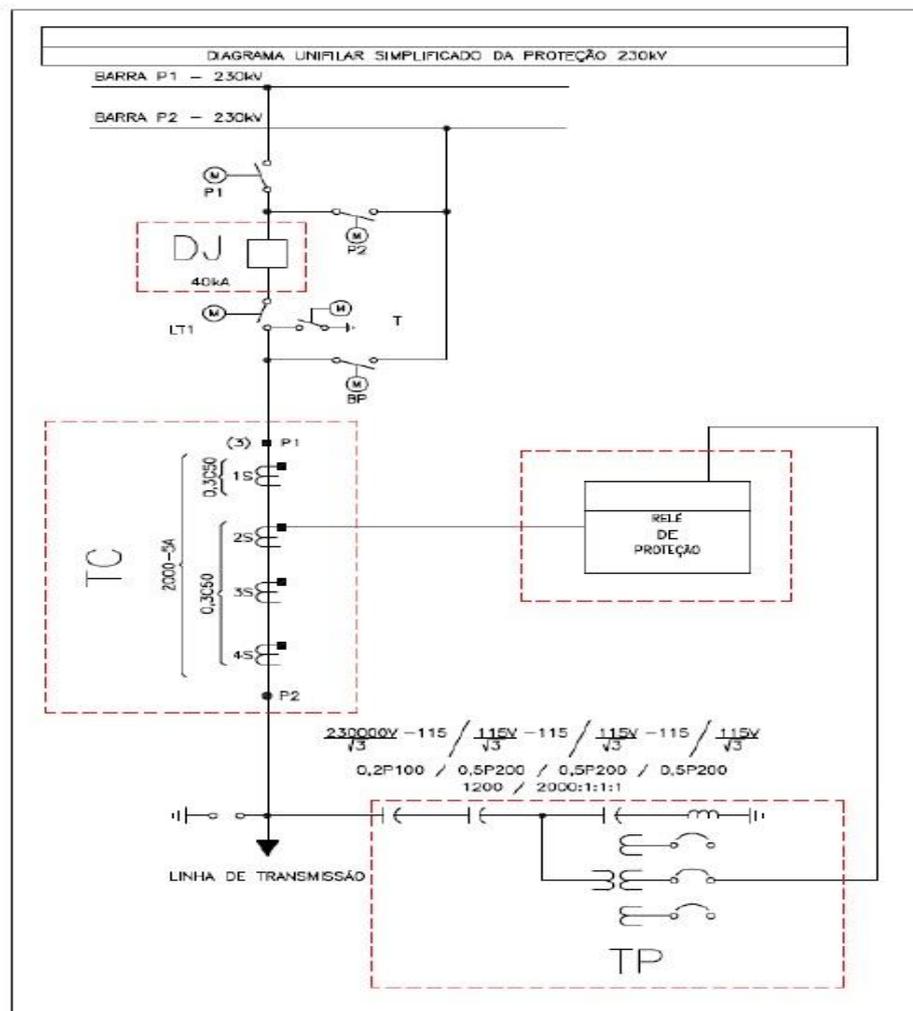


Figura 2.2 - Diagrama unifilar de um sistema de proteção. Fonte: Goes (2013).

2.5.1 DISJUNTORES

Os disjuntores são dispositivos mecânicos de manobras que tem a capacidade de estabelecer, conduzir e interromper correntes tanto em condições normais de funcionamento, quanto em condições anormais como um curto-circuito, por exemplo. Estes equipamentos são os principais elementos de segurança do sistema de potência, assim como os mais eficientes e complexos dispositivos de manobra das redes elétricas (COLOMBO, 1986).

Quando fechado, o disjuntor precisa suportar sua corrente nominal sem que venha a sobreaquecer, bem como em caso de um curto-circuito atingir sua correta posição de fechamento e conduzir a corrente de curto-circuito. E quando aberto, a distância de isolamento entre contatos deve suportar a tensão

de operação, bem como sobretensões internas, devido a surto de manobras ou descargas atmosféricas (COLOMBO, 1986).

Pode-se afirmar que os disjuntores de alta tensão são compostos dos seguintes elementos que serão detalhados a seguir (COLOMBO, 1986):

- Unidade de comando
- Sistema de acionamento
- Unidade interruptora

2.5.1.1 Unidade de comando

É o conjunto de elementos de comando, controle e supervisão do disjuntor (COLOMBO, 1986). A figura 2.3 mostra a ilustração de uma unidade de comando, tomando como base um disjuntor de extra-alta tensão.



Figura 2.3 - Unidade de Comando. Fonte: Chemin (2008).

2.5.1.2 Sistema de acionamento

A função do sistema de acionamento é abrir e fechar os contatos do disjuntor conforme a situação. É importante mencionar que os disjuntores muitas vezes permanecem longos períodos de tempo fechados, algumas vezes em condições climáticas adversas como: variações bruscas de temperatura,

umidade, chuva, e etc. E mesmo assim precisa estar pronto para atuar, interrompendo uma corrente de curto-circuito, de forma confiável sem atraso no seu tempo de atuação, o que acarretaria em sérios danos ao sistema como um todo (COLOMBO, 1986).

Os principais tipos de acionamento são:

- Acionamento por solenoide: Uma bobina solenoide é utilizada para realizar o acionamento dos contatos de fechamento e carregar a mola de abertura. A figura 2.4 ilustra esse tipo de acionamento.



**Figura 2.4 - Mecanismo de atuação de um disjuntor tipo VGA – Fabricação Toshiba.
 Fonte: W Service (2004).**

- Acionamento por mola: Para realizar o fechamento é utilizada a energia acumulada em uma mola que pode ser carregada manualmente através de uma manopla ou de um motor no caso dos disjuntores motorizados. A figura 2.5 ilustra esse tipo de acionamento.

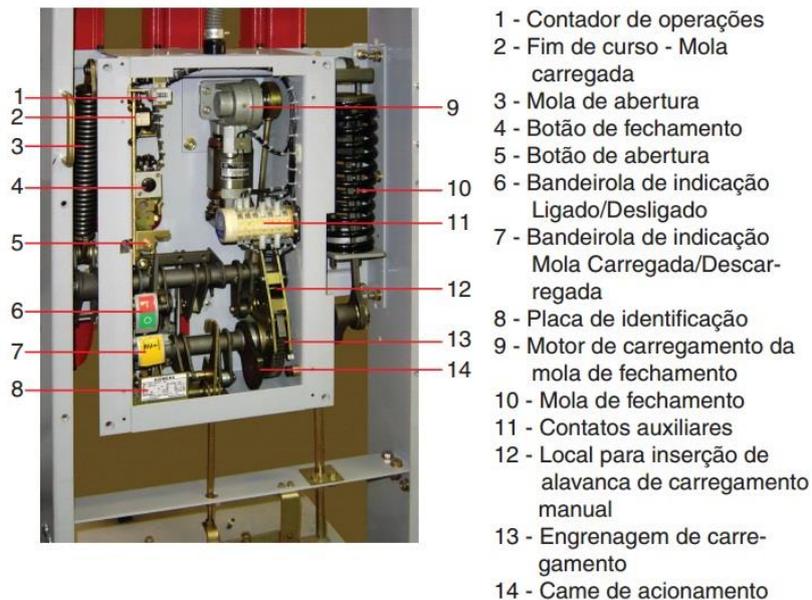


Figura 2.5 - Mecanismo de atuação de um disjuntor tipo 3AC – Fabricação Siemens. Fonte: W Service (2004).

- Acionamento por ar comprimido: Para que os contatos sejam fechados ou abertos nesse tipo de acionamento, a energia utilizada provém de um armazenamento de ar comprimido em um recipiente e liberada através de disparadores. A figura 2.6 ilustra esse tipo de acionamento.

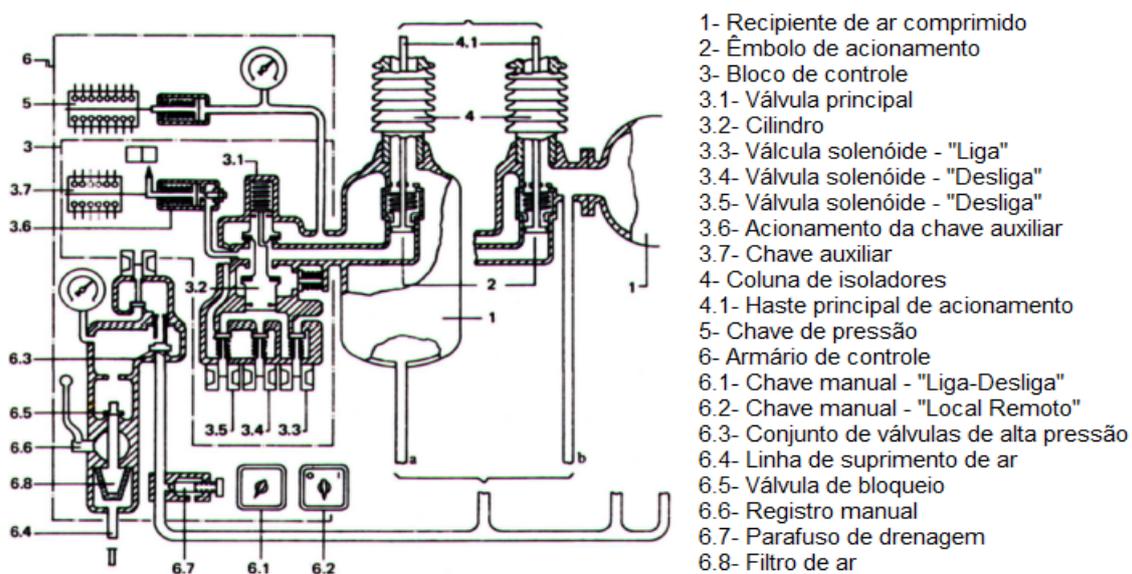


Figura 2.6 - Acionamento a ar comprimido. Fonte: Colombo (1986).

- Acionamento hidráulico: Para esse tipo de acionamento, a energia utilizada para realizar a abertura e fechamento dos contatos é derivada de um cilindro com um êmbolo estanque (COLOMBO, 1986). A figura 2.7 ilustra esse tipo de acionamento.

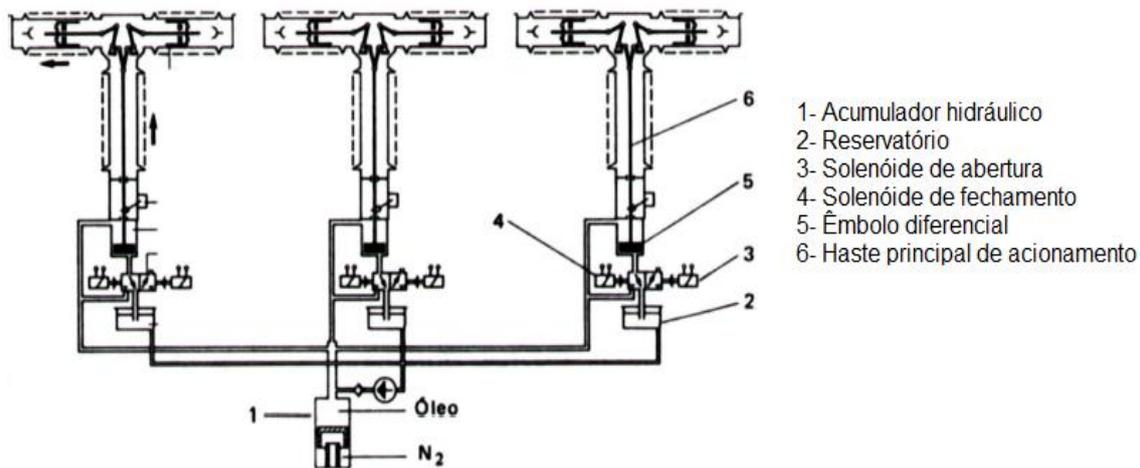


Figura 2.7 - Acionamento hidráulico. Fonte: Colombo (1986).

2.5.1.3 Unidade interruptora

A unidade interruptora tem a função de extinguir o arco voltaico que surge na separação dos contatos do disjuntor. Os principais tipos são: Sopro magnético, ar comprimido, grande volume de óleo, pequeno volume de óleo, SF₆ (hexafluoreto de enxofre) e a vácuo (COLOMBO, 1986). Todos os tipos serão detalhados a seguir:

- Disjuntor a sopro magnético

A câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético é composta por ar. Quando os contatos do disjuntor são separados, ocorrendo a formação do arco voltaico, este é impulsionado para o interior das fendas, onde sua resistência elétrica é aumentada e então o arco é extinto. A força que impulsiona o arco para o interior das fendas é produzido pelo campo magnético da própria corrente elétrica que circula no disjuntor (COLOMBO, 1986). A figura 2.8 ilustra esse tipo de unidade interruptora.



Figura 2.8 - Modelos de disjuntores a sopro magnético tipos DHP, DR e Magnet-Blast – Fabricação Westinghouse, Sarce e General Electric. Fonte: W Service (2004).

- Disjuntor a ar comprimido

A câmara de extinção desse tipo de disjuntor utiliza ar comprimido como meio de extinção do arco elétrico, existindo dois tipos de câmaras: câmara de sopro axial em uma direção e câmara de sopro axial em duas direções. (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995).

Nos disjuntores a ar comprimido, as câmaras de extinção estão totalmente e permanentemente sob pressão. O sopro de ar começa pela abertura das válvulas de sopro para a atmosfera, provocando o fluxo do ar sob pressão no interior das câmaras de extinção, esse fluxo resfria e alonga o arco elétrico. Nos disjuntores de sopro em uma direção, o fluxo do ar comprimido para a atmosfera ocorre pelo contato móvel, já nos disjuntores de sopro em duas direções, ocorre pelo contato móvel e pelo fixo (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995).

Devido a suas características dielétricas do ar comprimido, estes disjuntores são recomendados para grandes capacidades de interrupção de curto circuito (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995). A figura 2.9 ilustra esse tipo de unidade interruptora.



Figura 2.9 - Modelo de disjuntor a ar comprimido – Fabricação Alstom. Fonte: W Service (2004).

- Disjuntor de grande volume de óleo.

Os disjuntores de grande volume de óleo assim como os de pequeno volume de óleo, têm como princípio de extinção do arco baseado na decomposição do óleo em que estão imersos pela energia do arco elétrico. Essa decomposição libera gases, principalmente o hidrogênio, que tem a função de retirar o calor do arco. Além disso, devido ao aumento da pressão em volta do arco elétrico, será criado um fluxo de óleo mais frio sobre o arco, desionizando o meio dielétrico, auxiliando na troca térmica que irá alongar o arco até a sua extinção (COLOMBO, 1986).

Os disjuntores de grande volume de óleo são disjuntores de alta capacidade de interrupção de curto circuito, sendo compostos de um grande tanque metálico, mantido no potencial da terra, onde contém óleo isolante no qual estão imersos os contatos principais e câmaras de extinção (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995). A figura 2.10 ilustra esse tipo de unidade interruptora.



Disjuntor GVO
de Alta Tensão
Westinghouse

**Figura 2.10 - Modelo de disjuntor a grande volume de óleo – Fabricação Westinghouse.
Fonte: W Service (2004).**

- Disjuntor de pequeno volume de óleo.

Como foi mencionado anteriormente, os disjuntores de pequeno volume de óleo possuem o mesmo princípio de extinção dos disjuntores de grande volume de óleo.

A principal vantagem destes em relação aos de grande volume de óleo é justamente na utilização de menor quantidade de óleo, cerca de 20% menos quando comparado um disjuntor das mesmas características (classe de tensão e capacidade de interrupção de curto circuito), tendo como desvantagem o fato de não ser adequado para utilização em sistemas de extra-alta tensão (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995). A figura 2.11 ilustra esse tipo de unidade interruptora.



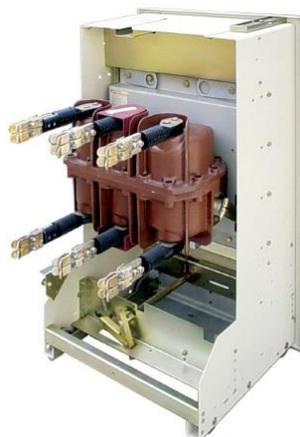
Disjuntor tipo HPTW - Sprecher

Figura 2.31 - Modelo de disjuntor a pequeno volume de óleo tipo HPTW – Fabricação Sprecher. Fonte: W Service (2004).

- Disjuntor a SF₆ (hexafluoreto de enxofre)

O gás SF₆ é um gás incolor, quimicamente estável e inerte e por ser um excelente meio isolante e possuir características favoráveis à interrupção de corrente elétrica, como grande capacidade de transferência de calor e a baixa temperatura de ionização, é utilizado em disjuntores de alta tensão. (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995).

Existem dois tipos de disjuntor a SF₆: Disjuntores de dupla pressão e disjuntores de pressão única. Nos disjuntores de dupla pressão, o SF₆ é armazenado em um recipiente e liberado sobre a região dos contatos principais do disjuntor e após passar pela câmara de extinção, o SF₆ é enviado para um reservatório de baixa pressão (COLOMBO, 1986). Os disjuntores de única pressão possuem tecnologia mais recente, a pressão necessária para a extinção do arco é produzido durante a operação de abertura do disjuntor por meio de um pistão solidário à haste do contato móvel que ao movimentar-se, comprime o gás dentro de uma câmara (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995). A figura 2.12 ilustra esse tipo de unidade interruptora.



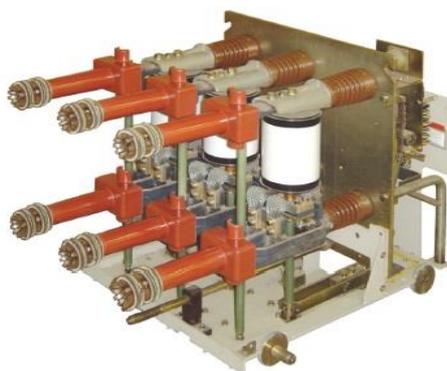
Disjuntor tipo Fluarc - Merlin Gerin

Figura 2.4 - Modelo de disjuntor a SF6 tipo Fluarc – Fabricação Merlin Gerlin. Fonte: W Service (2004).

- Disjuntor a vácuo

A extinção do arco elétrico nestes disjuntores se dá através da separação de um contato móvel de um contato fixo, dentro de um recipiente com vácuo. Nestes disjuntores, a ionização do dielétrico é caracterizada por um vapor metálico proveniente dos contatos do disjuntor e quanto mais rápido for a condensação deste vapor nas superfícies dos contatos, mais eficiente será o processo de interrupção (VORPE, KASTRUF, FRANÇA, 1995).

Os disjuntores a vácuo têm como vantagem apresentarem curto tempo de arco para qualquer capacidade de interrupção de curto-circuito, sendo aplicados geralmente em sistemas de média tensão. A figura 2.13 ilustra esse tipo de unidade interruptora.



Disjuntor tipo VGA - Toshiba

Figura 2.5 - Modelo de disjuntor a vácuo tipo VGA – Fabricação Toshiba. Fonte: W Service (2004).

2.5.2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Os transformadores de corrente são instrumentos cuja função principal é reproduzir em seu secundário um valor de corrente proporcional à do primário. No Brasil, conforme a norma NBR 6856/2015 esse valor geralmente é de 5 A, já na Europa esse valor é de 1 A (KINDERMANN, 2005).

A bobina primária do TC é ligada em série com a carga, como mostra a figura 2.14. Como a bobina está ligada em série com a carga, a corrente varia de acordo com a carga instalada, por isso o TC deve ser dimensionado para possuir um bom desempenho para um grau bem variado no valor da corrente (KINDERMANN, 2005).

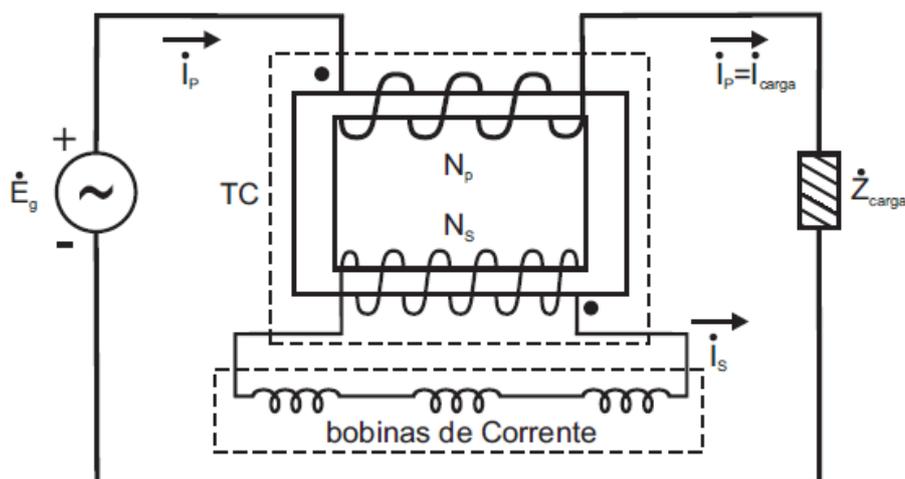


Figura 2.6 - Ligação do transformador de corrente. Fonte: Kindermann (2005).

Têm-se:

\dot{E}_g – Tensão do sistema;

\dot{I}_p - Corrente no primário;

\dot{I}_s – Corrente no secundário

N_p – Número de espiras do primário

N_s – Número de espiras do secundário

\dot{Z}_{carga} – Impedância da carga no sistema

Os TC se classificam em dois tipos (NBR 6856, 2015):

- TC para medição
- TC para proteção

Os TC para proteção se classificam, quanto à impedância, em duas classes:

- a) Classe A: São os TC que possuem alta impedância interna, ou seja, aqueles cuja reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor não desprezível em relação impedância total do circuito secundário.
- b) Classe B: São os TC que possuem baixa impedância interna, ou seja, aqueles cuja reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor desprezível em relação impedância total do circuito secundário (NBR 6856, 2015).

Além da classificação quanto à impedância, os TC são classificados quanto a sua forma construtiva:

- TC tipo bucha: Esse tipo de transformador de corrente tem como característica principal o fato de o secundário ser isolado e montado no núcleo e o primário ser constituído do próprio condutor fase do sistema elétrico (ARAÚJO, 2005). A figura 2.15 ilustra esse tipo de TC.

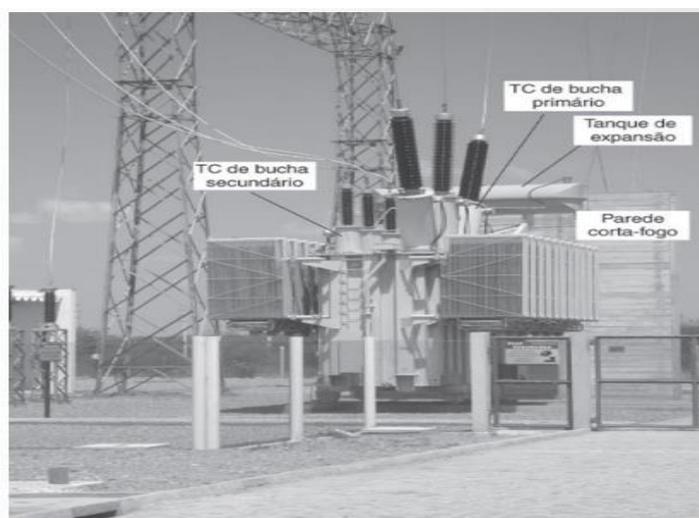


Figura 2.7 - TC tipo bucha. Fonte: Goes (2013).

- TC tipo janela: A construção desse tipo de transformador é semelhante ao transformador do tipo bucha, sendo a diferença principal entre eles o fato do tipo janela utilizar o ar como isolante entre o primário e o secundário (ARAÚJO, 2005). A figura 2.16 ilustra esse tipo de TC.



Figura 2.8 - TC tipo janela. Fonte: Araújo (2005).

- TC tipo barra: Para esse transformador, o primário e o secundário são geralmente isolados com resina epóxi e montados no núcleo. O primário é uma barra que é colocada dentro da janela do núcleo do transformador (ARAÚJO, 2005). A figura 2.17 ilustra esse tipo de TC.



Figura 2.17 - TC tipo barra. Fonte: Araújo (2005).

- TC tipo pedestal: Esse tipo de transformador tem tanto o primário quanto o secundário enrolados em um núcleo toroidal e ambos estão inseridos em um tanque isolado a óleo (ARAÚJO, 2005). A figura 2.18 ilustra esse tipo de TC.



Figura 2.18 - TC tipo pedestal. Fonte: Araújo (2005).

2.5.3 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Os transformadores de potencial são instrumentos cuja função principal é reproduzir em seu secundário um valor de tensão proporcional à do primário e com menor erro possível. No Brasil, segundo a norma NBR 6855/2009 esse valor é padronizado em 115 V (KINDERMANN, 2005).

A bobina primária do TP é ligada em paralelo com a carga, como mostra a figura 2.19 (NBR 6855, 2009).

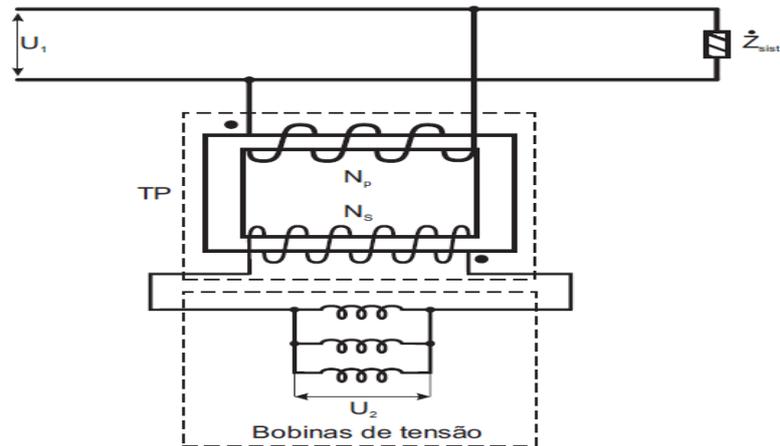


Figura 2.19 - Ligação do transformador de potencial. Fonte: Chemin (2008).

Têm-se:

\dot{U}_1 – Tensão no primário;

\dot{U}_2 – Tensão no secundário;

N_p – Número de espiras do primário;

N_s – Número de espiras do secundário;

\dot{Z}_{sist} – Impedância da carga do sistema

Basicamente existem dois tipos de TP:

- TP indutivo: São transformadores semelhantes aos transformadores de força convencionais, com diferença apenas na refrigeração, isolamento e pelo aspecto mecânico. Esse tipo de TP é aplicado geralmente em sistemas de baixa, alta e média tensão (APPLICATION GUIDE, 1995). A figura 2.20 ilustra esse tipo de TP.



Figura 2.9 - TP indutivo. Fonte: Artech (2015).

- TP capacitivo: É um transformador basicamente constituído por um TP convencional onde o primário tem um divisor de tensão capacitivo . Esse tipo de transformador é utilizado em sistemas de extra-alta tensão devido à classe de isolamento utilizada nos TP indutivos (ARAÚJO, 2005). A figura 2.21 ilustra esse tipo de TP.



Figura 2.10 - TP capacitivo. Fonte: Artech (2015).

2.5.4 ALIMENTAÇÃO AUXILIAR

Algumas cargas prioritárias como, tomadas de uso geral, iluminação, ar condicionado, equipamentos de comunicação, controle e proteção e etc.,

instaladas nas subestações e usinas geradoras de energia elétrica são supridas em corrente contínua (ARAÚJO, 2005).

Essas cargas são alimentadas por um transformador denominado Transformador de Serviço Auxiliar que é conectado a um retificador/carregador do banco de baterias, conforme figura 2.22, que em condições normais de fornecimento de energia elétrica, alimentará as cargas em CC. Em caso de falha no fornecimento de energia, um sistema automático retira o retificador/carregador e então o banco de baterias torna-se responsável por suprir as cargas prioritárias em corrente contínua (ARAÚJO, 2005).

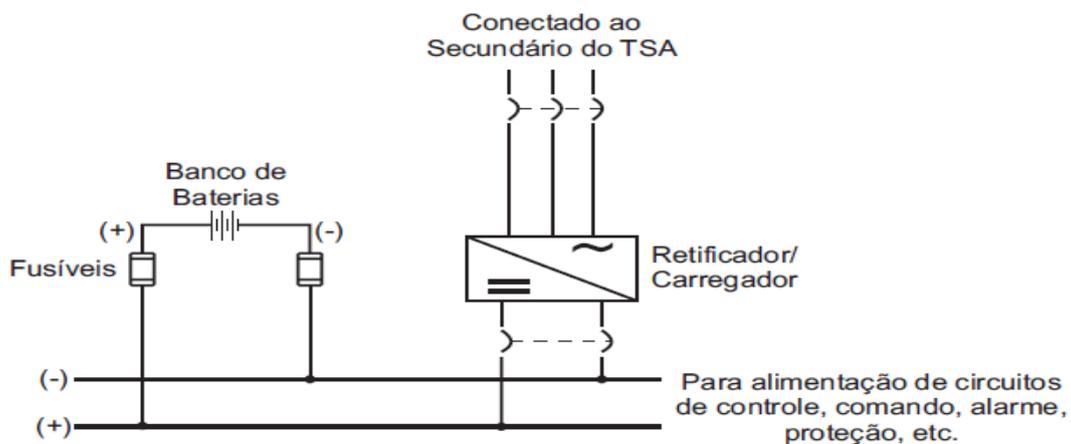


Figura 2.11 - Conexão para a alimentação auxiliar. Fonte: Araújo (2005).

Em geral, as baterias são do tipo chumbo-ácido e fornecem aproximadamente 2,2V cada uma. Como a alimentação nas subestações usualmente é em 125V, torna-se necessário um arranjo em série de aproximadamente 60 baterias para se chegar no valor desejado (ARAÚJO, 2005). A figura 2.23 ilustra a ligação desses elementos.

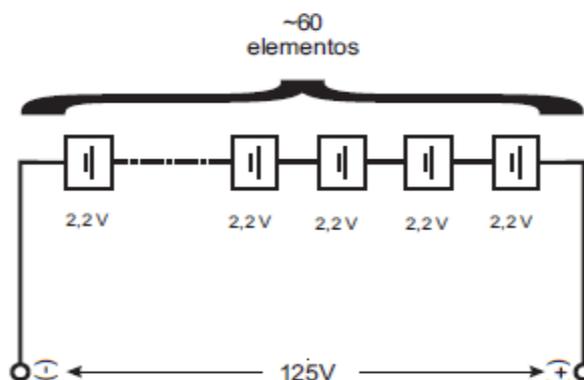


Figura 2.12 - Ligação do banco de baterias. Fonte: Araújo (2005)

2.5.5 RELÉS

De acordo com as definições técnicas normativas (IEC 60255 – *Measuring relays and protection equipment*), relés são dispositivos projetados para operar quando uma grandeza monitorada atinge determinado valor. Relés podem ser classificados de diversas maneiras, como por exemplo: quanto à grandeza de atuação (corrente tensão, frequência, etc.), forma de conectar ao circuito (primário/ secundário), forma construtiva (eletromecânicos, digitais, estáticos, etc.), temporização (temporizados e instantâneos), quanto à função (sobrecorrente, direcional, diferencial, etc.) e característica de atuação (normal inverso, muito inverso, etc.) (MARDEGAN, 2010).

A função dos relés aplicados ao processo de proteção é de retirar de operação algum elemento que esteja operando de modo inadequado. Assim sendo, os relés devem propiciar as seguintes características funcionais essenciais a um sistema de proteção: Sensibilidade, seletividade, velocidade de atuação e confiabilidade (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011).

A origem dos relés remonta ao ano de 1830, no qual o cientista norte americano Joseph Henry observou e estudou os fenômenos eletromagnéticos chamados autoindutância e indutância mútua durante suas pesquisas com eletroímãs, concebendo poucos anos depois os primeiros modelos de relés eletromecânicos, cujo princípio de funcionamento baseava-se em sua recente descoberta (MARDEGAN, 2010). Esse tipo de relé era construído utilizando forças que eram produzidas pela interação eletromagnética entre correntes e fluxos (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011).

Com a expansão dos SEP, deu-se início ao desenvolvimento de relés que utilizam dispositivos semicondutores, surgindo assim os relés de estado sólido ou estáticos. Esse desenvolvimento ocorreu principalmente devido a necessidade que os sistemas fossem mais confiáveis e com elevado desempenho (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011).

Com a expansão da tecnologia digital, iniciou o desenvolvimento dos relés digitais cujo gerenciamento é feito por um microprocessador específico, controlado por um *software* no qual dados de entrada são digitalizados (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011).

A seguir serão detalhados esses três principais tipos de relés utilizados para proteção de sistemas elétricos de potência:

2.5.5.1 Relés Eletromecânicos

A tecnologia dos relés eletromecânicos foi a primeira a surgir na área de relés de proteção e serviu como base para as demais que vieram com o passar dos anos. Esse tipo de relé foi projetado com predominância dos movimentos mecânicos devido aos acoplamentos elétricos e magnéticos. Seu princípio de funcionamento envolve valores de entradas, geralmente tensão e corrente, e sua saída que são contatos abertos ou fechados (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011). Em relação ao funcionamento, os relés eletromecânicos são divididos em dois principais tipos (KINDERMANN, 2005):

- Atração magnética

São os relés mais simples e funciona do mesmo modo que um eletroímã, ou seja, sempre um êmbolo ou uma alavanca será movimentado. Esses relés se subdividem em dois tipos (KINDERMANN, 2005):

- Relé de êmbolo: São relés que atuam quando energizados com uma corrente acima de seu ajuste. Essa corrente passa pela bobina de magnetização produzindo um campo magnético que atrai um êmbolo, então o contato normalmente aberto comuta mudando de posição e ativa a abertura do disjuntor (KINDERMANN, 2005). A figura 2.24 mostra um esquemático das partes componentes desse relé.

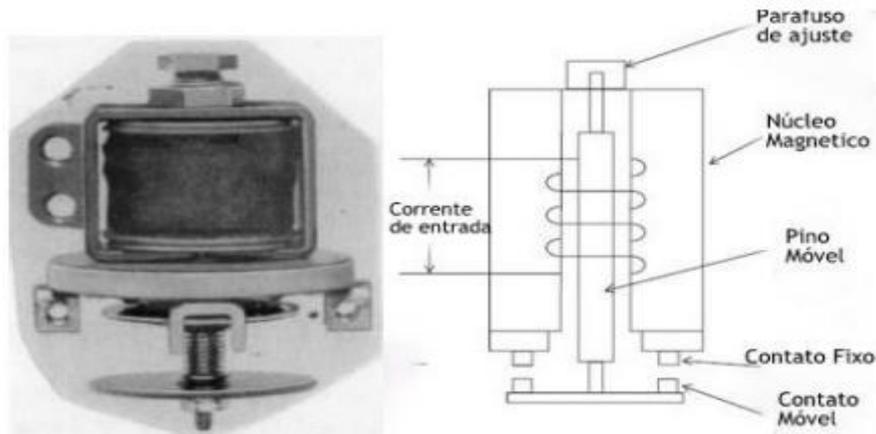


Figura 2.13 - Relé de êmbolo. Fonte: Hewitson, Brown, Balakrishnan (2004).

- Relé de alavanca: Esse tipo de relé possui uma armadura magnética móvel envolvendo um eixo que é colocado na sua aresta inferior, fechando assim um circuito magnético que será estabelecido pela passagem de corrente elétrica na bobina localizada em oposição à armadura. Então quando a armadura é atraída, um contato é atraído juntamente e este irá ao encontro de um outro contato fixo e posicionado no local onde se encontra bobina (ELMORE, 2004). A figura 2.25 mostra um esquemático das partes componentes desse relé.

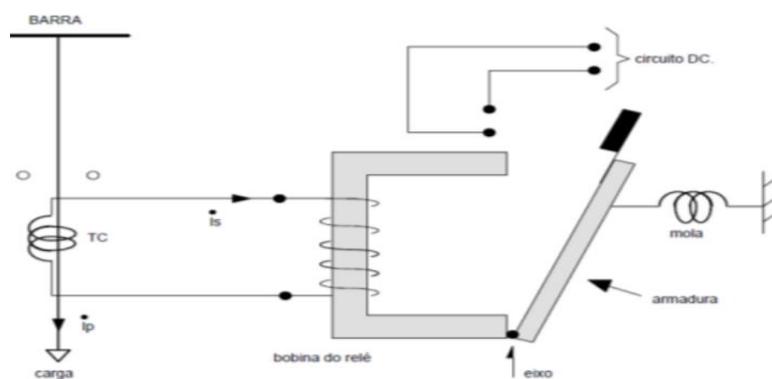


Figura 2.14 - Relé de alavanca. Fonte: Hewitson, Brown, Balakrishnan (2004).

- Indução Magnética

Relés de indução magnética utilizam o mesmo princípio de funcionamento de um motor elétrico para o operarem, no qual um motor

(tambor ou disco) gira e esse giro produz o fechamento do contato normalmente aberto do relé. Existem vários tipos de relés que utilizam a indução magnética como princípio de funcionamento, os dois principais tipos serão detalhados a seguir (KINDERMANN, 2005):

- Relé de disco de indução: Esse relé possui um disco condutor que se move por indução ao redor de um eixo no entreferro de um núcleo magnetizado pela passagem de corrente elétrica na bobina que o envolve. Fixo ao mesmo eixo, existe um contato que se move em direção a outro fixo na estrutura do relé (ELMORE, 2004). A figura 2.26 mostra um esquemático das partes componentes desse relé.

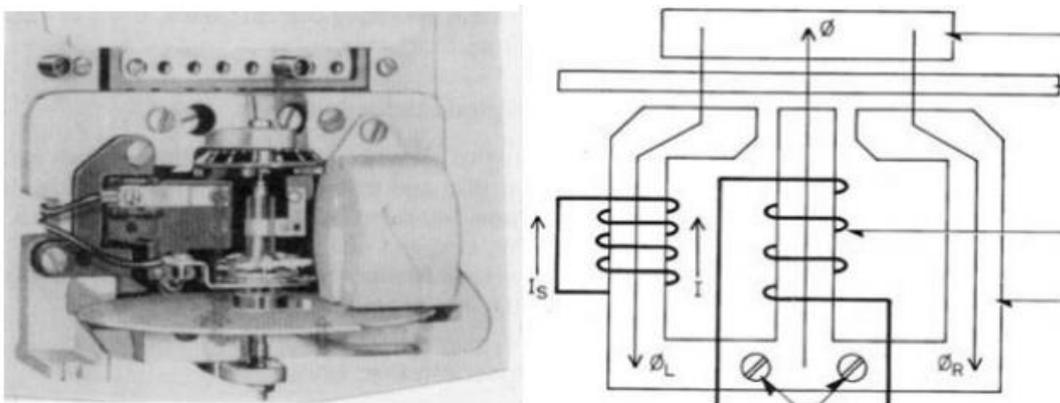


Figura 2.15 - Relé de disco de indução. Fonte: Hewitson, Brown, Balakrishnan (2004).

- Relé cilindro de indução: Nesse tipo de relé, suas bobinas estão colocadas espacialmente a 90° para poder funcionar com máximo torque. Esse torque gira o cilindro de alumínio e como os contatos do relé são solidários ao eixo o cilindro, com o giro fecham-se os contatos do relé (KINDERMANN, 2005). A figura 2.27 mostra um esquemático das partes componentes desse relé.

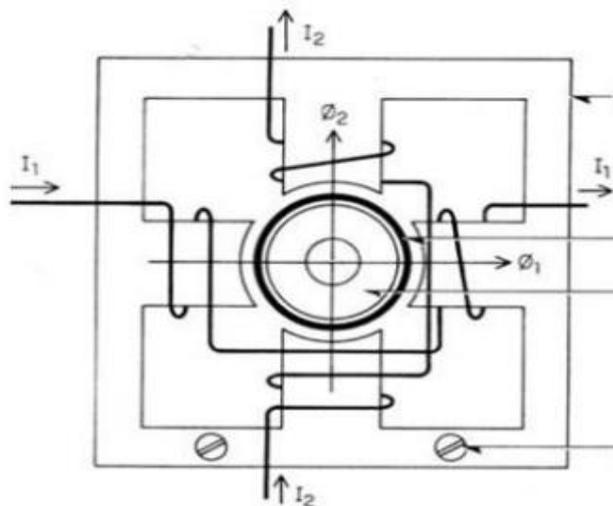


Figura 2.27 - Relé cilindro de indução. Fonte: Hewitson, Brown, Balakrishnan (2004).

2.5.5.2 Relés Estáticos

Os relés estáticos surgiram no ano de 1960 e foram sendo utilizados cada vez mais com o passar dos anos (ANDERSON, 1999). O termo estático é devido à comparação com os relés eletromecânicos que tem partes móveis ao contrário dos estáticos que não possuem (KINDERMANN, 2005). Em relação à utilização, os relés estáticos são aplicados de igual maneira aos eletromecânicos, pois possuem todas as características e funções presentes nos relés convencionais. (Coury, Oleskovicz, Giovanini, 2011).

A utilização dos relés estáticos resulta em sistemas de proteção com maior sensibilidade e velocidade em comparação aos eletromecânicos. Quase todos os relés estáticos são resistentes a choques mecânicos e a maioria possui alta velocidade de operação. Além disso, possuem menos manutenção e são menores fisicamente em relação aos eletromecânicos (ANDERSON, 1999).

Como desvantagem, são suscetíveis a transitórios de pequenas magnitudes o que causa maior cuidado na sua instalação. Além disso, são mais sensíveis às temperaturas e por isso operam em faixas de temperaturas menores do que os relés eletromecânicos (ANDERSON, 1999). A figura 2.28 ilustra esse tipo de relé.



Figura 2.28 - Relés Estáticos. Fonte: Rush (2011).

2.5.5.3 Relés Digitais

Os relés digitais são relés eletrônicos controlados por microprocessadores que são específicos para esta finalidade, onde sinais de entrada (tensão e corrente) são controlados por software que processa a lógica da proteção via um algoritmo. Além da sua principal função que é a proteção, os relés digitais ainda podem exercer outras funções como, por exemplo, medições de suas grandezas de entrada (KINDERMANN, 2005).

Os relés digitais surgiram na década de 60 quando os computadores começaram a substituir muitas das ferramentas de análise na área de sistema de potência (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011).

A partir dos anos 2000, os novos projetos de subestações já fazem uso exclusivo de relés digitais para a proteção dos sistemas, assim como os relés eletromecânicos e de estado sólido estão sendo gradativamente substituídos pelos digitais (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011).

De maneira geral, os relés digitais podem ser divididos em várias lógicas de blocos, conforme mostra a figura 2.29. Os principais blocos serão detalhados a seguir:

- Transformadores de entrada: Atenuam as tensões e correntes de entrada para níveis adequados aos microprocessadores, além de

permitir a isolamento galvânica entre os relés de proteção e os sinais dos TCs e TPs.

- Filtros Analógicos: São filtros passa baixa cuja função é evitar erros no processamento digital dos sinais.
- Dispositivo *Sample and Hold*: Ao mesmo instante, esse dispositivo consegue mostrar as entradas analógicas e disponibilizar os sinais ao multiplexador.

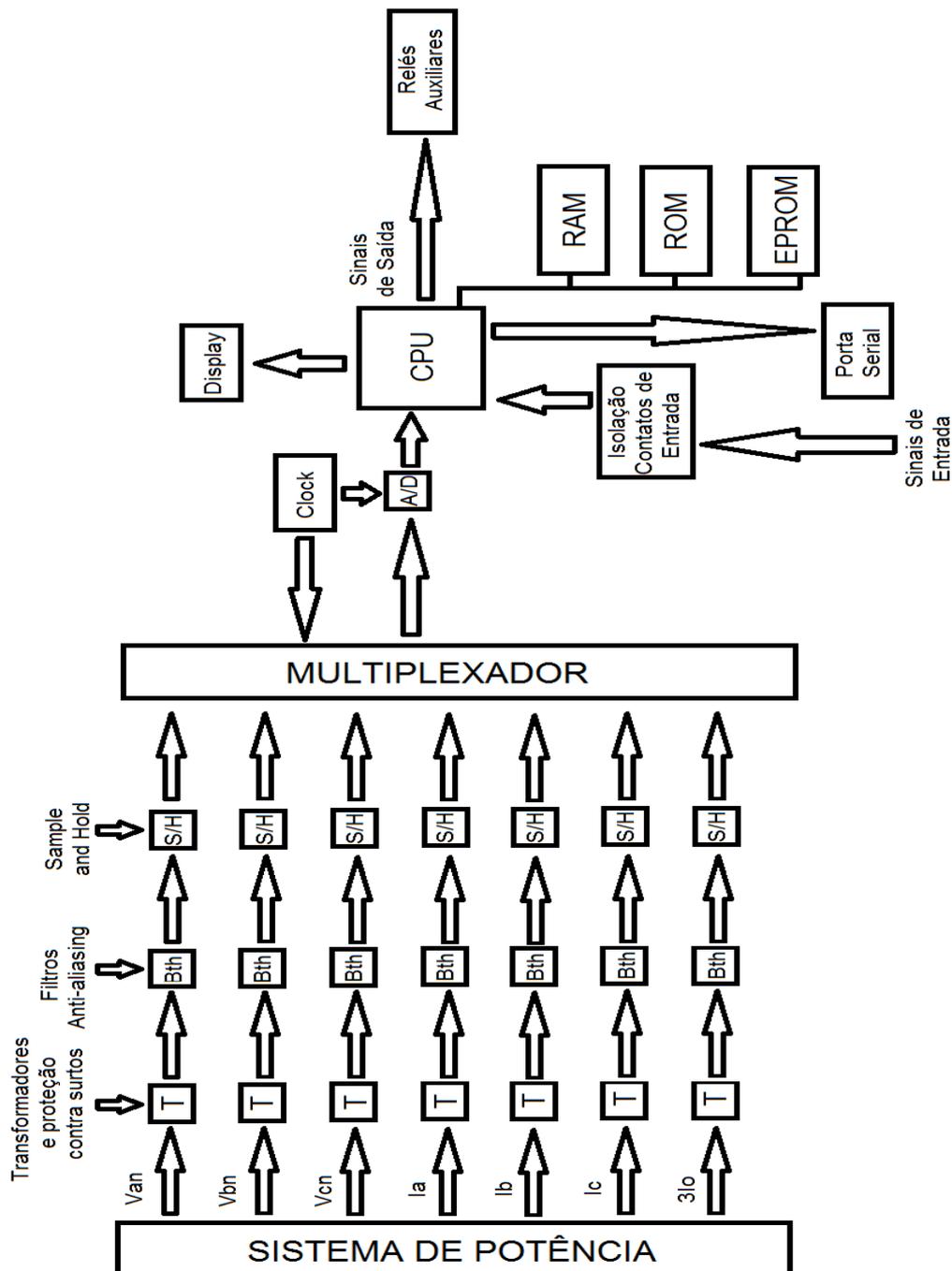


Figura 2.29 - Principais blocos de um relé digital. Fonte: Coury, Oleskovicz, Giovanini (2011).

- Multiplexador: Possibilita que seja utilizado apenas um conversor A/D (analógico – digital) para várias entradas analógicas.
- Conversor A/D: Tem a função de converter sinais analógicos para a forma digital.
- Módulo de entrada lógica: Informa à CPU sobre o estado de disjuntores, chaves e seccionadoras.
- CPU: Tem a função de controlar o relé, fazendo filtragem digital dos sinais para a extração do componente fundamental.
- Memória ROM: Armazena o *software* lógico do relé.
- Memória RAM: Armazena quantidade e operações intermediárias no algoritmo do relé.
- Memória E2PROM: Armazena os ajustes do relé.
- Módulo de saída lógica: Responsável pelas atuações de disjuntores (COURY, OLESKOVICZ, AGGARWAL, 2011).

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Esta seção do trabalho apresentará os passos envolvidos na análise do comportamento do sistema, sob o ponto de vista da proteção, utilizando o *software CAPE*. O principal objetivo aqui é desenvolver uma diretriz documentada, que mostrará de forma prática como inserir no *software* os parâmetros elétricos construtivos dos equipamentos que compõem o sistema elétrico e sua proteção, simular o objeto de estudo e em sequência realizar a análise dos resultados providos pelo modelo computacional e finalmente confrontando-os com resultados típicos obtidos por métodos analíticos tradicionais.

3.1 INICIANDO O CAPE

Após a instalação, para iniciar o programa, é necessário clicar o arquivo executável *CAPE Executive* localizado no diretório definido em *default*: Iniciar>Todos os Programas>*Cape*>*CAPE Executive*, ou através do diretório escolhido pelo usuário.

Após a inicialização do *software*, é necessário carregar uma base de dados para que todas as funções do *CAPE* sejam executadas corretamente, clicando em *Attach Database* na barra de opções como mostra a figura 3.1 abaixo.

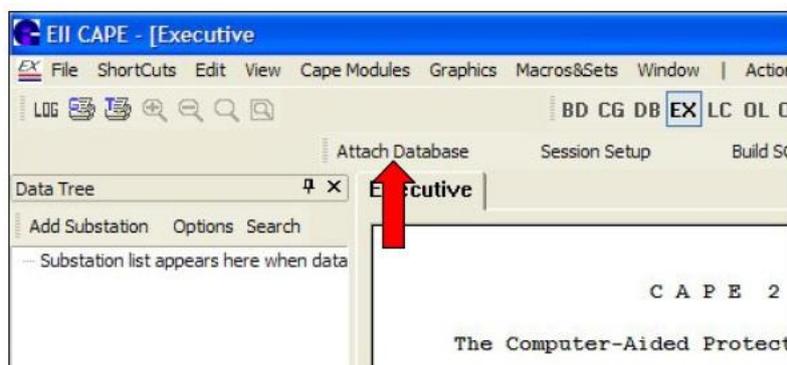


Figura 3.1 - Carregando base de dados do CAPE. Fonte: Eletrocon (2016).

Depois de selecionada a opção descrita, na sequência, uma janela de pesquisa padrão do *Windows* será exibida, este é o momento no qual é necessário inserir o endereço de localização do arquivo que contém nossa base de dados. Basta selecionar no campo de pesquisa o diretório *C:\cape\dat\cape.gdb* como mostra a figura 3.2. Este é um arquivo típico de base de dados que contém cerca de 100 barramentos.

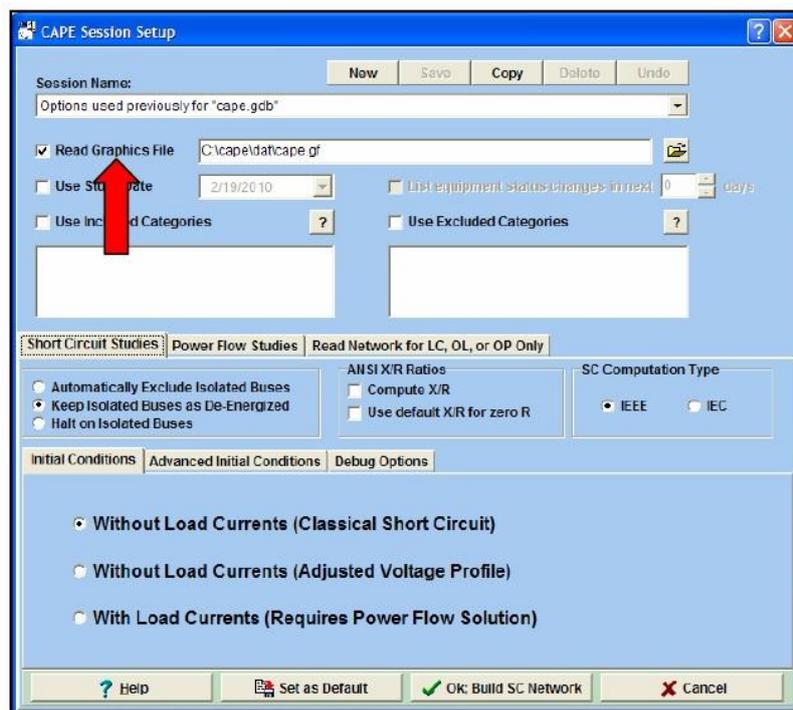


Figura 3.2 - Seleção da base de dados. Fonte: Eletrocon (2016).

É importante destacar que deve-se informar ao *CAPE* que carregue os diagramas do sistema contido na base de dados, selecionando a marcação na caixa *Read Graphics File*. Se o arquivo não for carregado automaticamente, será necessário localizar seu diretório manualmente através do endereço: *\cape\dat\cape.gf* e em sequência executar o comando *Open*. Após executados estes comandos, o *CAPE* irá ler os dados contidos no arquivo carregado.

3.1 ELEMENTOS INTERFACE

A interface do *CAPE* é de certa forma simples e intuitiva, seu perfil não apresenta grandes dificuldades ao usuário. Pode ser dividida em seis principais

elementos: *Toolbar*, *Data Tree*, *Text Área*, *Graphics Área*, *Command Line* e *Status Bar* como exemplifica a figura 3.3.

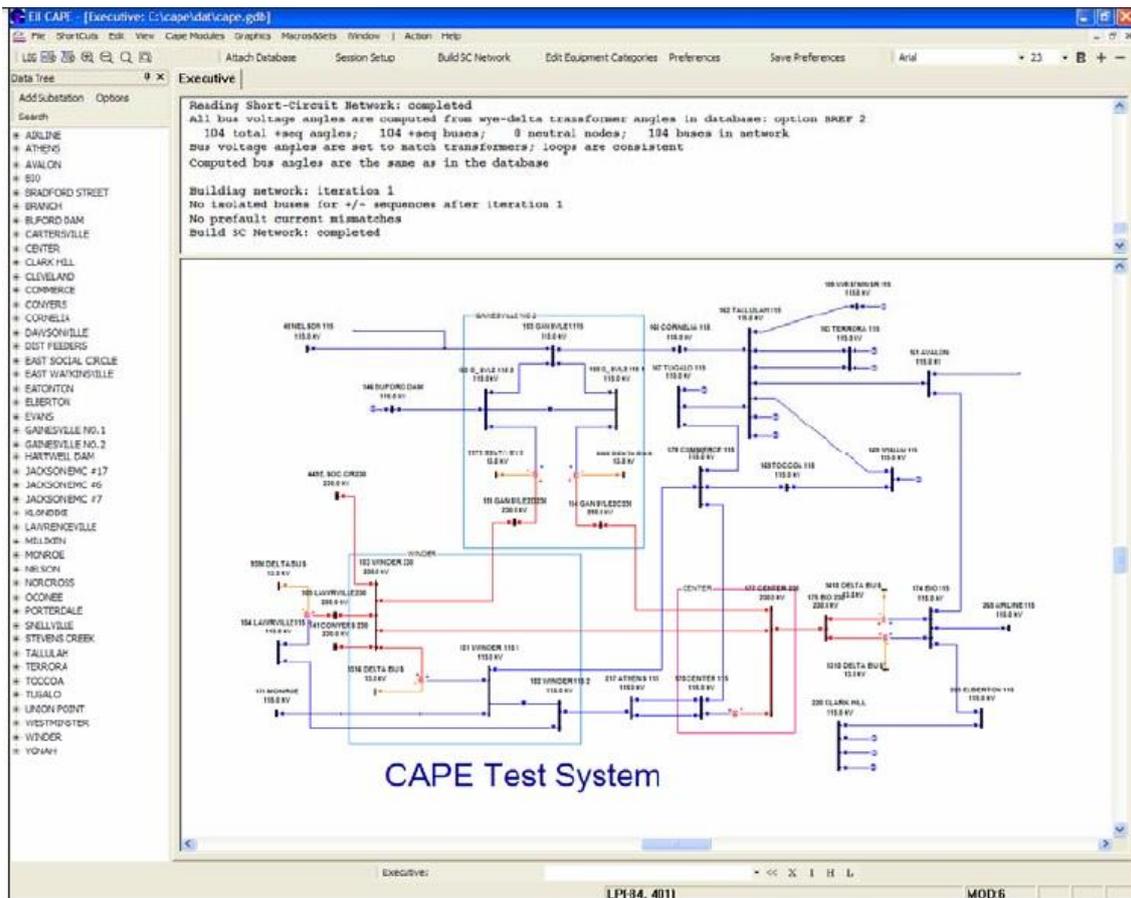


Figura 3.3 - Tela inicial do CAPE. Fonte: Eletrocon (2016).

- *Toolbar*: O menu principal do programa que contém as funções gerais como abrir arquivo, salvar arquivo, ajuda etc., está localizado na parte superior da tela, logo acima da barra de ferramentas. Esta barra por sua vez contém a maioria dos comandos utilizados com maior frequência durante a operação do CAPE, os comandos localizados na parte direita da barra de ferramentas são de natureza específica, podendo variar de acordo com cada módulo do CAPE utilizado.
- *Data Tree*: Esta coluna localizada na parte esquerda da tela do CAPE é um mecanismo de pesquisa que permite o acesso de forma rápida e prática todos os dados carregados a partir da nossa base de dados.

- *Text Area*: Elemento de interface localizado na parte superior da tela, logo abaixo a barra de ferramentas, destinado a mostrar todas as mensagens de saída do programa em formato texto.
- *Graphics Area*: Elemento de interface localizado na parte central da tela, projetado para exibir o diagrama unifilar do sistema, em conjunto com outros dados pertinentes para a sua análise, como por exemplo, características elétricas dos relés e outros equipamentos que compõem as linhas de transmissão e o circuito de proteção.
- *Command Line*: A linha de comandos é projetada para oferecer ao usuário um canal rápido de comunicação e execução de comandos com o *software*.
- *Status Bar*: A barra de *status* localiza-se na parte inferior da tela, tem a função de informar ao usuário qual o arquivo gráfico e base de dados estão sendo carregados e utilizados durante a operação do programa.

3.2 INSERÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NO CAPE

Com o sistema a ser estudado já definido, é preciso adicionar os equipamentos que o compõe. O *software CAPE* permite a adição dos principais componentes dos sistemas de proteção: Transformadores para instrumentos, relés, subestações, linhas de transmissão, barramentos, transformadores de força, geradores e disjuntores. Essa adição de componentes é realizada através do módulo *One-Line*, e a simbologia dos equipamentos é apresentada na figura 3.4.

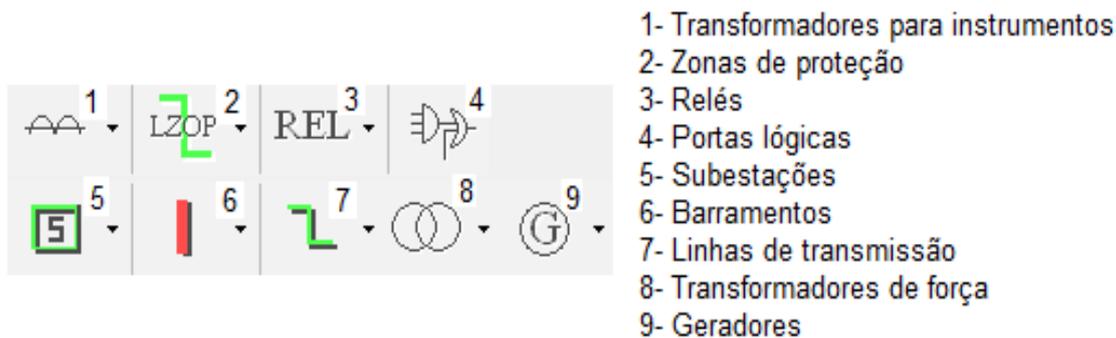


Figura 3.4 – Equipamentos disponíveis no *software CAPE*. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3 ADIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS EQUIPAMENTOS

Assim que os equipamentos estiverem sendo adicionados no módulo *One Line*, o *software* solicitará ao usuário os parâmetros para cada componente do sistema a fim de representar seus principais aspectos funcionais. Cada equipamento tem sua particularidade no momento da inserção dos parâmetros, que serão detalhadas nos itens a seguir.

3.3.1 SUBESTAÇÕES

Para o *CAPE*, as subestações são os locais onde os barramentos e LZOPS estão associados, tornando mais fácil e natural encontrá-los. Sua adição ao sistema simulado é opcional somente quando não forem ser adicionados equipamentos de proteção. É obrigatória sua adição quando forem utilizados relés nas simulações, pois como será abordado nos próximos tópicos, todo relé precisa de uma zona local de proteção (LZOP) e esta deve estar contida nas subestações.

Inserido a subestação, o *software* solicitará apenas que a nomeie, conforme mostra a figura 3.5.

Figura 3.5 - Adição de subestações no *software CAPE*. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3.2 BARRAMENTOS

Para adicionar os barramentos no esquema a ser simulado, é necessário inserir os seguintes parâmetros conforme ilustra a figura 3.6:

- Número do barramento: Tem a função de tornar mais fácil sua identificação no sistema.
- Nome do barramento: Assim como o número, tem a função apenas de identificação.
- Tensão base em kV: Tensão em kV do barramento adicionado.
- Subestações: Em caso de existência destas, é possível associá-las ao barramento.
- Tipo: Se o barramento possuir disjuntores, é recomendado escolher um dos tipos reais. Caso contrário, pode-se escolher um dos tipos fictícios. Convencional é padrão de barramento do *CAPE*.

Figura 3.6 - Adição de barramentos no *software CAPE*. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Após a inserção das linhas de transmissão no esquema a ser simulado, é necessário inserir os seguintes parâmetros como mostra a figura 3.7.

- Número do circuito: Analogamente aos barramentos, tem a função apenas de identificar a linha de transmissão.
- Comprimento da linha: Extensão da LT em Km.
- *Series Zkm*: Resistência e reatância da LT na sequencia positiva e negativa em p.u., ohms ou em porcentagem.

The screenshot shows the 'Line Data: Add' dialog box. The 'Impedance Data' tab is selected. The 'Impedance Unit' is set to 'Per Unit' and 'Impedance Source' is 'Manual Entry'. A red box highlights the 'Line Length' field (0) and the 'Kilometers' dropdown. Another red box highlights a table of impedance parameters for three sequences: + Sequence, 0 Sequence, and - Sequence. The table has columns for Series Zkm (R, X) and Shunt Yk (G, B) for both positive and negative sequences.

	Series Zkm (p.u.)		Shunt Yk (p.u.)		Series Zkm (p.u.)		Shunt Ym (p.u.)	
	R	X	G	B	R	X	G	B
+ Sequence	0	0	0	0	0	0	0	0
0 Sequence	0	0	0	0	0	0	0	0
- Sequence	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.7 - Adição de linhas de transmissão no *software* CAPE. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3.4 GERADORES

Após a inserção dos geradores, é preciso adicionar as seguintes informações no *software*, como pode ser observado na figura 3.8:

- Número do Barramento: Barramento cujo gerador está conectado.
- Potência do Gerador: Potência em MVA do gerador adicionado.
- Tensão do Gerador: Tensão em kV do barramento que o gerador está conectado.
- *Series Zkm*: Impedância subtransitória de sequência positiva, negativa e zero.

The screenshot shows the 'Generator Data: Add' dialog box. The 'Impedance' section is expanded, showing the following data:

	Resistance	Reactance	
Positive Sequence	0,00000	0,00000	Subtransient (X''d)
		0,00000	Transient (X'd)
		0,00000	Synchronous (Xd)
Negative Sequence	0,00000	0,00000	
Zero Sequence	0,00000	0,00000	

Figura 3.8 - Adição de geradores no software CAPE. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3.5 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Adicionando os TCs no sistema, automaticamente disjuntores aparecerão no esquema, pois estes são necessários quando qualquer componente de proteção é adicionado, feito isso, é necessário preencher os seguintes parâmetros dos TCs conforme mostra a figura 3.9.

- Nome do TC: Como nos equipamentos anteriores, tem a função de identificar o equipamento.
- Relação de transformação: Informar a corrente no primário do TC e a corrente do secundário (1 A ou 5 A).
- Conexão elétrica: Delta ou estrela.
- Variedade de TC: No catálogo interno do *CAPE*, existem alguns TCs com relação de transformação definida pelo próprio fabricante e embora não seja um item de adição obrigatória, é interessante que seja adicionado para aproximar o sistema da realidade.
- Polaridade: Positiva ou negativa.

Figura 3.9 - Adição dos transformadores de corrente no *software CAPE*. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3.6 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Assim como para os TCs, ao adicionar os TPs automaticamente disjuntores aparecerão no esquema, caso estes ainda não estejam inseridos. É necessário preencher os seguintes parâmetros dos TPs conforme a figura 3.10 ilustra:

- Conexão elétrica: Delta ou estrela.

- Os enrolamentos: O *CAPE* permite adicionar valores de um enrolamento primário e vários enrolamentos secundários.

The screenshot shows the 'VT Data: Add' window with the following details:

- Primary Winding:**
 - VT Primary Name: TP
 - Near Bus: 1 Barramento E 440 kV
 - VT Location: BUS 1 Barramento E
 - VT Catalog Style: [Dropdown]
 - Primary Tap: 440000
 - Primary Connection: Wye
 - Primary Tag: [Field]
 - In Service Date: [Field]
 - Out of Service Date: [Field]
- Secondary Windings:**

Name	Tap	Connection
3V0	115	Wye
- Selected VT Secondary:**
 - Secondary Tag: 0
 - Name: 3V0
 - Style: [Dropdown]
 - Tap Used: 115,00 (=3826,09/1)
 - Connection: Wye
 - Primary Phase Lead: 0 Degrees

Figura 3.10 - Adição dos transformadores de potencial no *software CAPE*. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3.7 ZONAS LOCAIS DE PROTEÇÃO (LZOP)

Antes de inserir os relés, é necessário adicionar as zonas locais de proteção (LZOP), que apesar de ser um conceito desenvolvido pelo *software*, desempenham funções fundamentais na organização do *CAPE* como, por exemplo:

- Fornecem um agrupamento de dispositivos de proteção dentro de uma subestação;
- Fornecem informação ao *CAPE* quando os disjuntores abrem;
- Informam quais partes do sistema têm a responsabilidade primária de proteção.

Após escolher o local da LZOP e adicioná-la ao esquema a ser simulado, o *CAPE* automaticamente preenche sua localização (LZOP ID),

bastando apenas inserir um nome para a zona local de proteção, conforme ilustra a figura 3.11.

The screenshot shows a dialog box titled "Local Zone of Protection Data: Add". It has a standard Windows-style title bar with a close button (X) and a "Original" button. Below the title bar are several fields and buttons:

- Substation:** West
- Tag:** 0
- LZOP Type:** (empty field) with a "Convert to MISC LZOP" button next to it.
- LZOP ID:** From: (100 West HV 230kV) To: (101 EastHV) Cir: 1. This field is highlighted with a red box. A "Change Location" button is to its right.
- LZOP Name:** East 230 kV, Line L_1234. This field is also highlighted with a red box.
- LZOP Logic Expression:** (empty dropdown menu)
- Limiting Relay Loadability:** (empty field) and **Unit:** (empty dropdown menu)

At the bottom of the dialog box, there are several tabs: "Devices", "LZOP Description", "Real Breakers", "Logic Expansion", and "Tools". The "LZOP Description" tab is currently selected, and the main area below the tabs is empty.

Figura 3.11 - Adição das LZOPs no *software CAPE*. Fonte: Eletrocon (2016).

3.3.8 RELÉS

Como mencionado no tópico anterior, antes de adicionar qualquer relé, é necessário que exista ao menos uma LZOP no sistema. Ao ser adicionado, será preciso nomeá-lo a fim de facilmente ser localizado, associá-lo a uma LZOP e escolher o modelo de acordo com o fabricante, conforme ilustra a figura 3.12. O *CAPE* possui em sua base de dados um grande número de fabricantes e de modelos disponíveis para serem usados na simulação, como pode ser observado na figura 3.13.

Figura 3.12 - Adição dos relés no software CAPE. Fonte: Eletrocon (2016).

Category	Relay Type	Relay Model	Relay Style
FABBRICA ITALIANA	SEL-221C	SEL-321	SEL-321-1_1A
FEDERAL PACIFIC	SEL-221D		SEL-321-1_5A
GEC ALSTHOM	SEL-221F		SEL-321-5_1A
GEC Measurements	SEL-221G		SEL-321-5_5A
GENERAL ELECTRIC	SEL-221H		
Generic	SEL-251		
INEPAR	SEL-279H		
PEXTRON	SEL-2PG10		
RADE KONCAR	SEL-311		
REYROLLE	SEL-321		
SCHWEITZER	SEL-351		
SIEMENS	SEL-501		
SPRECHER & SCHUH	SEL-551		

Figura 3.13 - Biblioteca de relés disponíveis no software CAPE. Fonte: Eletrocon (2016).

Após selecionar o relé desejado, é possível configurá-lo de acordo com as necessidades de cada sistema. O CAPE disponibiliza todas as configurações disponíveis para cada relé, tornando a simulação próxima ao encontrado na prática. Para que sejam mostrados todos os parâmetros do

modelo selecionado, basta selecionar a opção “*View Data*” e uma janela semelhante a da figura 3.14 será apresentada ao usuário. Nesta janela, é possível analisar e parametrizar todas as funções do relé e estas estão divididas nos seguintes tipos:

- IOC: Sobrecorrente instantânea
- DIST: Distância
- TOC: Sobrecorrente tempo defasado
- DIR: Direcional (tensão ou corrente)
- TIMER: Tempo
- VOLT: Sub ou sobretensão
- CDIFF: Corrente diferencial

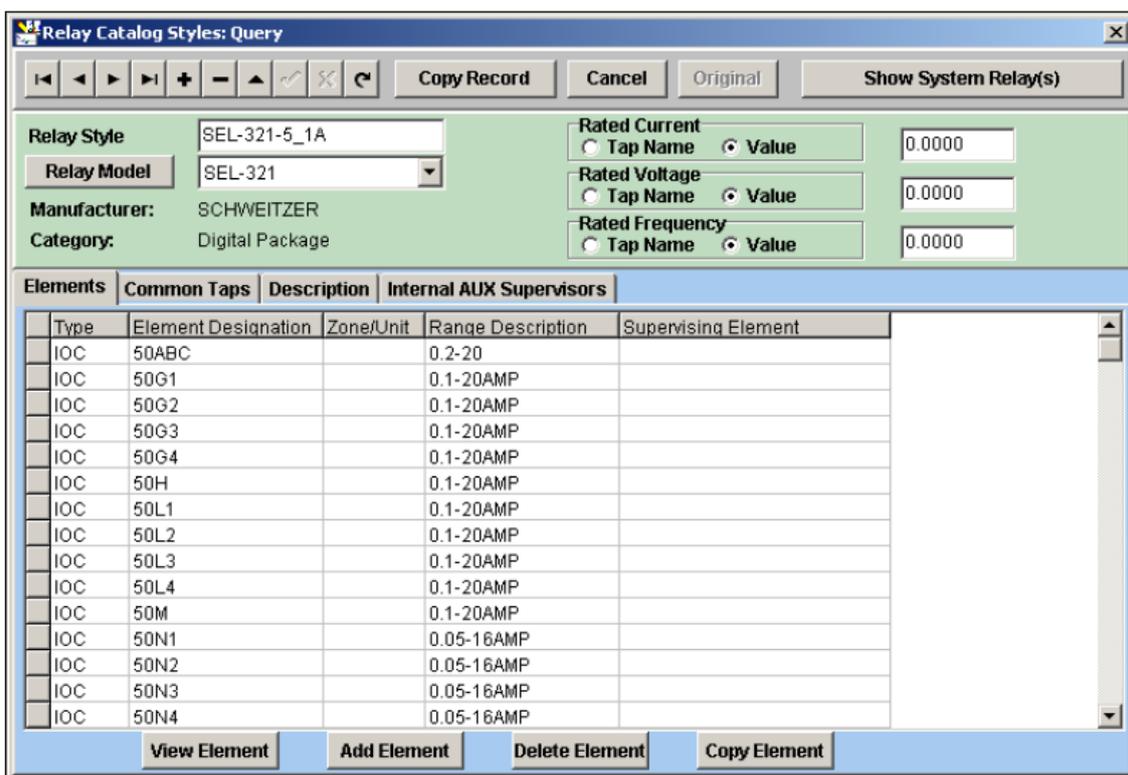


Figura 3.14 - Parametrização dos relés no CAPE. Fonte: Eletrocon (2016).

3.4 APLICANDO UMA FALTA NO SISTEMA

O cálculo de correntes de curto-circuito é extremamente importante para o dimensionamento e calibração de um sistema de proteção. O *software CAPE* é uma ferramenta recorrente nesse caso, através da qual o engenheiro de

proteção é capaz de analisar rapidamente qualquer condição de falta imposta sob o sistema simulado. Falhas simétricas ou assimétricas em qualquer uma das três fases, com ou sem impedância de aterramento e até mesmo faltas entre diferentes níveis de tensão e faltas simultâneas.

Depois de concluída a modelagem do sistema no módulo *One Line*, é possível começar com a definição e aplicação das faltas no módulo *Short Circuit*, nesse módulo, o *CAPE* permite definir qualquer falta que possa ser representada em termos de conexões entre pares de barramentos.

3.4.1 FALTA EM BARRAMENTO

Para aplicar uma falta em um barramento do sistema basta clicar com o botão direito sobre o elemento no diagrama unifilar e escolher as opções: *Faults>Other Faults* e em seguida selecionar o tipo de falta que deseja aplicar ao barramento, configurando suas fases e valores de impedância, caso esta exista. A figura 3.15 exemplifica essa situação.

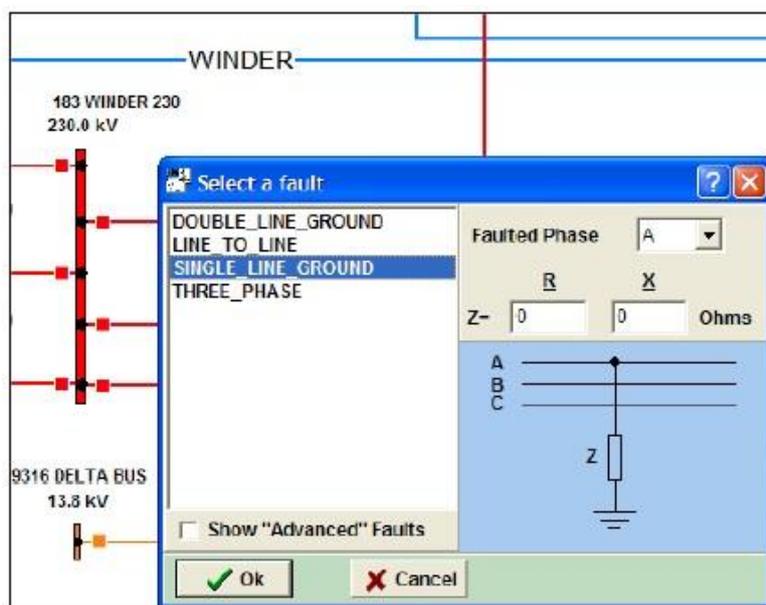


Figura 3.15 - Escolha do tipo de falta e da impedância. Fonte: Eletrocon (2016).

Para visualizar as correntes de falta no diagrama, é preciso clicar na sua área de representação, mas não diretamente sobre seus elementos (linhas, barramentos etc.). Na sequência selecionando a opção: *Change displayed text*

e finalmente a opção: *Show Phase A and Zero Sequence Currents*. O resultado mostrado pelo programa deverá ser semelhante ao exemplo representado na figura 3.16.

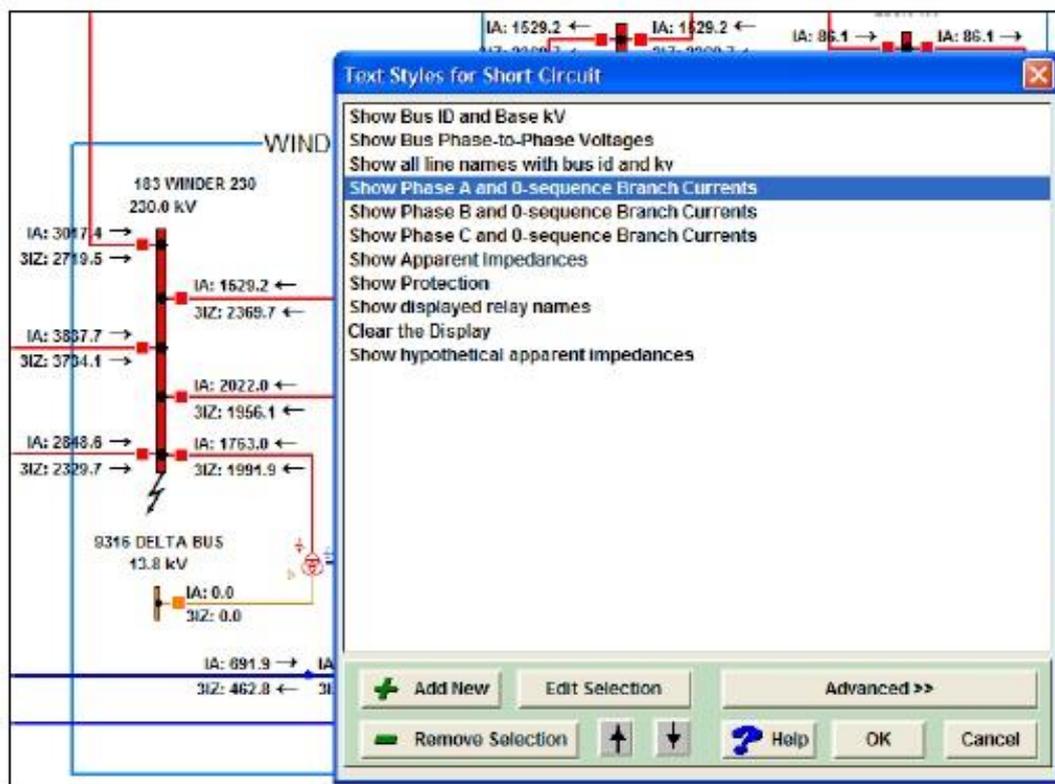


Figura 3.16 - Seleção do modo de exibição da tela inicial. Fonte: Eletrocon (2016).

O CAPE ainda proporciona ao usuário a opção de gerar um relatório de texto completo dos barramentos em falta analisados durante a simulação. Uma ferramenta de análise mais completa e rica em detalhes que visa a fornecer ao usuário condições apropriadas para um estudo mais detalhado do sistema.

Para visualizar o relatório de texto, é preciso dimensionar o seu elemento de representação visual na tela do CAPE, movendo a barra de divisão entre a *Graphics Área* e *Text Área*. Para obter o relatório basta clicar com o botão direito do *mouse* selecionando as opções: *Reports>Bus* e em seguida selecionar o barramento desejado no *menu* finalmente escolhendo a opção: *Report This Bus* como ilustra a figura 3.17 a seguir.

LAWRENCEVILLE			
105	LAWRENCEVILLE	1	1000.5
Branch WINDER			
1316	CT WINDER	1	558.24
Autotransformer Current (3Io)			

Figura 3.17 - Exibição do relatório de faltas. Fonte: Eletrocon (2016).

3.4.2 FALTA EM LINHA DE TRANSMISSÃO

Escolhido o tipo de falta (fase-terra; fase-fase; fase-fase-terra; fase-fase-fase) e a impedância, se existir, é preciso indicar a distância da falta em relação a um barramento, conforme ilustra a figura 3.18.

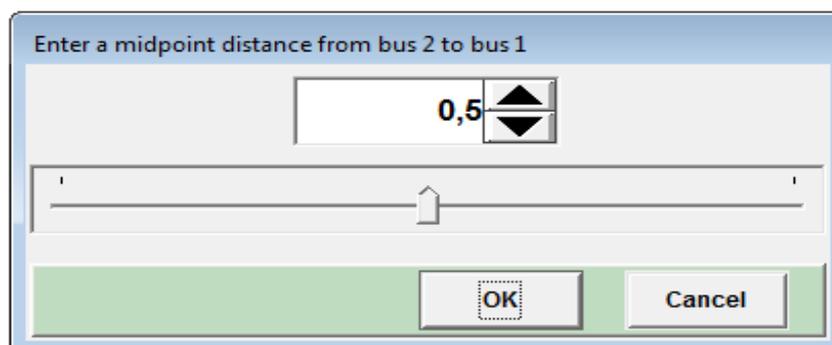


Figura 3.18 - Seleção da distância de falta em relação a um barramento. Fonte: Eletrocon (2016).

Aplicando a falta no local desejado, depois de simulado o cenário, os valores em módulo e ângulo das correntes de curto-circuito serão mostrados visualmente para o usuário através do diagrama unifilar. Na parte superior das linhas são representadas as correntes de fase para faltas assimétricas e na parte inferior as correntes de curto circuito trifásico. O CAPE ainda disponibiliza um relatório detalhado sobre as condições de faltas simuladas, fornecendo ao usuário uma ferramenta de maior precisão e riqueza de detalhes para estudos mais aprofundados. A figura 3.19 ilustra essa situação.

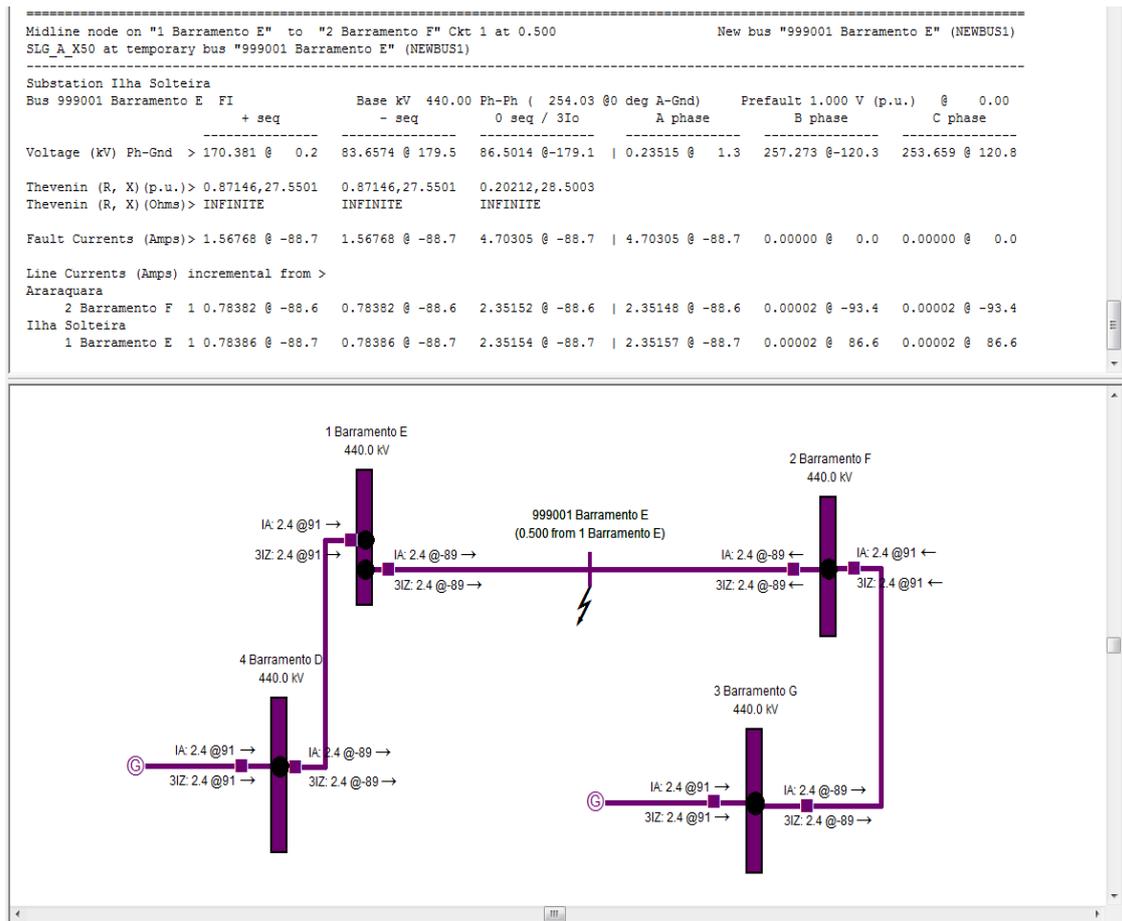


Figura 3.19 - Relatório da falta aplicada. Fonte: Eletrocon (2016).

É importante destacar as diferenças na funcionalidade da aplicação dos vários tipos de falta, ao se estudar o comportamento de um sistema de proteção. Falhas mais simples são amplamente utilizadas na fase de dimensionamento e ajuste dos relés do circuito de proteção, faltas complexas e simultâneas, em contrapartida, são aplicáveis em simulações que visam a reproduzir situações reais de operação de um sistema elétrico.

3.5 ANÁLISES DAS CURVAS

Outra funcionalidade de grande importância para a análise do comportamento do sistema é o *Coordination Graphics*. Nesse módulo é possível analisar graficamente a coordenação entre os dispositivos de proteção selecionados, modificando as suas configurações de acordo com a necessidade. Além disso, é possível que sejam apresentadas as características

de sobrecorrente, de distancia ou até mesmo as duas juntas no mesmo gráfico. A seguir serão abordados os dois principais tipos de características: TOC e DIST.

3.5.1 ANÁLISE DA CURVA TOC

Para iniciar a análise do comportamento da curva TOC dos dispositivos, primeiramente é necessário selecionar qual relé, que possui essa característica, será analisado. Para isso, com o módulo *Coordination Graphics* iniciado, é preciso clicar na aba *Display Devices* e uma janela de seleção será apresentada, conforme ilustra a figura 3.20. Nesta janela, primeiramente é selecionado a subestação que o relé pertence, depois é escolhido a LZOP e por fim escolhe-se o relé juntamente com a característica desejada (IOC, TOC, DIR, TIMER, VOLT, CDIFF).

Protective Element Search: [IOC, TOC, DIR, DIST, TIMER, VOLT, AUX, CDIFF, RECL, FUSE]

Enter Partial Substation ID: All

Matching Substations		LZOP's at Selected Substation	
Substation		LZOP Type	LZOP Name
UNION POINT		LINE	Jackson EMC #17 46kV
WESTMINSTER		LINE	Jackson EMC #6 46kV
WINDER		LINE	Lawrenceville 115 Line
YONAH		LINE	Lawrenceville 230 Line
ilha solteira		LINE	Monroe 115 Line

Protective Devices						
<input checked="" type="radio"/> Show ACTIVE Group Only <input type="radio"/> Show ALL Groups						
Type	Name	Rank	Style	Model	Scheme	Group Name
RELAY	658ZD	1	12GCY12A3A	GCY12A	P	
RELAY	658ZDT	2	12RPM11A2	RPM11A	P	
RELAY	658DG	3	12JBCG53E11A	JBCG53	P	
RELAY	658G	4	12IAC53B3A	IAC53	P	

Show These Element Types: IOC DIR VOLT AUX
 TOC DIST TIMER CDIFF

Elements in Selected Device: Hide Blank Logic

Display	Element Code	Designation	Zone/Unit	Contact Logic Code
No	IOC			DIR_GND_IOC
Pending	TOC			DIR_GND_TOC
No	DIR			DIR_GND_DIR

Reset 2 Elements Ok Cancel

Status: Select:

Figura 3.20 - Escolha do relé e da função para análise. Fonte: Eletrocon (2016).

É possível que sejam analisadas graficamente até trinta curvas de diferentes relés com diferentes características. A figura 3.21 exemplifica duas curvas de dois relés escolhidos aleatoriamente com característica TOC.

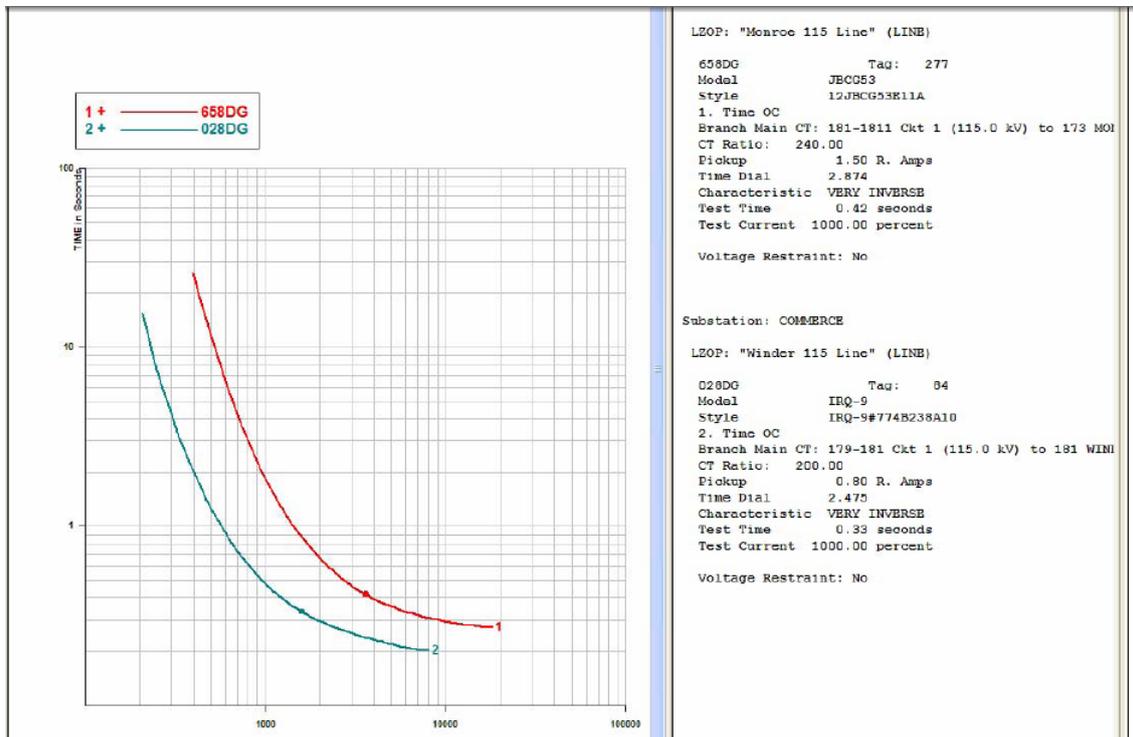


Figura 3.21 - Curva TOC. Fonte: Eletrocon (2016).

Esses gráficos isoladamente não fornecem muitas informações, é preciso aplicar uma falta no sistema para ver o comportamento do relé perante a essa. Para isso, é preciso entrar no módulo *Short Circuit*, escolher o local desejado que seja aplicada a condição adversa e selecionar as seguintes opções conforme ilustra a figura 3.22.

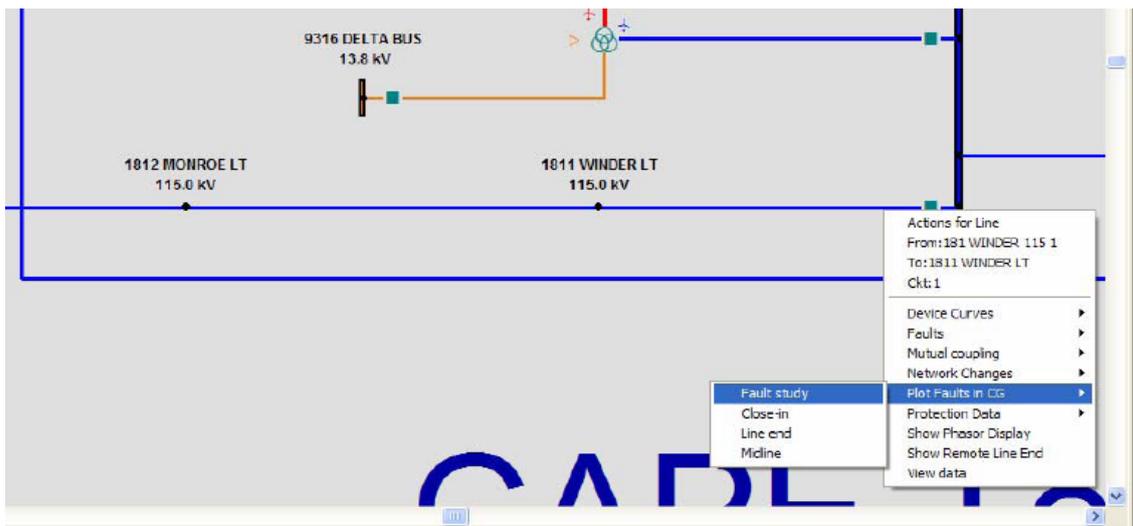


Figura 3.22 - Método de seleção para estudo de faltas. Fonte: Eletrocon (2016).

Feito isso, escolhe-se o tipo de falta então, o CAPE aplicará uma série de faltas ao longo da linha. A figura 3.23 exemplifica uma falta aplicada em um dos pontos do sistema mostrando a curva com o comportamento de dois relés e o relatório desta falta.

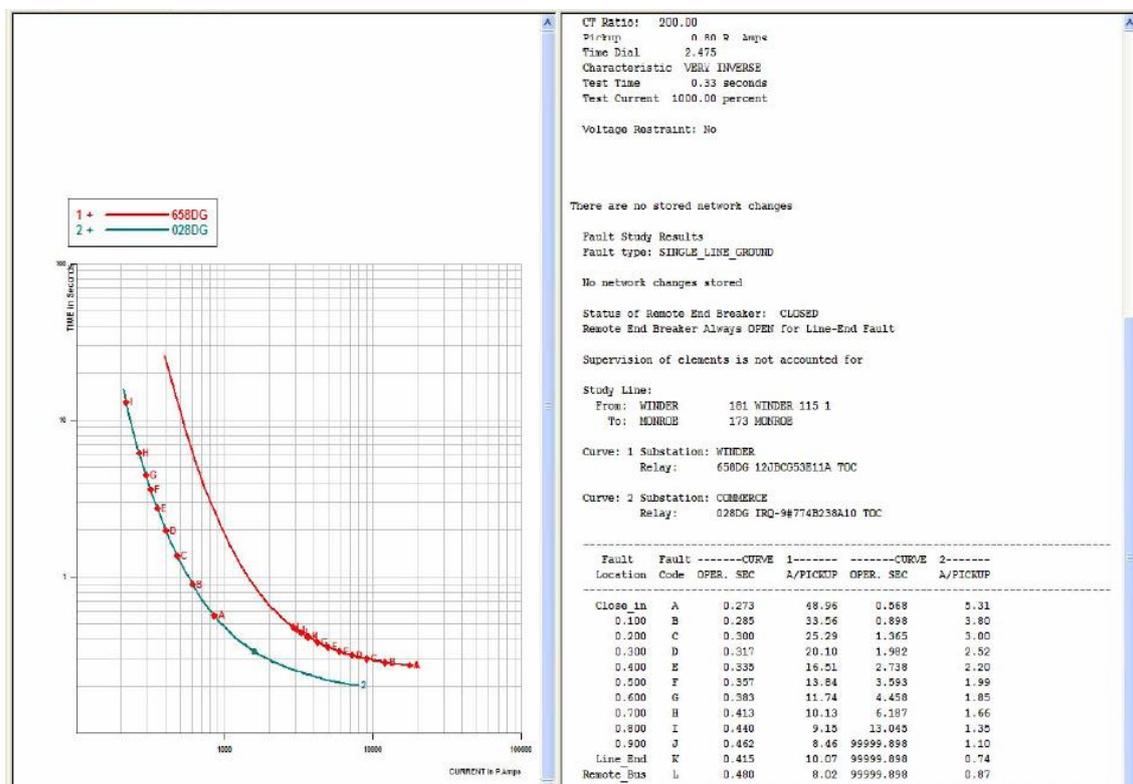


Figura 3.23 - Curva TOC com aplicação de uma falta. Fonte: Eletrocon (2016).

3.5.2 ANÁLISE DA CURVA DIST

Para analisar a curva DIST basta seguir os mesmos procedimentos apresentados no tópico anterior, selecionando o relé que possui a característica DIST. A curva dessa característica pode ser observada na figura 3.24.

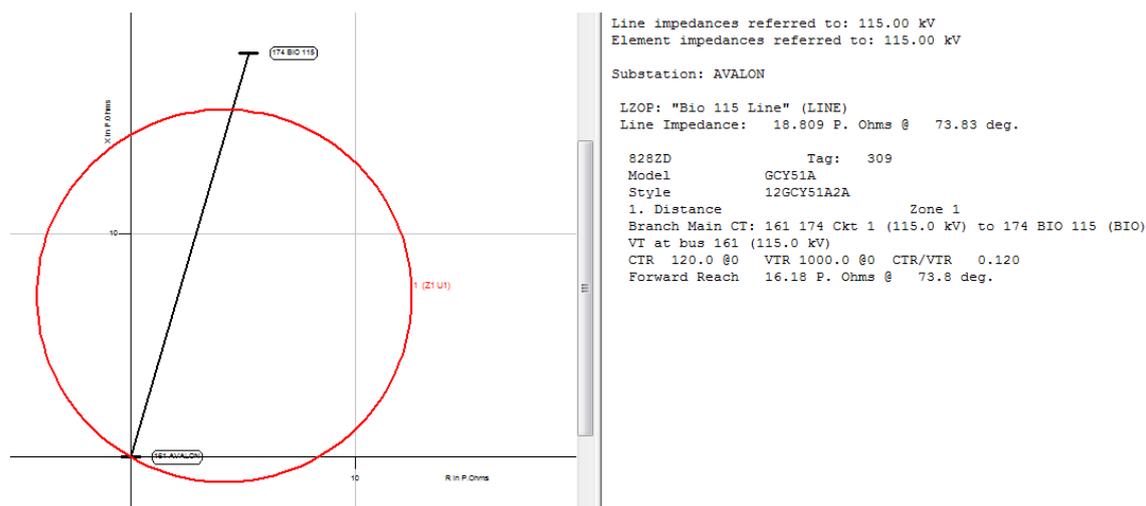


Figura 3.24 - Curva DIST. Fonte: Eletrocon (2016).

Para aplicar uma falta, seguem-se os mesmos passos realizados para a característica TOC e então o CAPE aplicará uma sequencia de faltas ao longo da linha, conforme observa-se na figura 3.25.

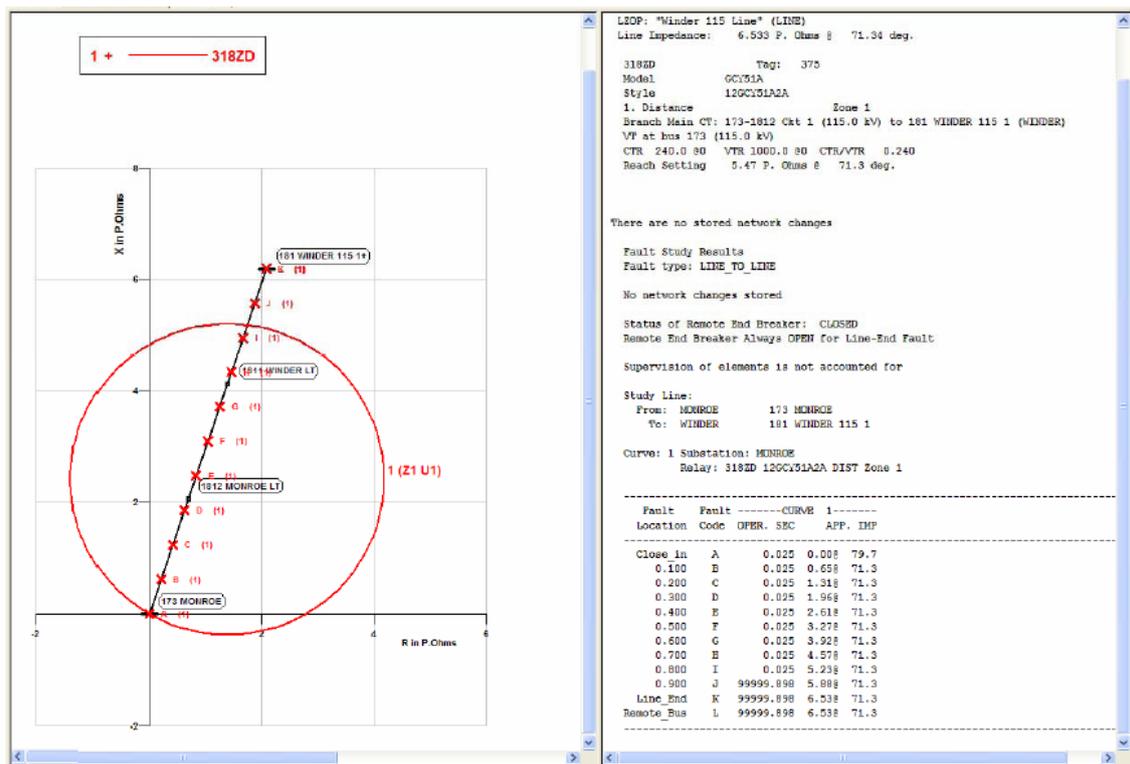


Figura 3.25 - Curva DIST com aplicação de uma falta. Fonte: Eletrocon (2016).

4 SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

4.1 INTRODUÇÃO

O objeto de estudo desta análise trata-se de um SEP trifásico de quatro barras com dois geradores síncronos (60 Hz), conectados aos barramentos D e G de potências nominais 10 GVA e 9 GVA respectivamente, como ilustra a figura 4.1. Três linhas de transmissão de 80, 150 e 100 km respectivamente, conectam radialmente os geradores em circuito simples, com tensão nominal de 440 kV.

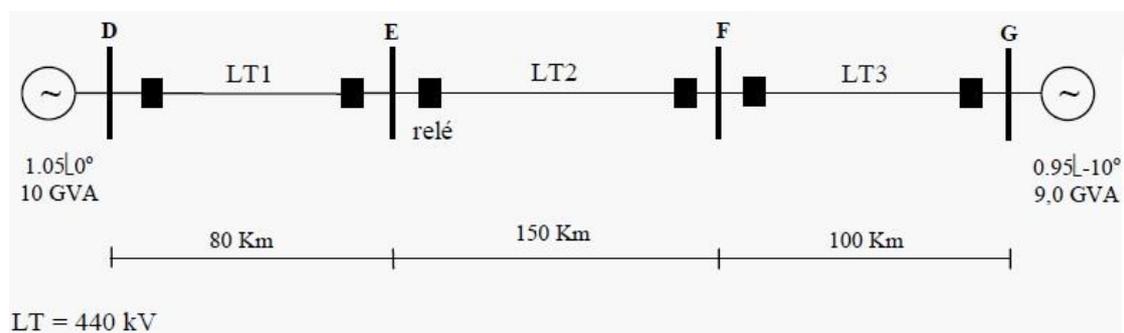


Figura 4.1 - Sistema Elétrico de Potência analisado. Fonte: Oleskovicz; Coury; Aggarwal (2000).

A configuração deste arranjo corresponde aos modelos típicos de linhas de transmissão de 440 kV adotados pela Companhia Energética do Estado de São Paulo (CESP) empregada entre as cidades de Araraquara – Jupiá – Ilha Solteira (SILVA, 2003).

4.2 PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO

Com o sistema elétrico definido, serão detalhados a seguir os parâmetros de cada componente do SEP utilizado:

4.2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

De acordo com as especificações normativas, as linhas de transmissão seguem um padrão construtivo, normas como a NBR-5422 – Projeto de linha

área de transmissão de energia elétrica (ABNT, 1985) e NBR-8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto (ABNT, 2008), estabelecem os critérios e condições básicas de projeto como: cabos condutores e cabos para-raios, cadeias de isoladores e ferragens, suportes e fundações, esforços mecânicos e outros. As torres autoportantes que compõem a linha são construídas em aço galvanizado treliçadas e fixadas no solo através de sapatas de concreto, a fim de promover sua auto sustentação, diferente das torres estaiadas que exigem o emprego de cabos de aço que garantem o equilíbrio da estrutura. Suas dimensões de forma geral são especificadas como mostra a figura 4.2 e os parâmetros podem ser encontrados na tabela 4.1.

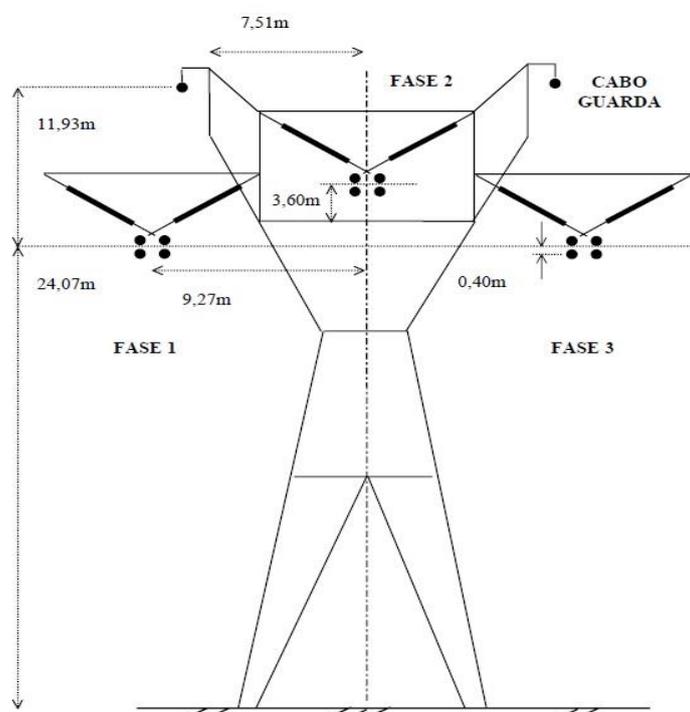


Figura 4.2 - Dimensões típicas de uma torre autoportante utilizada em projetos de linhas de transmissão de 440 kV. Fonte: Oleskovicz; Cury; Aggarwal (2000).

Tabela 4.1 – Parâmetros de linha de transmissão de 440 kV. Fonte: Silva (2013).

	Sequência Positiva	Sequência Negativa
R(Ω/km)	$3,853 \cdot 10^{-2}$	1,861
L(mH/km)	$7,410 \cdot 10^{-1}$	2,230
C(μF/km)	$1,570 \cdot 10^{-2}$	$9,034 \cdot 10^{-3}$

O circuito da linha é conectado através de cabos Grosbeak 636 MCM de alumínio com alma de aço (26 Al – 7 Aço) e cabos para-raios EHS 3/8” como mostram as figuras 4.3 e 4.4, cujas especificações técnicas encontram-se nas tabelas 4.2 e 4.3. As normas NBR-7270 (ABNT, 2010) – Cabos de alumínio com alma de aço para linhas aéreas NBR-5471 (ABNT, 1986) – Condutores Elétricos, estabelecem as diretrizes de projeto para esta categoria de equipamento (SILVA, 2003).



Figura 4.3 - Cabo condutor encordoado de alumínio com alma de aço (26 Al – 7 Aço) Grosbeak 636 MCM. Fonte: Alubar (2010).

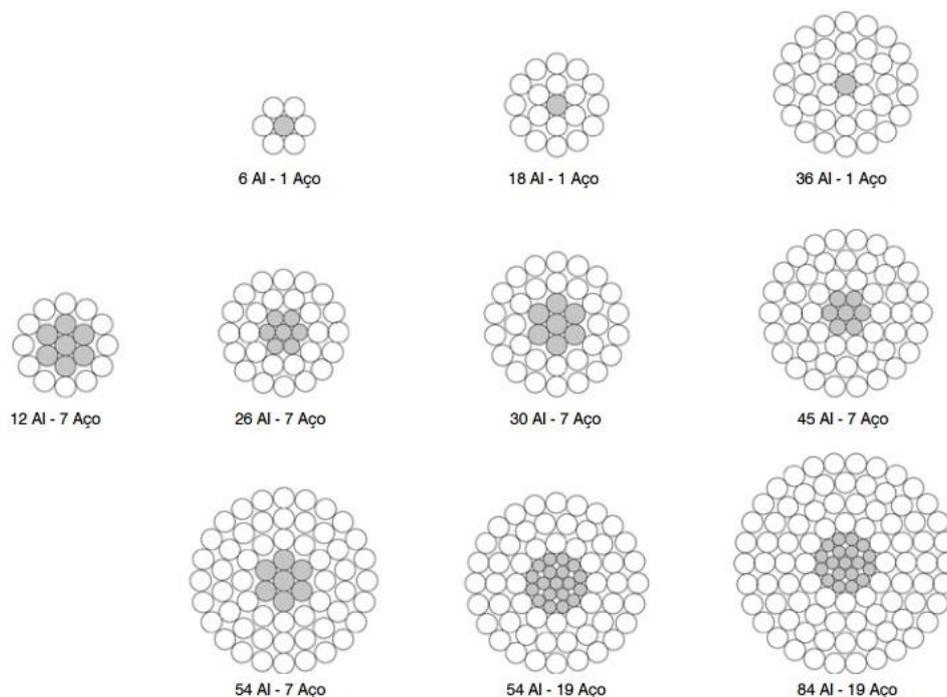


Figura 4.4 - Padrão estrutural de condutores metálicos encordoados de alumínio com alma de aço. Fonte: Alubar (2010).

Tabela 4.2 – Especificações técnicas de cabos condutores para linhas de transmissão em 440 kV. Fonte: Alubar (2010).

CABO	ÁREA		DIÂMETRO			PESO NOMINAL (kg/km)	RESISTÊNCIA (ohm/km)	AMPA-CIDADE (A)
	SE-ÇÃO (MCM)	SE-ÇÃO Al (mm ²)	TOTAL DO CONDUCTOR (mm ²)	CABO (mm)	ALMA (mm)			
Wodduck	605	306,53	378,05	25,25	10,82	1410,56	0,09474	740
Teal	605	306,53	376,04	25,25	10,82	1398,22	0,09474	740
Kingbird	636	322,31	340,22	23,87	4,77	1027,94	0,08945	750
Rook	636	322,27	364,03	24,81	8,27	1219,03	0,08990	765
Grosbeak	636	322,31	374,77	25,16	9,27	1302,71	0,08989	775

Tabela 4.3 – Especificações técnicas de cabos para-raios para linhas de transmissão em 440 kV. Fonte: Alubar (2010).

DIÂMETRO NOMINAL (mm)	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CC (Ω/km)	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CA	REATÂNCIA INDUTIVA	REATÂNCIA CAPACITIVA	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CC	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CA
		(Ω/km)	(Ω/km)	(MΩ.km)	(Ω/km)	(Ω/km)
		5A	10 ^a	20 ^a	10 ^a	20A
7,94	5,25	5,28	5,25	5,34	0,594	0,607
9,52	3,81	3,81	3,81	2,87	0,610	0,620
11,11	2,72	2,72	2,76	2,79	0,627	0,640
12,70	2,17	2,20	2,23	2,33	0,650	0,666

4.2.2 BARRAMENTOS DE GERAÇÃO

Nas tabelas 4.4 e 4.5 serão apresentados os parâmetros e dados de barra para os equivalentes nos terminais da linha de 440 kV.

Tabela 4.4 – Parâmetros dos equivalentes de geração das barras D e G. Fonte: Silva (2013).

	GERADOR 1 – BARRAMENTO D		GERADOR 2 – BARRAMENTO G	
	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA
R (ohms/km)	1,6982	0,3580	1,7876	0,4052
L (mH/km)	0,5140	0,1120	0,5410	0,1230

Tabela 4.5 – Dados das barras de geração D e G. Fonte: Silva (2013).

	GERADOR 1 – BARRAMENTO D	GERADOR 2 – BARRAMENTO G
POTÊNCIA (GVA)	10,00	9,00
TENSÃO (pu)	1,05	0,95
ÂNGULO (°)	0,00	-10,00

4.2.3 TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Para esse sistema em análise, foi utilizado um TC com relação de transformação de 200:1, os parâmetros são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dados do TC utilizado. Fonte: Bernardes (2006).

DESCRIÇÃO (pu)	VALOR (un)
Indutância do primário	0,1000 (mH)
Resistência do primário	0,8500 (Ω)
Indutância do secundário	0,1000 (mH)
Resistência do secundário	0,0001 (Ω)

4.2.4 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

Para esse sistema foi escolhido um TP do tipo capacitivo a fim de proporcionar uma representação mais realista dos sinais de tensão obtidos no sistema de transmissão. Os parâmetros desse equipamento são apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Dados do TP utilizado. Fonte: Fernandes, Neves, Vasconcelos (2007).

$R_c = 1,0 \Omega$	$L_p = 3,0 \text{ mH}$	$L_{f2} = 95,0 \text{ mH}$
$L_c = 2,0 \text{ mH}$	$L_p = 3,0 \text{ mH}$	$R_f = 4,0 \Omega$
$C_c = 1100,0 \mu\text{F}$	$L_m = 300,0 \text{ mH}$	$M = 10,0 \text{ mH}$
$C_p = 1,0 \mu\text{F}$	$L_{f1} = 10,0 \text{ mH}$	
$R_p = 3,0 \Omega$	$C_{f1} = 140,0 \mu\text{F}$	

4.3 FERRAMENTA UTILIZADA

A análise do sistema elétrico selecionado será feita a partir do *software CAPE (Computer-Aided Protection Engineering)*, construído para os engenheiros responsáveis pela proteção dos sistemas de transmissão e de distribuição em alta e média tensão. O programa computacional analisa o sistema de forma mais simplificada e rápida quando comparada a métodos analíticos tradicionais e simula a resposta do sistema de proteção em relação a uma determinada falta. Este *software* pode analisar diversas situações de operação do sistema elétrico, evitando problemas potenciais. As principais funcionalidades do CAPE compreendem:

- Recursos de modelagem detalhadas com base em um único banco de dados de código aberto.
- Suporte para análise e simulação para resolver questões de gerenciamento de dados, descobrir rede potencial e problemas de dispositivo de proteção, e avaliar alternativas.
- Suporte a redes de qualquer tamanho.

- Suporte à configuração de relés digitais modernos e complexos.
- Suporte para funções de coordenação de relés e estudos de área ampla.
- Capacidade de integração com programas de estabilidade transitória, para permitir a avaliação de controle de área ampla necessária para evitar interrupções e apagões em cascata.

As simulações podem determinar:

-Possíveis falhas nos sistemas que métodos analíticos tradicionais não são capazes de detectar.

- A localização e intensidade das faltas e o tempo de reação dos componentes do sistema de proteção.

- O correto funcionamento do sistema.

As simulações que serão realizadas têm como objetivo aproximar-se às situações e características encontradas na prática. Com o uso do *software* destinado às simulações tem-se a possibilidade de obter resultados próximos aos reais, já que estes, por condições técnicas não estão disponíveis.

4.4 CONDIÇÕES DE FALTAS ANALISADAS

No decorrer do trabalho, serão analisadas vários tipos de faltas em diferentes localizações ao longo da linha de transmissão entre os barramentos E e F e diferentes resistências de falta. As seguintes variações foram consideradas:

- Tipos de faltas aplicadas conforme pode ser observado na figura 4.5:

(a) falta fase-terra, (b) falta fase-fase, (c) falta fase-fase-terra, (d) falta fase-fase-fase.

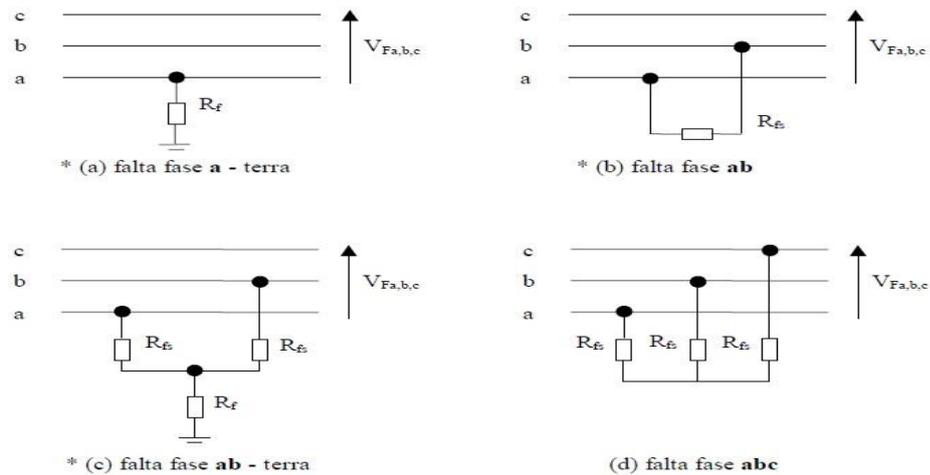


Figura 4.5 - Diferentes configurações de faltas simuladas no sistema. Fonte: Oleskovicz; Coury; Aggarwal (2000).

- Distância em que as faltas foram aplicadas como referência o barramento E:
 - 10, 75, 140 km.
- Resistência de faltas:
 - 0 e 50 Ω .

4.5 RELÉ UTILIZADO

O relé utilizado para a proteção desse sistema será o SEL-311C que é um relé avançado para abertura e religamento tripolares, com recursos abrangentes para proteção das linhas de transmissão. Um conjunto eficaz de elementos de proteção de fase e terra, associados à função de bloqueio por oscilação de potência e a um religador com quatro tentativas de religamento, propicia ao usuário diversos esquemas de abertura através da proteção de distância com zonas temporizadas e baseados nos sistemas de comunicação (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2006).

O relé destina-se a proteção de linhas de transmissão, integrando várias funções de proteção visando uma operação eficiente. Essas funções são listadas a seguir:

- 50/51 - Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G - Sobrecorrente residual instantânea e temporizada;

- 50/51Q (46) - Sobrecorrente instantânea e temporizada de sequência negativa;
- 21 - Distância de fase, quatro zonas tipo Mho;
- 21G - Distância de neutro, quatro zonas tipo Mho e quatro zonas tipo quadrilateral;
- 67G - Sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente ou tensão);
- 67Q - Direcional de sequência negativa;
- 85 - Esquemas de controle ou teleproteção;
- 78/68 - Disparo e bloqueio por oscilação de potência;
- 79 – Religamento automático monopolar ou tripolar, até quatro tentativas;
- 25 - Verificação de sincronismo;
- 27/59 - Subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- 59G - Sobretensão de neutro;
- 59Q - Sobretensão de sequência negativa;
- 50/62BF - Falha de disjuntor;
- 60 - Perda de potencial;
- 81 - Sub/Sobre frequência e taxa de variação de frequência.

O diagrama funcional do SEL-311C pode ser observado na figura 4.6.

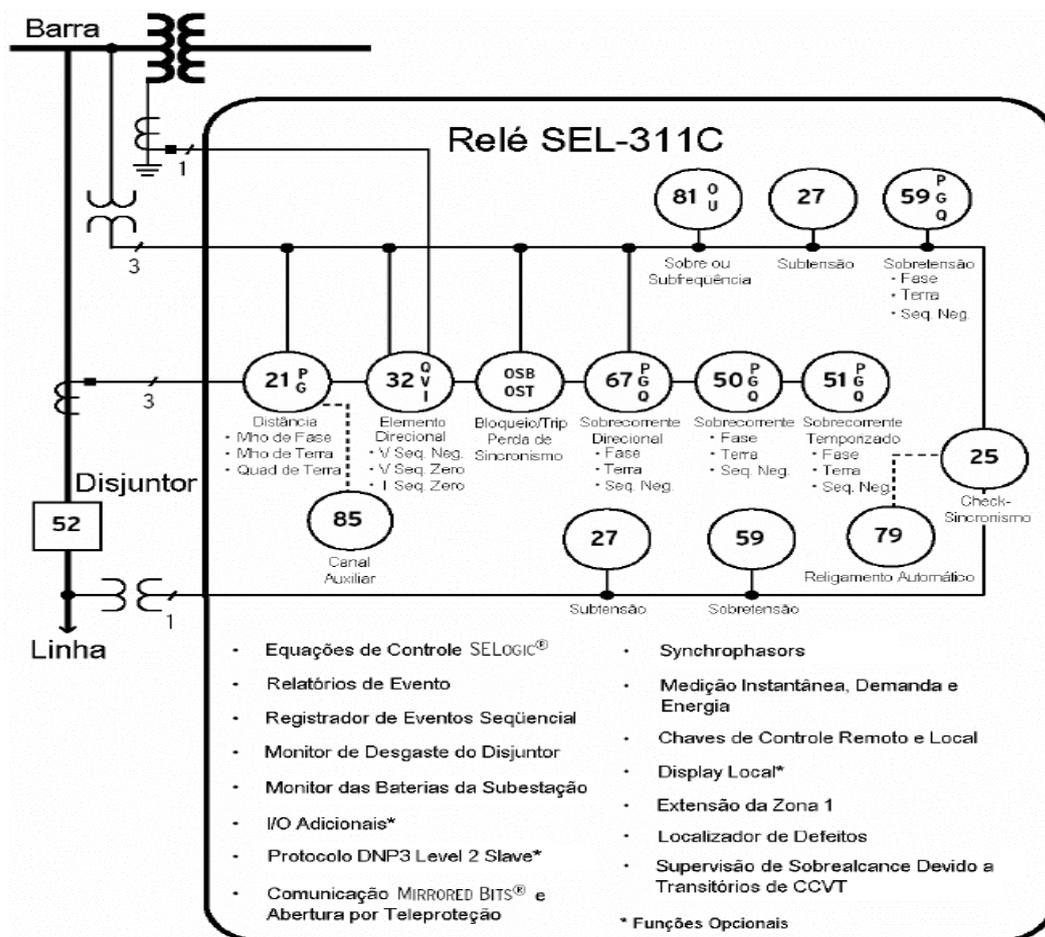


Figura 4.6 - Diagrama funcional do SEL-311C. Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (2006).

4.6 RESULTADOS OBTIDOS

A partir das simulações propostas no item 4.4, esse tópico visa a mostrar os resultados obtidos destas situações além de discuti-los para um melhor entendimento.

4.6.1 ANÁLISE DA DISTÂNCIA DA FALTA

Analisando a influência da distância de uma falta qualquer em relação a um barramento, pode-se notar que as correntes de fase de sequência positiva e a de sequência zero aumentam conforme essa distância é

diminuída. Ou seja, quanto mais próximo de um determinado barramento acontecer essa situação anormal de funcionamento, maiores serão essas correntes em questão.

As três figuras abaixo exemplificam essa situação, todas são faltas fase-terra e com mesma impedância, o que difere são as distâncias da ocorrência em relação ao barramento E. A figura 4.7 é o resultado de uma falta aplicada a 10 km, a figura 4.8 ilustra uma falta aplicada a 75 km e por fim, a figura 4.9 mostra a aplicação da falta a 140 km. Os valores de IA correspondem à corrente de sequência positiva e 3IZ à corrente de sequência zero. A tabela 4.8 mostra de maneira detalhada todos os valores das correntes analisadas nessa situação.

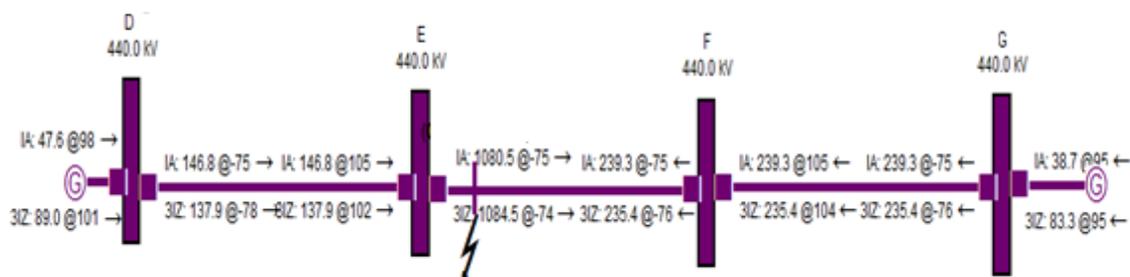


Figura 4.7 - Falta aplicada a 10 km do barramento E. Fonte: Eletrocon (2016).

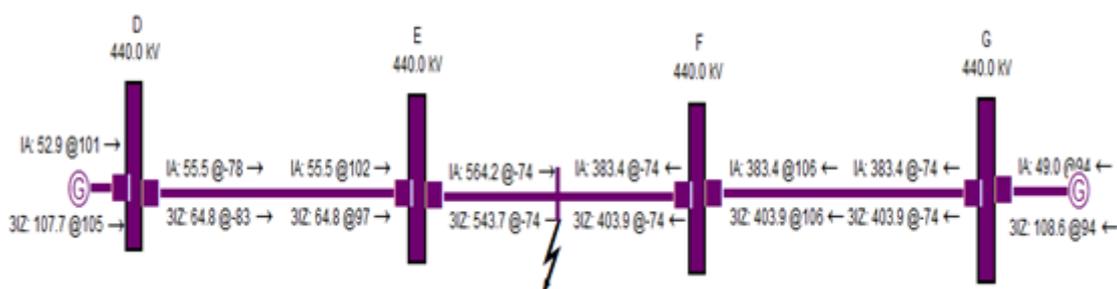


Figura 4.8 - Falta aplicada a 75 km do barramento E. Fonte: Eletrocon (2016).

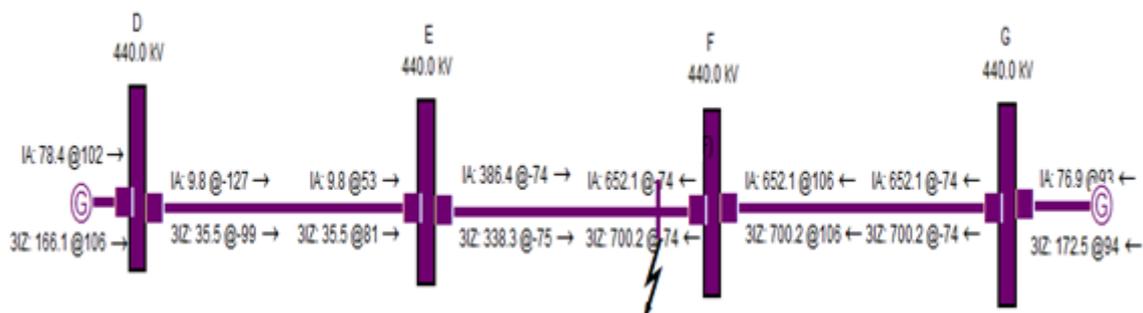


Figura 4.9 - Falta aplicada a 140 km do barramento E. Fonte: Eletrocon (2016).

Tabela 4.8 – Valores de correntes de sequência positiva e zero para diferentes pontos de aplicação da falta.

TRECHO DO SISTEMA	PONTO DE APLICAÇÃO DA FALTA					
	10 km		75 km		140 km	
	Seq. Positiva (kA)	Seq. Zero (kA)	Seq. Positiva (kA)	Seq. Zero (kA)	Seq. Positiva (kA)	Seq. Zero (kA)
Gerador 1 → Barra D	47,6	89,0	52,9	107,7	78,4	166,1
Barra D → Barra E	146,8	137,9	55,5	64,8	9,8	35,5
Barra E → Falta	1080,5	1084,5	564,2	543,7	386,4	338,3
Barra F → Falta	239,3	235,4	383,4	403,9	652,1	700,2
Barra G → Barra F	239,3	235,4	383,4	403,9	652,1	700,2
Gerador 2 → Barra G	38,7	83,3	49,0	108,6	76,9	172,5

4.6.2 ANÁLISE DO TIPO DE FALTA

Analisando a influência do tipo de falta, nota-se que as correntes de fase de sequência positiva são maiores na falta trifásica, ou seja, este é o pior caso de falta que pode ocorrer no SEP. Para este tipo de falta, não existe a corrente de sequência zero, pois as três correntes de fase de sequência positiva são iguais e simétricas. Já para os demais tipos de falta, existem componentes assimétricas de curto circuito e por isso existe a corrente de sequência zero.

As quatro figuras abaixo exemplificam essa situação, todas são faltas no mesmo ponto e com mesma impedância, o que difere são os tipos de falta. A figura 4.10 representa uma falta fase-terra, a figura 4.11 uma falta fase-fase, a figura 4.12 uma falta fase-fase-terra e por fim a figura 4.13 uma falta trifásica. A tabela 4.9 mostra de maneira detalhada todos os valores de correntes analisadas nessa situação.

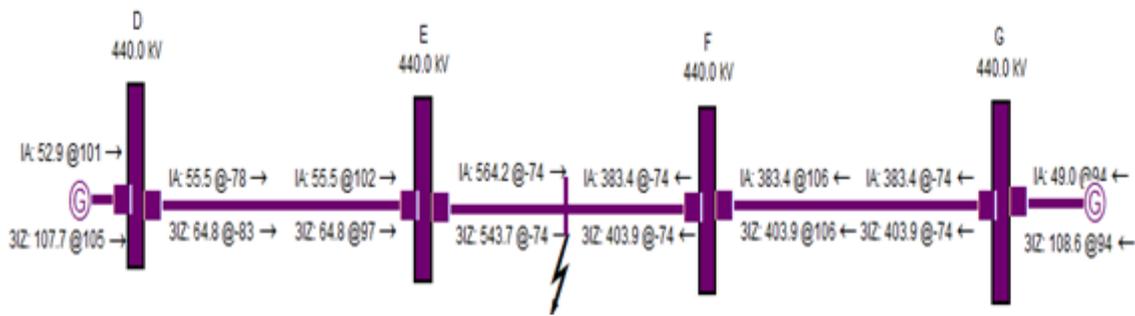


Figura 4.10 - Falta fase-terra. Fonte: Eletrocon (2016).

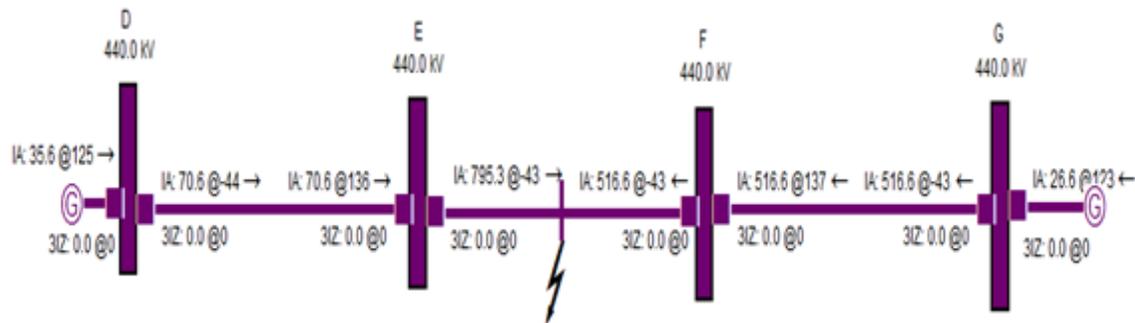


Figura 4.11 - Falta fase-fase. Fonte: Eletrocon (2016).

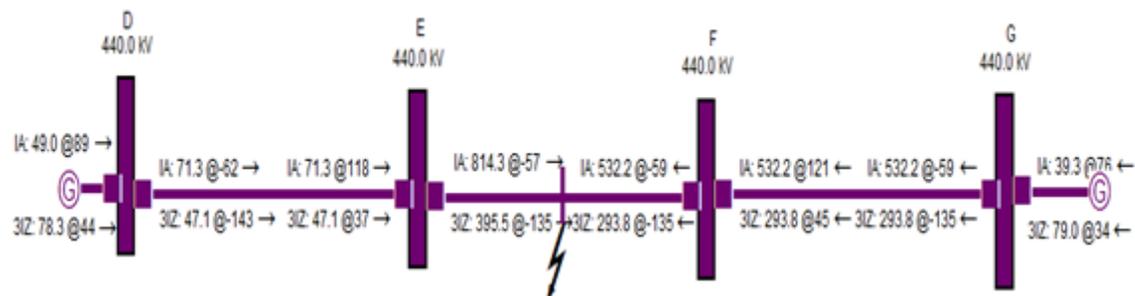


Figura 4.12 - Falta fase-fase-terra. Fonte: Eletrocon (2016).

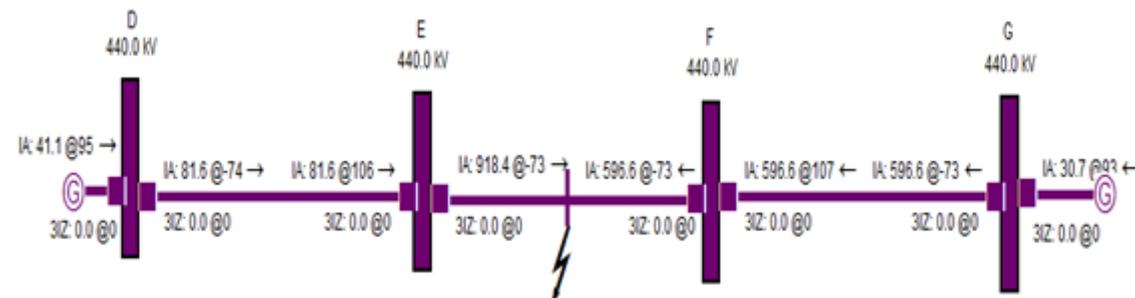


Figura 4.13- Falta trifásica. Fonte: Eletrocon (2016).

Tabela 4.9 – Valores de correntes de sequência positiva e zero para diferentes tipos de falta.

TRECHO DO SISTEMA	TIPO DE FALTA APLICADA							
	FASE-TERRA (kA)		FASE-FASE (kA)		FASE-FASE-TERRA (kA)		TRIFÁSICA (kA)	
	Seq. Pos	Seq. Zero	Seq. Pos	Seq. Zero	Seq. Pos	Seq. Zero	Seq. Pos	Seq. Zero
Gerador 1 → Barra D	55,9	107,7	35,6	0	49,0	78,3	41,1	0
Barra D → Barra E	55,5	64,8	70,6	0	71,3	47,1	81,6	0
Barra E → Falta	564,2	543,7	795,3	0	814,3	395,5	918,4	0
Barra F → Falta	383,4	403,9	516,6	0	532,2	293,8	596,6	0
Barra G → Barra F	383,4	403,9	516,6	0	532,2	293,8	596,6	0
Gerador 2 → Barra G	49,0	108,6	26,6	0	39,3	79,0	30,7	0

4.6.3 ANÁLISE DO VALOR DA IMPEDÂNCIA

Analisando a influência do valor da impedância, nota-se que quanto maior for este valor, menor serão os valores das correntes analisadas pelo CAPE.

As duas figuras abaixo exemplificam essa situação, todas são faltas fase-terra aplicadas no mesmo ponto, o que difere é o valor da impedância de cada uma. A figura 4.14 não tem impedância e a figura 4.15 tem valor de impedância de 50Ω. A tabela 4.10 mostra de maneira detalhada todos os valores de correntes analisadas nessa situação.

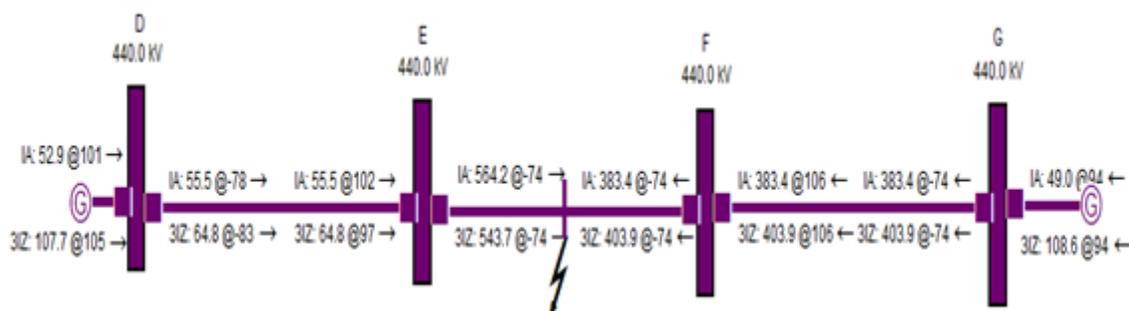


Figura 4.14 - Falta sem impedância. Fonte: Eletrocon (2016).

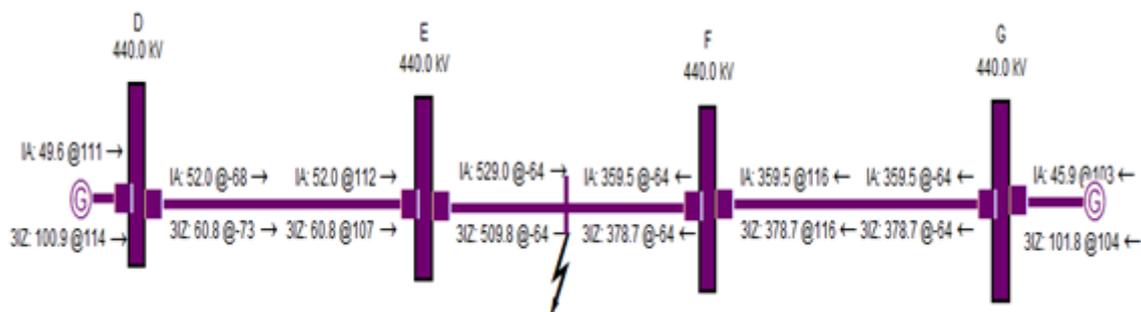


Figura 4.15 - Falta com impedância de 50 Ω . Fonte: Eletrocon (2016).

Tabela 4.10 – Valores de correntes de seqüência positiva e zero para diferentes valores de resistência.

TRECHO DO SISTEMA	RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO			
	0 Ω		50 Ω	
	Corrente de curto-circuito de seq. Positiva (kA)	Corrente de curto-circuito de seq. Zero (kA)	Corrente de curto-circuito de seq. Positiva (kA)	Corrente de curto-circuito de seq. Zero (kA)
Gerador 1 → Barra D	52,9	107,7	49,6	100,9
Barra D → Barra E	55,5	64,8	52,0	60,8
Barra E → Falta	564,2	543,7	529,0	509,8
Barra F → Falta	383,4	403,9	359,5	378,7
Barra G → Barra F	383,4	403,9	359,5	378,7
Gerador 2 → Barra G	49,0	108,6	45,9	101,8

4.6.4 ANÁLISE DAS CURVAS DO RELÉ

A última análise a ser realizada nesse trabalho consiste na curva DIST do relé de proteção. Depois de aplicada uma falta trifásica entre os barramentos E e F, o relé SEL 311-C se comportará conforme mostra a figura 4.16. Os dois penúltimos pontos B e C são os resultados da falta aplicada exatamente a 90% e 80% de distância do barramento E em relação ao F e o ponto A é exatamente no barramento F. Nota-se que esses pontos estão contidos na curva DIST e, portanto nesses pontos o relé não atua, já nos demais pontos, o relé atua e dispara o comando de ação

para os disjuntores executarem a manobra de abertura do trecho do circuito em falta.

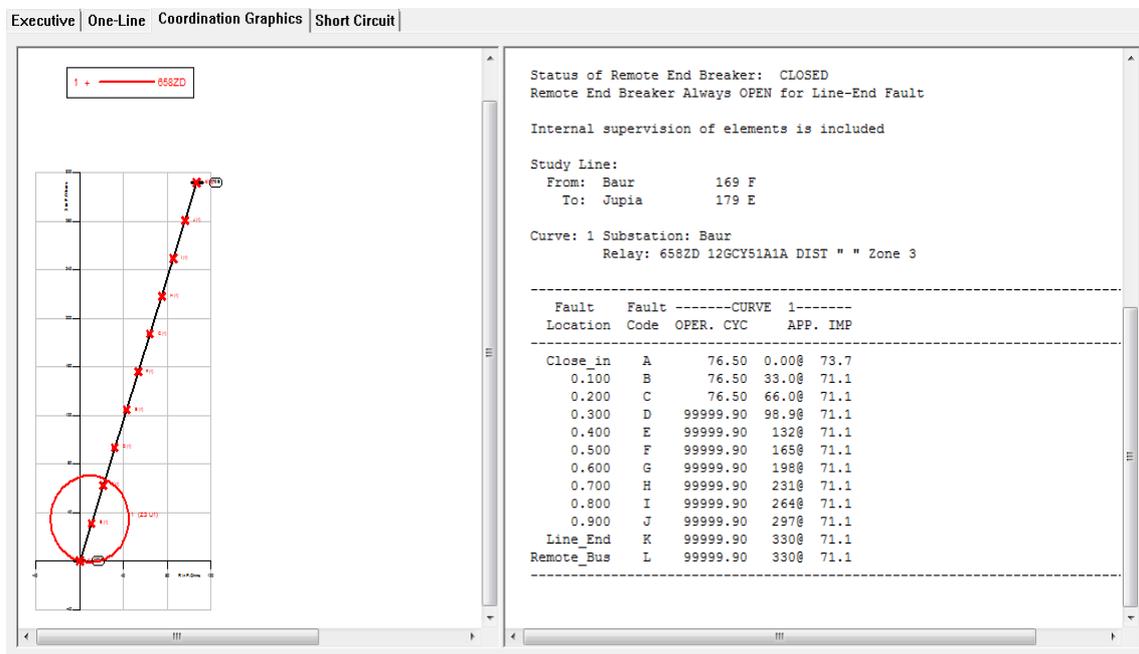


Figura 4.16 - Curva DIST do relé SEL-311C. Fonte: Eletrocon (2016).

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como foco principal a análise computacional de um sistema fictício através do *software CAPE*. Com esta análise foi possível observar como os equipamentos de proteção se comportam perante a determinadas faltas como, por exemplo, diferentes tipos de falta (fase-terra; fase-fase ou trifásico), impedâncias e diferentes distâncias do local da situação anormal em relação a um barramento específico . Cada situação foi analisada individualmente para entender os resultados obtidos e melhor interpretá-los.

Os resultados obtidos até a conclusão deste trabalho foram satisfatórios, tendo atingido o objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso, considerando que foi necessário estudar a fundo um *software* sobre o qual não se tinha nenhum conhecimento e as literaturas sobre o CAPE eram praticamente restritas ao manual do fabricante.

Por fim, para facilitar o entendimento do leitor, foi apresentado, em um capítulo exclusivo, um passo a passo para modelagem de qualquer sistema no CAPE. Neste capítulo em questão, é mostrado como adicionar os principais equipamentos de proteção como transformadores para instrumentos, disjuntores e relés, além dos elementos básicos de qualquer sistema como barramentos, linhas de transmissão e geradores. Outro ponto de destaque nesta pesquisa foi o estudo das faltas utilizando *software CAPE*, pois o usuário após a leitura deste capítulo tem a possibilidade de simular qualquer situação anormal dentro do sistema analisado e tomar as devidas atitudes.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Tomando como partida o presente trabalho e os resultados obtidos com ele, é possível dar continuidade a estes estudos. Dentre os possíveis pontos que podem ser abordados na sequência, pode-se citar:

- a) Analisar um sistema de proteção com mais barramentos e relés de proteção para verificar o comportamento de todo esse conjunto. Uma

ideia seria estudar um trecho do SEP do estado do Paraná, que contém inúmeros barramentos e equipamentos de proteção.

- b) Elaborar um tutorial mais completo e com mais funções que não foram abordados neste trabalho.
- c) Elaborar um estudo do módulo *System Simulator* que analisa de forma completa o funcionamento dos disjuntores perante as condições anormais no sistema.

REFERÊNCIAS

ALUBAR – **Catálogo técnico: Condutores Elétricos de Alumínio**. Disponível em http://www.alubar.net.br/downloads/produtos/catalogo_tecnico_2010-2.pdf Acesso em 26 de setembro de 2015.

ANDERSON, Paul M. **Power System Protection**. New York: Series Editor, 1999.

ARAUJO, C.A.S., et al., **Proteção de sistemas elétricos**, 2nd ed. Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2005.

ARTECHE – **Transformador de potencial capacitivo**. Disponível em <http://www.artech.com/pt/produtos/transformadores-de-potencial-capacitivos> Acesso em 26 de setembro de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856**: Transformador de corrente. Rio de Janeiro, 2015. 111 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6855**: Transformador de potencial. Rio de Janeiro, 2009. 71 p.

BERNARDES, A.P. **Esquema completo de proteção diferencial de transformadores para testes em um relé digital**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BLACKBURN, Lewis J.; DOMIN, Thomas J. **Protective Relaying. Principles and Applications**. Flórida: CRC Press, 2006.

BICHELS, Arlei. **Sistemas Elétricos de Potência. Métodos de Análise e Solução**. Curitiba: Edição do Autor, 2015.

BRITTO, Núbia S. D et al. **Proposição do uso de softwares de simulação em proteção de sistemas elétricos.** Disponível em <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/103022.pdf>> Acesso em 08 de novembro de 2014.

BRITTES, José L. P. **Aproveitamento funcional de sistemas de controle e proteção digitais em subestações de distribuição.** 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CHEMIN, Ulisses N. **Aplicações de controle e supervisão distribuídas em subestações de energia elétrica através do uso de relés digitais de proteção.** 2008. 172 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

COLOMBO, Roberto. **Disjuntores de alta tensão.** São Paulo: Livraria Nobel S.A, 1986.

COSTA, Nilson S. **Proteção de sistemas elétricos considerando aspectos de segurança da rede de comunicação.** 2007. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ELECTROCON INTERNATIONAL INCORPORATED – **Computer Aided Protection Engineering (CAPE).** Disponível em <<http://www.electrocon.com/capeintro.php>>. Acesso em 08 de novembro de 2014.

ELMORE, W. A. **Protective Relaying Theory and Applications**, 2nd ed. New York. Marcel Dekker, 2004.

FERNANDES Jr. D., NEVES, W.L.A., VASCONCELOS, J.C.A. **A coupling capacitor voltage transformer representation for electromagnetic transient studies.** 2007. Electric Power Systems Research 77, 125-134.

GOES, A.R.G., **Modernização da proteção sistemas elétricos de potência**. 2013. 86 f. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

HOROWITZ S. H.; PHADKE A. G.. **Power System Relaying Research Studies**, Press Ltd., 1996.

KINDERMAN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Florianópolis: Edição do Autor, 2005.

HEWITSON, L. G.; BROWN, Mark; BALAKRISHNAN, Ramesh. **Practical Power System Protection**, Netherlands: Elsevier, 2004.

MARDEGAN, Claudio. **Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais**. EngPower. São Paulo. 2012.

OLESKOVICZ, Mario; COURRY, Denis V.; AGGARWAL, Raj K. **Redes neurais artificiais aplicadas a classificação rápida de faltas em sistemas elétricos de potência**. SBA Controle & Automação. São Carlos, v. 11, n. 3, p.160-168, dez. 2000.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Glossário de termos técnicos**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_20/Subm%C3%B3dulo%2020.1_Rev_1.0.pdf>. Acesso em 08 de novembro de 2014.

Protective Relays – Application Guide, 3rd ed., GEC Alstom T&D, Inglaterra, 1995.

RUSH, Peter. **Proteção e automação de redes conceito e aplicação**. São Paulo: Editora Blucher, 2011.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **Sistema de Proteção e Automação SEL-311C**. Soluções Eficazes para Proteção de Linhas de Transmissão. Campinas, 2006. 28p.

SILVA, Murilo. **Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada WAVELET**. 2003. 231 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

VORPE, Michel A.; KASTRUF, Oscar F.; FRANÇA, Wilson J. **Disjuntores e chaves – Aplicação em sistemas de potência**. Niterói: EDUFF – Editora da Universidade Federal Fluminense, 1995.

W SERVICE. **Disjuntores**. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/Arquivos/32/32.pdf>>. Acesso em 08 de novembro de 2014.