

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WILLIAN DE OLIVEIRA

**CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO E SELETIVIDADE
EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

WILLIAN DE OLIVEIRA

**CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO E SELETIVIDADE EM
INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS**

Proposta para Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2), do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Paulo Cicero Fritzen, Dr. Eng.

CURITIBA

2014

Willian de Oliveira

Cálculo de Correntes de Curto-Circuito e Seletividade em Instalações Elétricas Industriais

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, 26 de fevereiro de 2014.

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

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

ORIENTAÇÃO

Paulo Cicero Fritzen, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Andrea Lucia Costa, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cicero Fritzen, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre oraram e intercederam por minha vida e me fizeram trilhar um caminho segundo o coração de Deus.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marcos Paulo Cavalcanti e Josefina Souza de Oliveira Cavalcanti pelo apoio, sempre sendo um porto seguro na minha caminhada acadêmica.

Aos meus irmãos Natiely Cavalcanti e Thalís Cavalcanti que fizeram parte do dia a dia desta caminhada acadêmica.

A minha futura esposa Bruna Brant dos Santos que sempre teve paciência e compreensão nos momentos difíceis.

Aos familiares e amigos que sempre me motivaram a seguir em frente e nunca desistir dos meus sonhos.

Ao professor orientador Paulo Cicero Fritzen pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

"Bem-aventurado aquele que teme ao SENHOR e anda nos seus caminhos! Pois comerás do trabalho das tuas mãos, feliz serás, e te irá bem."

(Salmos 128:1-2)

RESUMO

OLIVEIRA, Willian. Cálculo de Correntes de Curto-Circuito e Seletividade em Instalações Elétricas Industriais. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

O cálculo de corrente de curto-circuito é muito importante no projeto de instalações elétricas industriais, sendo que um dos principais pontos analisados na aprovação do projeto frente à companhia de energia elétrica local é a seletividade do sistema de proteção do Sistema Elétrico Industrial (SEI) e o sistema de proteção da companhia. Muitos profissionais da área de engenharia elétrica não realizam o cálculo de curto-circuito e seletividade do sistema devido à complexidade dos cálculos. Este trabalho, então proporciona a possibilidade da realização do cálculo de correntes de curto-circuito e seletividade amperimétrica do SEI de forma rápida e fácil, apenas necessitando a inserção de dados do sistema elétrico ao algoritmo. O algoritmo desenvolvido realiza o cálculo de correntes de curto-circuito e seletividade de SEIs com diferentes tipos de configurações, que tenham número indefinido de barramentos e número indefinido de circuitos por barramento. O trabalho apresenta desde a teoria conceitual de curto-circuito e coordenação seletiva até o resultado final de simulações utilizando o algoritmo, visando demonstrar o cálculo teórico, com suas complexidades, e a facilidade de utilização do algoritmo.

Palavras-chave: Correntes de Curto-Circuito. Coordenação e Seletividade. Sistema Elétrico Industrial.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Willian. Calculation of Short Circuit Currents and Selectivity in Industrial Electrical Installations. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

The calculation of short circuit current is very important in the design of industrial electrical installations, and one of the main points considered in approving the project for the local power company is the selectivity of the protection system Electrical System Industrial (ESI) and protection system of the company. Many professionals in the field of electrical engineering do not perform the calculation of short circuit and selectivity of the system due to the complexity of the calculations. This academic work then provides the possibility of performing the calculation of short circuit currents and amperometric selectivity ESI quick and easy, requiring only the insertion of data to the algorithm of the electric system. This algorithm developed performs the calculation of short circuit currents and selectivity of EISs with different configurations, which have indefinite number of buses and circuits by bus. This paper presents the conceptual theory from short circuit and selective coordination until the final result of simulations using the algorithm, demonstrating the theoretical calculation, with its complexities, and ease of use of the algorithm.

Index-Terms: Short Circuit Currents. Coordination and Selectivity. Industrial Electrical System.

LISTA DE SIGLAS

CCM	Centro de Controle de Motores
F_a	Fator de Assimetria
I_{ca}	Corrente de Curto-Circuito Assimétrica
I_{cc}	Corrente de Curto-Circuito
$I_{cc1\emptyset}$	Corrente de Curto-Circuito Monofásica
$\vec{I}_{cc1\emptyset max}$	Corrente de Curto-Circuito Fase-Terra Máxima
$\vec{I}_{cc1\emptyset min}$	Corrente de Curto-Circuito Fase-Terra Mínima
$I_{cc2\emptyset}$	Corrente de Curto-Circuito Bifásica
$I_{cc3\emptyset}$	Corrente de Curto-Circuito Trifásica
pu	Sistema Por Unidade
QDL	Quadro de Distribuição de Luz
QGF	Quadro Geral De Força
SEI	Sistema Elétrico Industrial

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de atuação dos disjuntores de proteção.....	14
Figura 2 - Interface do Matlab®.....	15
Figura 3 - Seletividade amperimétrica.....	18
Figura 4 - Seletividade cronológica.....	19
Figura 5 - Fusível em série com fusível.....	20
Figura 6 - Fusível em série com disjuntor.....	21
Figura 7 - Disjuntor em série com disjuntor.....	22
Figura 8 - Seletividade lógica.....	22
Figura 9 - Componente simétrica da corrente de curto-circuito.....	24
Figura 10 - Componente assimétrica da corrente de curto-circuito.....	25
Figura 11 - Sequência zero.....	26
Figura 12 - Sequência positiva.....	26
Figura 13 - Sequência negativa.....	27
Figura 14 - Curto-circuito trifásico.....	29
Figura 15 - Curto-circuito bifásico.....	29
Figura 16 - Curto-circuito bifásico-terra.....	29
Figura 17 - Curto-circuito monofásico.....	30
Figura 18 - Entrada de dados do algoritmo.....	41
Figura 19 - Referência de barramentos e circuitos.....	42
Figura 20 - Soma de impedância total de falta.....	42
Figura 21 - Resultados das correntes de curto-circuito.....	43
Figura 22 - Curva de seletividade das correntes de curto-circuito.....	43
Figura 23- Diagrama unifilar do sistema.....	44
Figura 24 - Corrente de curto-circuito no SE Geral simulada pelo algoritmo.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação X/R para transformadores.	35
Tabela 2 - Fator de assimetria para $t=1/4$ ciclo.	37
Tabela 3 - Resistência e reatância dos condutores de cobre (valores médios).	39
Tabela 4 - Dados da concessionária.	45
Tabela 5 - Impedância dos cabos de média tensão.	45
Tabela 6 - Impedância dos cabos de baixa tensão.	45
Tabela 7 - Dados dos transformadores.	45
Tabela 8 - Nível de curto-circuito trifásico calculados.	46
Tabela 9 - Níveis de curto-circuito trifásicos simulados pelo algoritmo.	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.1.1 <i>Delimitação do Tema</i>	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	13
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	13
1.4 JUSTIFICATIVA	14
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE PROTEÇÕES	17
2.1 SELETIVIDADE	17
2.1.1 <i>Seletividade Amperimétrica</i>	17
2.1.2 <i>Seletividade Cronológica</i>	18
2.1.3 <i>Seletividade Lógica</i>	22
3 CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	24
3.1 MÉTODO DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS	25
3.2 TIPOS DE CURTO-CIRCUITO	28
3.2.1 <i>Curto Circuito Trifásico</i>	28
3.2.2 <i>Curto Circuito Bifásico</i>	29
3.2.3 <i>Curto Circuito Monofásico</i>	29
3.3 DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	30
3.3.1 <i>Sistema por Unidade</i>	31
3.3.2 <i>Sistema de Base</i>	31
3.3.3 <i>Metodologia de Cálculo</i>	33
4 DESENVOLVIMENTO	41
5 RESULTADOS	44
6 CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Falhas elétricas são inevitáveis nas instalações prediais, industriais e residenciais. Elas podem ter várias origens e podem causar consequências de diversos níveis. Portanto um sistema elétrico deve ser equipado com diversos dispositivos protetores, estrategicamente situados, destinados à proteção efetiva contra os defeitos e funcionamentos anormais dos equipamentos elétricos. Tais dispositivos não atuam independentemente, há uma relação entre eles, originando assim a preocupação com a coordenação seletiva dos equipamentos de proteção. Assim pode-se dizer que a finalidade da coordenação é de isolar a parte defeituosa do sistema, tão próximo quanto possível de sua origem e no mais curto intervalo de tempo, visando redução dos danos causados por esta anomalia (CAMINHA, 1977).

Para elaboração de projetos elétricos industriais, dimensionar corretamente as proteção e realizar uma coordenação seletiva de seus elementos é fundamental. Portanto para isto o primeiro passo é a determinação de condições de operação, nas quais se enquadram as condições normais, máxima, mínima e de sobrecarga. Concomitantemente necessita-se conhecer as condições de defeito onde se visa conhecer as correntes de curto-circuito, correntes de partida de motores e também de magnetização de transformadores (CAMINHA, 1977).

Uma corrente de curto-circuito ocorre quando surge uma baixa impedância ou nula entre fases, fase-neutro ou fase-terra. Quando isso ocorre e não há dispositivos de proteção, a corrente do circuito se eleva da ordem de centenas ou milhares de vezes da corrente de operação nominal, causando danos em todo o circuito e/ou equipamentos que estão conectados a ele.

Por isso, dispositivos de proteção são amplamente empregados e obrigatórios nos projetos e nas instalações elétricas. Relés, disjuntores e fusíveis possuem papel importante quando se trata de proteção contra correntes de curto-circuito, pois eles são os dispositivos de proteção utilizados nas instalações elétricas industriais. Cada dispositivo tem suas próprias características e utilizações, porém todos devem agir de forma coordenada para uma operação seletiva (NEGRÃO, 2012). Portanto para o correto estudo da seletividade devem-se conhecer as

correntes de curto-circuito do Sistema Elétrico Industrial (SEI) e o funcionamento dos equipamentos instalados no circuito que farão o bloqueio delas.

1.1.1 Delimitação do Tema

Verificando a importância das proteções de um SEI objetiva-se realizar o cálculo das correntes de curto-circuito de uma instalação utilizando ferramenta computacional, assim sendo abordadas as correntes de curto-circuito (I_{cc}): trifásica ($I_{cc3\phi}$), bifásica ($I_{cc2\phi}$) e monofásica ($I_{cc1\phi}$). Após isto, realizar a coordenação seletiva entre os equipamentos de proteção, tais como relés, disjuntores, fusíveis entre outros equipamentos que sejam destinados à proteção do SEI.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Para realizar a coordenação correta dos equipamentos de proteção instalados no SEI é necessário um estudo aprofundado das correntes do circuito tais como: curto-circuito, partida de motores e magnetização de transformadores. Esse trabalho, no entanto, é de elevada complexidade desde a obtenção dos dados até efetuação correta do cálculo.

Observa-se a complexidade de realização do cálculo das correntes de curto-circuito de um sistema elétrico, o que dificulta o trabalho de profissionais habilitados ou até mesmo impedindo o desenvolvimento do mesmo por parte destes.

Realizar o estudo de seletividade através de cálculos manuais demandam tempo e muita mão de obra, e ainda tem um ponto agravante que é a possibilidade grande de apresentar erros nos cálculos, estes de difícil percepção na revisão do projeto.

O projetista quando executa os cálculos tem várias preocupações como os equipamentos de diferentes características que serão utilizados na proteção, como a análise dos dados coletados para efetuar o cálculo, porém a demanda de tempo até o fim do projeto pode acarretar em prejuízos tanto para o projetista como para a indústria.

Há algumas alternativas disponíveis no mercado atualmente para a realização da coordenação seletiva dos equipamentos de proteção, porém são

ferramentas computacionais que nem todo profissional tem acesso, ou se tem, esta tem custo elevado. Abaixo são apresentados alguns dos softwares:

- DlgSILENT Power Factory;
- ASPEN One-Liner;
- EASYPOWER;
- ECODIAL Advance Calculation;

Portanto analisando o contexto acima, o desenvolvimento de alguma ferramenta que auxilie os profissionais a realizarem esta atividade de coordenação de proteções, com um custo relativamente baixo, ou nenhum custo e tornando o processo de cálculo mais eficiente é de grande valia.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Visa-se desenvolver uma ferramenta utilizando o software Matlab[®], que possa auxiliar profissionais e acadêmicos de engenharia elétrica. O intuito é desenvolver uma ferramenta que consiga realizar os cálculos de correntes de curto-circuito e realizar uma coordenação e seletiva dos dispositivos de proteção do SEI.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um algoritmo utilizando software Matlab[®] para realização do cálculo das correntes de curto-circuito: trifásica, bifásica e monofásica;
- Inserir as diferentes características dos diversos equipamentos de proteção ao algoritmo, tais como: relés, disjuntores e fusíveis;
- Realizar através dos resultados das correntes de curto-circuito do SEI a coordenação seletiva dos equipamentos de proteção.

1.4 JUSTIFICATIVA

Muitos profissionais tem a constante preocupação de saber especificar adequadamente os equipamentos elétricos que são submetidos à corrente de curto-circuito, pois um sistema elétrico sujeito a eventuais falhas pode envolver elevadas correntes de curto-circuito, e que fatalmente irão submeter os equipamentos a grandes esforços térmicos e dinâmicos.

Os equipamentos elétricos nos quais se enquadram os de proteção são de grande valia para tornar o sistema mais confiável, seletivo e preciso (NEGRÃO, 2012), porém o dimensionamento errôneo dos parâmetros de proteção podem gerar prejuízos incalculáveis com equipamentos, não só elétricos, mas principalmente estes por estarem diretamente conectados à rede.

Muitos são os métodos para tornar o sistema cada vez mais confiável, e um bom projeto pode ser a melhor ferramenta para garantir um perfeito funcionamento e coordenação do SEI.

O processo de cálculos e ajuste da coordenação de proteções demanda um esforço excessivo por parte do projetista e fica de difícil realização sem o auxílio de ferramentas computacionais. Há várias referências que tratam sobre coordenação da proteção e seletividade, e elas podem ser divididas em dois grupos (FLORES, 1995). O primeiro grupo preza a modelagem computacional das curvas de atuação dos dispositivos de proteção de sobrecorrente como mostrado na Figura 1.

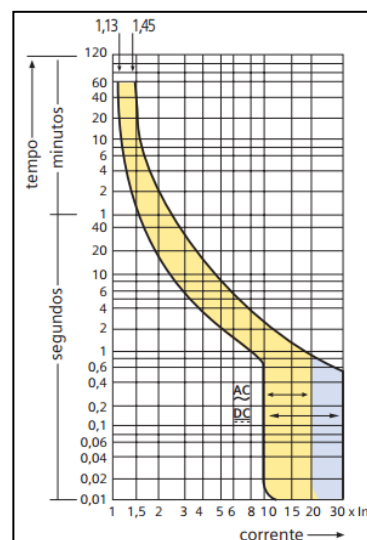


Figura 1 - Curva de atuação dos disjuntores de proteção.
Fonte: Catálogo Siemens - Disjuntores 5SX1, 5SP, 5SY

Esta curva característica de disparo é para proteção de circuitos que alimentam cargas altamente indutivas que apresentam elevados picos de corrente no momento de ligação, como grandes motores, transformadores, além de circuitos com cargas de características semelhantes a essas.

O segundo grupo visa o desenvolvimento de algoritmos para automatizar o processo de definição dos ajustes dos dispositivos.

Como o Matlab[®] é uma ferramenta completa e muito simples pode ser usada facilmente para a realização de cálculos como os de correntes de curto-circuito através de algoritmos. O Matlab[®] possui comandos bastante próximos da forma adotada para as expressões algébricas, permitindo assim a resolução de problemas numéricos mais rapidamente (SILVA, 2008). Sua interface pode ser vista na Figura 2.

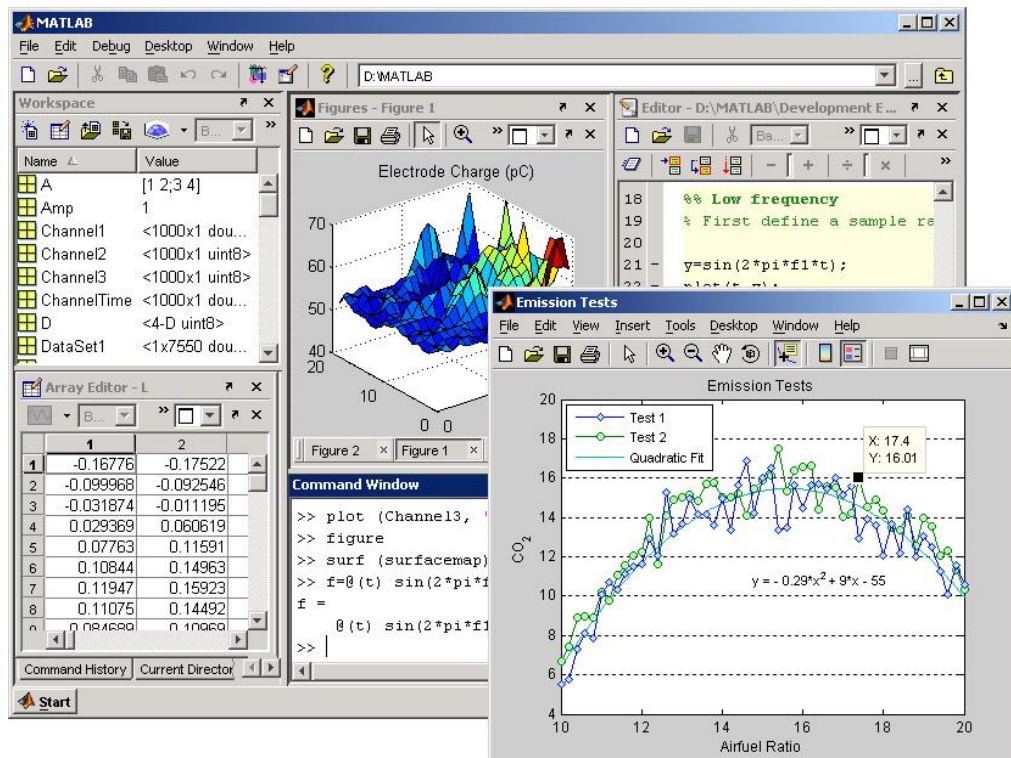


Figura 2 - Interface do Matlab[®].

Fonte: COHEN, Jarrett <http://www.hec.nasa.gov/news/features/2008/matlab.072_508.html>

Devido muito dos profissionais que estão formados terem utilizado esta ferramenta de programação e pelo fato de muitos alunos de engenharia utilizarem o Matlab[®] atualmente nas universidades faz com que ele se torne simples, podendo ser útil para o desenvolvimento de projetos futuros onde se necessite de cálculo de correntes de curto-circuito e necessite também de uma coordenação seletiva das proteções do sistema.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica referente ao tema, assim somando informações e material para que se tenha uma visão mais ampla sobre curto-circuito e seletividade no sistema elétrico industrial.

Posteriormente foi estudado sobre os equipamentos elétricos de proteção de sobrecorrente presentes em uma rede industrial, e conseqüentemente a sua função e importância na proteção do sistema.

Logo em seguida foram utilizados todos os dados e conhecimentos absorvidos nas etapas anteriores para desenvolver um programa de resolução de cálculos de corrente de curto-circuito utilizando a ferramenta Matlab[®]. Com o os cálculos de corrente de curto-circuito e coordenação seletiva prontos foi realizada simulações para verificar o correto funcionamento da ferramenta.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho conta com seis capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1 – Introdução: apresentação da proposta, definição do tema, definição dos objetivos e motivação para o desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 2 – Coordenação e Seletividade de Proteções: fundamentação teórica sobre coordenação seletiva em sistemas elétricos industriais;
- Capítulo 3 – Cálculo de Correntes de Curto-Circuito: fundamentação teórica sobre o cálculo de correntes de curto-circuito;
- Capítulo 4 – Desenvolvimento do algoritmo;
- Capítulo 5 – Resultados;
- Capítulo 6 – Conclusão.

2 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE PROTEÇÕES

Um projeto elétrico industrial envolve várias etapas que vão desde o estabelecimento de uma estratégia de proteção, selecionando os respectivos dispositivos que irão atuar na presença de anomalias, até a determinação de suas condições de funcionamento, a qual se enquadra a calibração do dispositivo para sua correta atuação. Portanto o projeto deve conter os requisitos básicos: boa seletividade entre as proteções; os equipamentos de proteção devem apresentar exatidão e segurança, além de serem sensíveis o suficiente a ponto de atuar em um menor tempo possível.

2.1 SELETIVIDADE

A seletividade é uma característica que um SEI deve ter quando submetido a condições anormais de funcionamento, afim de que atue o dispositivo de proteção mais próximo à falta. De acordo com Mamede (2003) há três procedimentos utilizados para realizar a correta seletividade num SEI.

2.1.1 Seletividade Amperimétrica

Este procedimento tem sua base no princípio de que quão mais próximo da geração ocorrer uma falta, sua corrente de curto-circuito apresentará valores mais elevados.

Este tipo de seletividade é particularmente empregado em sistemas de baixa tensão, pois as impedâncias dos condutores são significantes, não podendo ser desprezadas.

Para a correta seletividade amperimétrica os ajustes das proteções devem levar em conta alguns critérios que podem ser melhor expressos analisando a Figura 3, onde há ocorrência de uma falta no ponto *A* que faz com que exista uma corrente de curto-circuito I_{CC} , sendo *P1* e *P2* dispositivos de proteção que estão ajustados, respectivamente, para as correntes I_{P1} e I_{P2} :

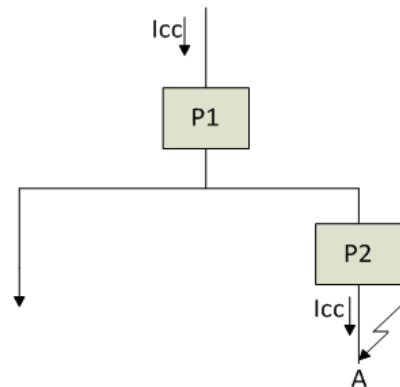


Figura 3 - Seletividade amperimétrica.
Fonte: Adaptado de Mamede (2003 p.500).

- A proteção à montante ao local da falta deve ser ajustada com um valor inferior à corrente de curto-circuito ocorrido dentro da zona de proteção, isto é:

$$I_{P2} \leq 0,8 \times I_{cc} \quad (2.1)$$

- As proteções posicionadas fora da zona de proteção devem ser ajustadas com valores superiores à I_{cc} .

$$I_{P1} > I_{cc} \quad (2.2)$$

2.1.2 Seletividade Cronológica

Este procedimento tem sua base no princípio de que a temporização do dispositivo de proteção mais próximo à falta seja inferior ao dispositivo a montante. Este procedimento pode ser melhor compreendido através da Figura 4.

O tempo de disparo das proteções de forma consecutiva tem que ser igual ao tempo de abertura do disjuntor somando um intervalo de coordenação que corresponde à atuação das proteções. Estes valores de intervalo de coordenação variam entre 0,3 e 0,5 segundos (MAMEDE, 2003).

Esse tipo de seletividade é muito empregado no SEI devido aos dispositivos de proteção presentes nele, que geralmente são fusíveis NH e disjuntores termomagnéticos.

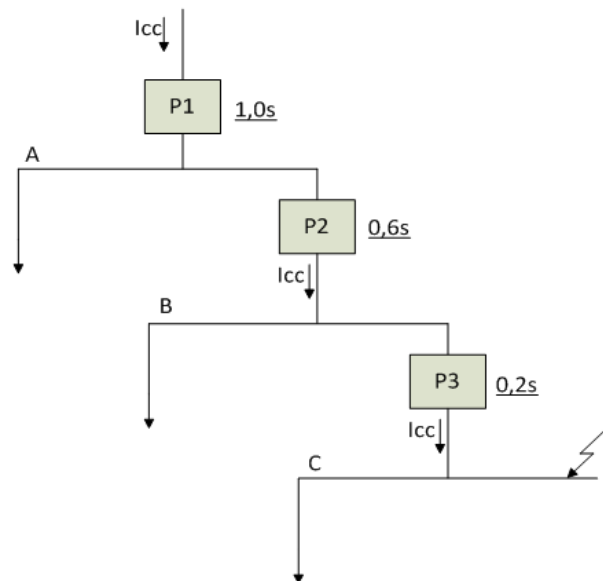


Figura 4 - Seletividade cronológica.
 Fonte: Adaptado de Mamede (2003 p.500).

Este tipo de seletividade pode apresentar condições que não o viabilizam em um projeto de instalação industrial devido aos tempos de atuação das proteções atingirem valores elevados, à medida que se aproxima da fonte. Portanto esta seletividade pode conter algumas desvantagens, tais como:

- As concessionárias impõem tempos reduzidos da proteção na fronteira com a indústria, assim podendo prejudicar o projeto de seletividade que podem ultrapassar o valor imposto pela companhia de energia elétrica;
- Pode-se ter um superdimensionamento dos dispositivos de seccionamento, barramentos, cabos etc. devido à variação das correntes de curto-circuito;
- Ao admitir que haja esse superdimensionamento dos dispositivos de proteção pode ocorrer quedas de tensão prejudiciais às cargas instaladas no SEI.

Segundo Mamede (2003) este tipo de seletividade pode ser aplicada no SEI através das combinações dos seguintes equipamentos de proteção:

- Fusível em série com fusível;
- Fusível em série com disjuntor de ação termomagnética;
- Disjuntor em série entre si.

2.1.2.1 Fusível em Série com Fusível

Neste tipo de seletividade é importante garantir que a corrente do fusível a montante ($I_{Fmontante}$) seja igual ou superior a 160% a do fusível a jusante ($I_{Fjusante}$), isto é:

$$I_{Fmontante} \geq 160\% \times I_{Fjusante} \quad (2.3)$$

É importante ressaltar que quando é feita a seletividade entre fusíveis do mesmo tipo os quais apresentam valores de corrente subsequentes, a seletividade entre estes é estabelecida naturalmente. Na Figura 5 é possível observar a seletividade entre fusíveis.

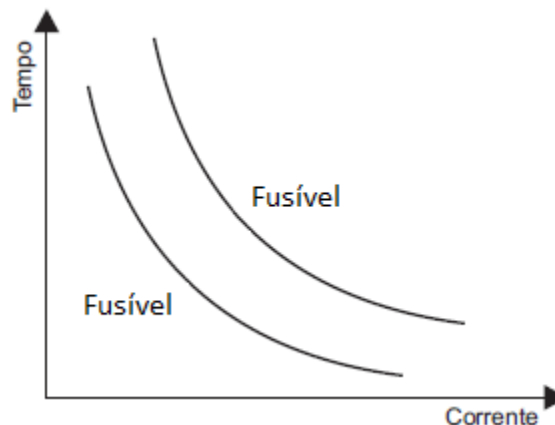


Figura 5 - Fusível em série com fusível.
Fonte: Autoria própria.

2.1.2.2 Fusível em Série com Disjuntor

Neste tipo de seletividade têm-se duas montagens possíveis: Disjuntor a jusante e fusível a montante, como mostra a Figura 6, e também o contrário.

Primeiramente será abordado o caso do disjuntor a jusante. Nesta configuração para se obter a correta seletividade, o tempo de atuação do fusível deve ser igual ou superior a 50ms após o disparo do relé eletromagnético, isto é:

$$T_{AtuaçãoF} \geq T_{AtuaçãoD} + 50ms \quad (2.4)$$

Analisando o segundo caso proposto, o tempo de atuação do relé eletromagnético do disjuntor deverá ser igual ou superior a 100ms ao tempo de disparo do fusível, então:

$$T_{AtuaçãoD} \geq T_{AtuaçãoF} + 100ms \quad (2.5)$$

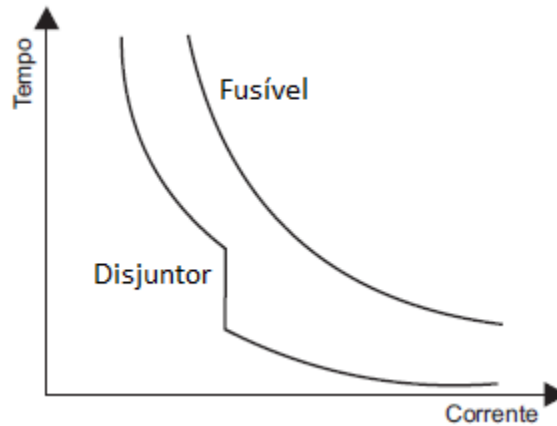


Figura 6 - Fusível em série com disjuntor.
Fonte: Autoria própria.

2.1.2.3 Disjuntor em Série com Disjuntor

Para garantir a correta seletividade entre disjuntores, como demonstrado na Figura 7, é necessário que alguns critérios sejam obedecidos:

- A diferença de tempo entre o tempo de atuação do relé a montante, ou seja, mais próximo da fonte tem que ser igual ou superior a 150ms à atuação do relé eletromagnético do disjuntor a jusante, sendo assim:

$$T_{AtuaçãoD1} \geq T_{AtuaçãoD2} + 150ms \quad (2.6)$$

- As correntes de atuação também devem respeitar o critério de que a corrente de atuação do disjuntor a montante (D1) seja 25% maior que a do disjuntor a jusante (D2):

$$T_{AtuaçãoD1} \geq 1,25 \times T_{AtuaçãoD2} \quad (2.7)$$

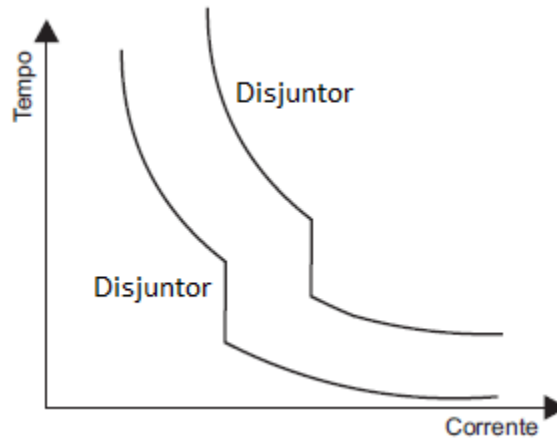


Figura 7 - Disjuntor em série com disjuntor.
 Fonte: Autoria própria.

2.1.3 Seletividade Lógica

Utilizando este tipo de seletividade pode-se diminuir o tempo de coordenação entre as proteções e, conseqüentemente, o tempo de eliminação da falta. Utilizam-se relés para esta seletividade, como mostrado na Figura 8. De acordo com Zanirato (2008), na prática, há um envio de um sinal discreto do relé sensibilizado por uma corrente de falta para o relé a montante. Portanto o relé a montante ao perceber através de sua entrada lógica que o relé a jusante está sensibilizado para atuação, retardará em um tempo suficiente o disparo. Se, por algum motivo houver uma falha na proteção a jusante o equipamento de proteção a montante conseguirá extinguir a falta em menor tempo que os outros tipos de seletividade apresentados.

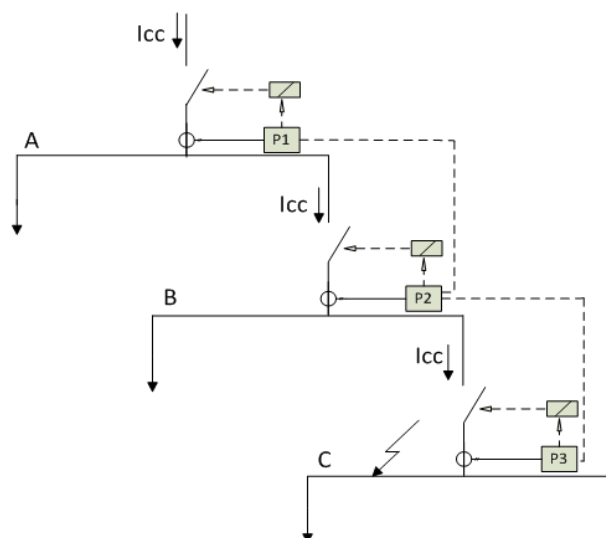


Figura 8 - Seletividade lógica.
 Fonte: Adaptado de Mamede (2003 p.506).

As proteções são ajustadas com um tempo de 50 a 100ms. Cada proteção é ajustada para garantir a ordem do bloqueio durante um tempo definido, cuja duração pode ser admitida entre 150 e 200ms, ou seja, caso a proteção à jusante no intervalo de tempo de 50 a 100ms não atue a proteção a montante irá atuar dentro do intervalo de 150 a 200ms contados a partir do sinal discreto recebido na sua entrada lógica.

3 CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

A determinação das correntes de curto-circuito em um SEI é fundamental para a determinação dos elementos de proteção do sistema.

Durante um curto-circuito, surge uma corrente de elevada intensidade que pode trazer efeitos mecânicos e térmicos aos equipamentos ligados ao circuito sob falta. Estes efeitos mecânicos podem deformar condutores e romper materiais isolantes. Os efeitos térmicos estão ligados ao tempo de permanência da falha e ao valor eficaz da corrente e podem produzir um aquecimento excessivo dos condutores e isolantes, podendo deteriorar os equipamentos.

Não são apenas correntes elevadas que podem causar danos, correntes de curto-circuito de pequeno valor podem causar danos permanentes e/ou temporários a pessoas e animais, caso essas correntes não sejam extinguidas em tempo hábil.

Os valores de correntes de curto-circuito são baseados no conhecimento das impedâncias, desde o ponto onde ocorre a falta até a fonte geradora. Os valores de pico estão, normalmente compreendidos entre 10 e 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito e este valor depende de sua localização no sistema (Mamede, 2003).

As correntes de curto-circuito assumem diversas formas durante o período de atuação, ela é constituída por uma parte que é correspondida pela corrente simétrica de curto-circuito, outra é a parte assimétrica da mesma.

A corrente simétrica de curto-circuito é utilizada para determinar a capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos térmicos providos deste elevado valor de corrente, e sua forma de onda é vista na Figura 9.

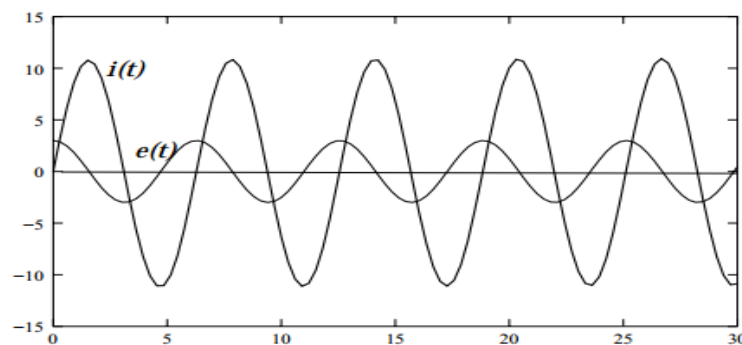


Figura 9 - Componente simétrica da corrente de curto-circuito.
Fonte: Adaptado de Sato (2005, p.4).

Já a corrente assimétrica de curto-circuito, como o nome já diz, apresenta a forma de onda assimétrica em relação ao eixo dos tempos, e ela pode ser caracterizada por três tipos diferentes de assimetria:

- Parcialmente assimétrica;
- Totalmente assimétrica;
- Inicialmente assimétrica.

Esta corrente possui duas componentes em sua formação que é a componente simétrica e a componente contínua, esta última possui um valor decrescente que é característico da propriedade do fluxo magnético que não pode variar bruscamente (Mamede, 2003).

A corrente assimétrica que é utilizada em nosso estudo é a inicialmente assimétrica e posteriormente simétrica, pois nos primeiros instantes de um defeito a corrente é assimétrica e após um pequeno intervalo de tempo ela se torna simétrica, como mostrado na Figura 10.

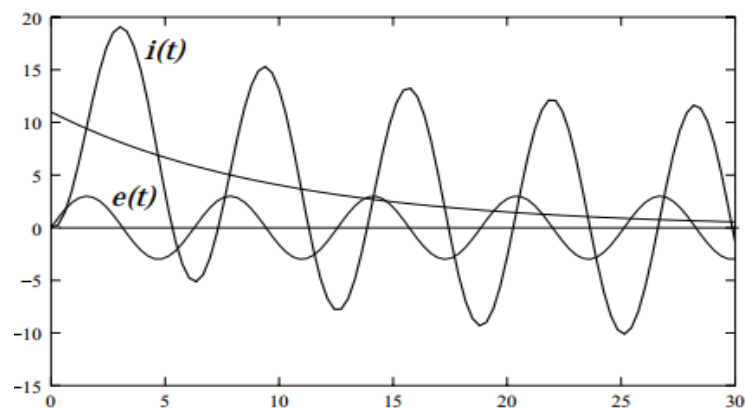


Figura 10 - Componente assimétrica da corrente de curto-circuito.
Fonte: Adaptado de Sato (2005, p.4).

3.1 MÉTODO DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

Este método foi inventado por Dr. C. L. Fortescue, que publicou no ano de 1918 um artigo no AIEE, denominado “Méthod of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”.

Segundo Fortescue (1918) um sistema desequilibrado de N fasores correlacionados pode ser decomposto em N sistemas de fasores equilibrados denominados componentes simétricos dos fasores originais. Os N fasores de cada

conjunto de componente são iguais em módulo e os ângulos entre fasores adjacentes do conjunto são iguais.

Em componentes simétricas utiliza-se o operador imaginário 'j' e o rotacional 'a', que gira 120° um fasor (GUIMARÃES, 2009).

$$j = 1\angle 90^\circ \quad (3.1)$$

$$\dot{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1\angle 120^\circ \quad (3.2)$$

O sistema decomposto é denominado: seqüência positiva, negativa e zero.

- a) Componentes de sequencia zero: consiste em três fasores de iguais magnitudes e fase angular, como mostra a Figura 11;

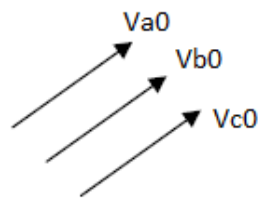


Figura 11 - Sequência zero.
Fonte: Autoria própria.

$$\dot{V}_{A0} = \dot{V}_{B0} = \dot{V}_{C0} \quad (3.3)$$

- b) Componentes de sequência positiva: consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120° e na mesma seqüência de fasores do sistema original, como mostra a Figura 12;

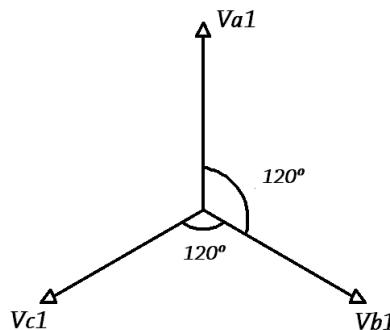


Figura 12 - Sequência positiva.
Fonte: Autoria própria.

$$\dot{V}_{A1} = \dot{V}_{A1} \quad (3.4)$$

$$\dot{V}_{B1} = \dot{V}_{A1} \times a^2 \quad (3.5)$$

$$\dot{V}_{C1} = \dot{V}_{A1} \times a \quad (3.6)$$

- c) Componentes de sequência negativa: consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120° e em sequência de fases contrária à do sistema original, como demonstrado na Figura 13.

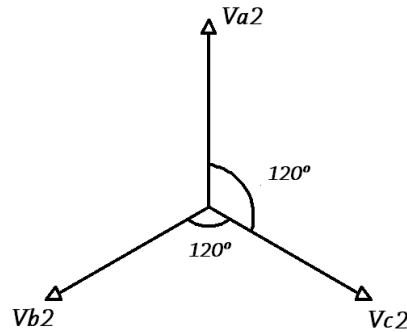


Figura 13 - Sequência negativa.
Fonte: Autoria própria.

$$\dot{V}_{A2} = \dot{V}_{A2} \quad (3.7)$$

$$\dot{V}_{B2} = \dot{V}_{A2} \times a \quad (3.8)$$

$$\dot{V}_{C2} = \dot{V}_{A2} \times a^2 \quad (3.9)$$

Através da superposição dos sistemas trifásicos equilibrados descritos (sequência positiva, negativa e zero), pode-se definir a expressão (3.10).

$$\begin{cases} \dot{V}_A = \dot{V}_{A1} + \dot{V}_{A2} + \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_B = \dot{V}_{B1} + \dot{V}_{B2} + \dot{V}_{B0} \\ \dot{V}_C = \dot{V}_{C1} + \dot{V}_{C2} + \dot{V}_{C0} \end{cases} \quad (3.10)$$

Utilizando a expressão defini-se a equação matricial (3.11):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{A2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Isolando as componentes simétricas tem-se a equação em função do sistema trifásico desbalanceado:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Acima foi demonstrado o cálculo para tensão, e a mesma análise é feita com a corrente, portanto pode-se obter a seguinte expressão:

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) \quad (3.13)$$

É importante também o conhecimento da interferência direta causada pela presença ou não de Neutro no SEI, portanto, é fundamental o estudo da sequência zero.

Em sistemas trifásicos estrela-triângulo aterrado tem-se:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (3.14)$$

Substituindo a equação (3.13) na equação (3.14) pode concluir que só haverá corrente de sequência zero em um sistema onde o neutro é aterrado.

$$\dot{I}_N = 3 \times \dot{I}_{A0} \quad (3.15)$$

3.2 TIPOS DE CURTO-CIRCUITO

Em sistemas trifásicos distinguem-se basicamente os tipos de curto-circuito: trifásico, bifásico e monofásico.

3.2.1 Curto-Circuito Trifásico

As três tensões, neste caso, tem valor zero no ponto de curto-circuito e os três condutores apresentam correntes elevadas alternadas simétricas, defasadas 120°.

Este tipo de curto é o que geralmente atinge maior valor em um SEI, tendo impedância de falta idêntica para as três fases (DOCENA, 2003). A Figura 14 ilustra um curto-circuito trifásico.

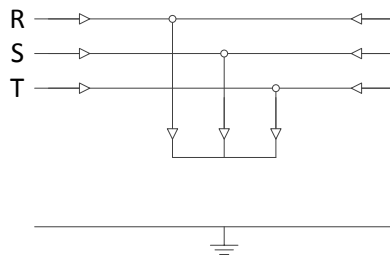


Figura 14 - Curto-circuito trifásico.
Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Curto-Circuito Bifásico

Este tipo de curto-circuito pode ocorrer de duas formas, curto-circuito bifásico ou bifásico-terra, como mostrado nas Figuras 15 e 16, respectivamente, e as condições de ambas são assimétricas.

As correntes de curto-circuito bifásico sem contato com a terra são, geralmente, de grandezas menores que a corrente de curto-circuito trifásica, porém se a falta ocorrer próximo a máquinas síncronas ou assíncronas, então os valores de corrente podem ser maiores do que o que se apresentaria perante um curto-circuito trifásico (Mamede, 2003).

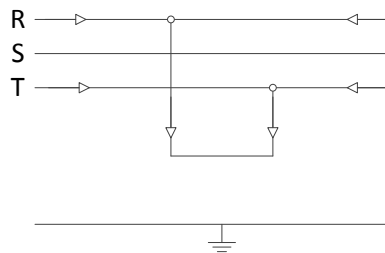


Figura 15 - Curto-circuito bifásico.
Fonte: Autoria própria

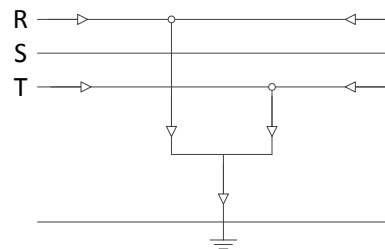


Figura 16 - Curto-circuito bifásico-terra.
Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Curto-Circuito Monofásico

Este curto-circuito, ilustrado na Figura 17, é mais frequente do que os demais tipos apresentados anteriormente. Estas correntes devem ser levadas em consideração quando da determinação das tensões de contato, bem como quando da análise dos efeitos e do dimensionamento de sistemas de aterramento (ROEPER, 1990).

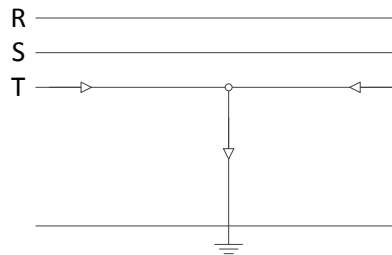


Figura 17 - Curto-circuito monofásico.
Fonte: Autoria própria.

3.3 DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Em todos os pontos de uma instalação elétrica onde há necessidade de instalação de um equipamento de proteção, deve-se conhecer as correntes de curto-circuito. De acordo com MAMEDE (2003) é fundamental conhecer alguns pontos importantes no projeto de proteções de uma SEI, como:

- Ponto de entrega de energia elétrica, onde os valores são fornecidos pela companhia de energia;
- Barramento do Quadro Geral de Força (QGF);
- Barramento do Quadro de Centro de Controle de Motores (CCMs);
- Terminais dos motores, quando os dispositivos de proteção estão ali instalados;
- Barramento dos Quadros de Distribuição de Luz (QDLs), devido o dimensionamento dos disjuntores.

Inicialmente para facilitar os cálculos utiliza-se um artifício matemático para simplificar a resolução, que é conhecido como sistema de base e valores por unidade.

3.3.1 Sistema por Unidade

A análise de um sistema elétrico pequeno feita utilizando os valores reais das grandezas é bastante trabalhoso, num sistema maior com muitas variáveis onde se tem vários níveis de tensão e potência torna praticamente impossível sua análise.

Assim o Sistema por Unidade (pu), ou valor percentual (%), calculado pela Eq.(3.16), torna-se uma grande ferramenta de auxílio à análise de circuitos de sistemas elétricos. Algumas das vantagens são (DOCENA, 2003).

- É necessário conhecer apenas a impedância do transformador em pu ou em %, sem identificar o lado que está referido;
- O método pu é independente das mudanças de tensão e defasamento através dos transformadores;
- São pequenas as chances de confundir as potências monofásica e trifásica, ou tensão de linha e de fase;
- Na análise de curto-circuito a tensão da fonte pode ser considerada $1,0pu$.

$$Valor[pu] = \frac{Valor[real]}{Valor[base]} \quad (3.16)$$

3.3.2 Sistema de Base

Um sistema elétrico é composto por diversos valores que estão referenciados a diferentes bases, então, é necessária a transformação de todos os valores envolvidos para apenas uma base de referência. Este método auxilia e simplifica a resolução de questões relativas à determinação das correntes de curto-circuito.

Os valores de base são grandezas escalares, arbitram-se geralmente valores de base a potência P_b em kVA e a Tensão V_b em kV, portanto tem-se:

a) Corrente base

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \text{ (A)} \quad (3.17)$$

b) Impedância base

$$Z_b = \frac{V_b^2}{P_b} (\Omega) \quad (3.18)$$

c) Impedância por unidade ou pu

$$Z_{pu} = \frac{Z_{c\Omega}}{Z_b} (pu) \quad (3.19)$$

onde $Z_{c\Omega}$ é a impedância do circuito, dado em Ω .

Quando se tem um valor de uma grandeza referido a uma base qualquer e se deseja referir a outra base, pode aplicar as seguintes expressões:

a) Tensão

$$V_{u2} = V_{u1} \times \frac{V_1}{V_2} (pu) \quad (3.20)$$

onde V_{u1} é a tensão em pu na base V_1 e V_{u2} a tensão em pu na base V_2 .

b) Corrente

$$I_{u2} = I_{u1} \times \frac{I_1}{I_2} (pu) \quad (3.21)$$

onde I_{u1} é a corrente em pu na base V_1 e P_1 , e I_{u2} a corrente em pu na base V_2 e P_2 .

c) Impedâncias

$$Z_{u2} = Z_{u1} \times \frac{P_2}{P_1} \times \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 (pu) \quad (3.22)$$

onde Z_{u1} é a corrente em pu na base V_1 e P_1 , e Z_{u2} a corrente em pu na base V_2 e P_2 .

3.3.3 Metodologia de Cálculo

Este roteiro de cálculo permite determinar os valores de correntes de curto-circuito de um SEI. Os cálculos utilizados aqui trarão valores aproximados aos métodos mais sofisticados, mas a precisão obtida satisfaz plenamente aos propósitos a que se destinam (MAMEDE, 2003).

É necessária a realização do cálculo das impedâncias do sistema, tais como barramentos e cabos, e todos os cálculos serão efetuados utilizando a metodologia de valores por unidade (pu). Será adotado como base um valor de potência P_b , expresso em kVA, e um valor de tensão V_b , expresso em kV.

3.3.3.1 Impedância reduzida do sistema (Z_{us})

O valor de impedância reduzida do sistema é fornecido pela companhia de energia elétrica local ao projetista da instalação industrial. Este valor normalmente é a impedância e a corrente de curto-circuito no ponto de entrega de energia.

a) Resistência (R_{us})

Como o valor da resistência é muito menor que o valor da reatância, na prática este valor é normalmente desconsiderado, admitindo o valor de R_{us} abaixo, porém neste trabalho a resistência da impedância reduzida do sistema foi considerada nos cálculos:

$$R_{us} \cong 0$$

b) Reatância (X_{us})

Caso o valor fornecido pela concessionária for o valor da corrente de curto-circuito (I_{cp}):

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times V_{np} \times I_{cp} \text{ (kVA)} \quad (3.23)$$

onde P_{cc} é o nível de curto-circuito trifásico no ponto de entrega de energia, dado em kVA; V_{np} é a tensão nominal primária no ponto de entrega, dado em kV; e I_{cp} a corrente de curto-circuito simétrica, em A.

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} (pu) \quad (3.24)$$

$$\vec{Z}_{us} = R_{us} + jX_{us} (pu) \quad (3.25)$$

3.3.3.2 Impedância reduzida do(s) transformador(es) da subestação (Z_{ut})

Necessita conhecer a potência nominal P_{nt} , dada em kVA, a impedância percentual Z_{pt} , as perdas ôhmicas no cobre P_{cu} em W e por fim a tensão nominal V_{nt} em kV.

a) Resistência (R_{ut})

Primeiramente calcula-se a queda de tensão reativa percentual, portanto:

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nt}} (\%) \quad (3.26)$$

$$R_{ut} = R_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b}\right)^2 (pu) \quad (3.27)$$

b) Reatância (X_{ut})

$$Z_{ut} = Z_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b}\right)^2 (pu) \quad (3.28)$$

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}^2 - R_{ut}^2} (pu) \quad (3.29)$$

$$\vec{Z}_{ut} = R_{ut} + jX_{ut} (pu) \quad (3.30)$$

Outro modo de se obter os valores de R_{ut} e X_{ut} é utilizando a Tabela 1, a qual apresenta algumas relações entre as potências, e os valores de X/R (relação entre reatância e resistência) dos transformadores. Para valores de potência intermediários adota-se valor de X/R da maior potência (DOCENA, 2003).

Tabela 1 - Relação X/R para transformadores.

X/R	[MVA]	X/R	[MVA]	X/R	[MVA]	X/R	[MVA]	X/R	[MVA]
4,00	0,50	8,00	2,00	11,60	4,60	19,60	16,00	35,20	80,00
4,50	0,60	8,20	2,20	12,00	5,00	20,80	18,00	36,60	90,00
5,00	0,70	8,40	2,40	12,80	6,00	22,00	20,00	38,00	100,00
5,50	0,80	8,60	2,60	13,60	7,00	23,80	26,00	39,60	120,00
6,00	0,90	8,80	2,80	14,40	8,00	25,60	32,00	41,80	140,00
6,50	1,00	9,00	3,00	15,20	9,00	27,40	38,00	42,80	160,00
6,80	1,20	10,00	3,00	16,00	10,00	29,20	44,00	44,40	180,00
7,10	1,40	10,40	3,40	17,20	12,00	31,00	50,00	46,00	200,00
7,40	1,60	10,80	3,80	18,40	14,00	32,40	60,00		
7,70	1,80	11,20	4,20	19,00	15,00	33,80	70,00		

Fonte: "Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants", IEEE Std 141-1976.

$$\alpha = \arccos\left[\tan\left(\frac{X}{R}\right)\right] \quad (3.31)$$

$$R_{ut} = Z_{ut} \times \cos(\alpha) \quad (3.32)$$

$$X_{ut} = Z_{ut} \times \sin(\alpha) \quad (3.33)$$

3.3.3.3 Impedância dos condutores (Z_{uc})

Os condutores são representados por uma resistência em série com uma reatância e tem influência no valor final da corrente de curto-circuito. Nestes cálculos necessita conhecer o valor de resistência e reatância de sequência positiva e zero do condutor elétrico, valores que são retirados de catálogos de fabricantes.

a) Resistência (R_{uc})

$$R_{c\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{uc}}{1000 \times N_{uc}} \quad (\Omega) \quad (3.34)$$

onde $R_{u\Omega}$ é a resistência de sequência positiva do condutor elétrico, dado em $m\Omega/m$; L_{uc} é o comprimento do circuito, dado em m; e N_{uc} é o número de condutores por fase do circuito.

$$R_{uc} = R_{c\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b} \text{ (pu)} \quad (3.35)$$

b) Reatância (X_{uc})

$$X_{c\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{uc}}{1000 \times N_{uc}} \text{ (\Omega)} \quad (3.36)$$

$$X_{uc} = X_{c\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b} \text{ (pu)} \quad (3.37)$$

onde $X_{u\Omega}$ é a reatância de sequência positiva do condutor fase, dado em $m\Omega/m$.

$$\vec{Z}_{uc} = R_{uc} + jX_{uc} \text{ (pu)} \quad (3.38)$$

3.3.3.4 Corrente simétrica de curto-circuito trifásico

O cálculo da corrente simétrica de curto-circuito trifásica (I_{cs}) é importante para o ajuste dos dispositivos de proteção de sobrecorrente, para verificar a capacidade de interrupção dos disjuntores e fusíveis, bem como para capacidade térmica de cabos e equipamentos.

Para conhecer a I_{cs} é necessário conhecer a impedância total até o ponto de defeito:

$$\vec{Z}_{utot} = R_{utot} + jX_{utot} \text{ (pu)} \quad (3.39)$$

A corrente base vale:

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \text{ (A)} \quad (3.40)$$

A $I_{cs3\phi}$, valor eficaz, é dada por:

$$\vec{I}_{cs} = \frac{I_b}{1.000} \times \left(\frac{1}{\vec{Z}_{utot}} \right) (kA) \quad (3.41)$$

3.3.3.5 Corrente assimétrica de curto-circuito trifásico

Para obter a corrente de curto-circuito assimétrica (I_{ca}) multiplica-se a I_{cs} correspondente pelo fator de assimetria (F_a) determinado pela Tabela 2.

$$I_{ca} = F_a \times I_{cs} (kA) \quad (3.42)$$

$$F_a = \sqrt{1 + 2 \times e^{-2\pi \times \frac{R}{X}}} \quad (3.43)$$

3.3.3.6 Impulso da corrente de curto-circuito

Este é o valor máximo da corrente de curto-circuito dado em seu valor instantâneo.

$$I_{cim} = \sqrt{2} \times I_{ca} (kA) \quad (3.44)$$

Tabela 2 - Fator de assimetria para t=1/4 ciclo.

X/R	Fa	X/R	Fa	X/R	Fa	X/R	Fa
0,40	1,00	3,00	1,30	6,50	1,49	20,00	1,64
0,60	1,00	3,20	1,32	7,00	1,51	30,00	1,67
0,80	1,02	3,40	1,34	7,50	1,52	40,00	1,68
1,00	1,04	3,60	1,35	8,00	1,53	50,00	1,69
1,20	1,07	3,80	1,37	8,50	1,54	60,00	1,70
1,40	1,10	4,00	1,38	9,00	1,55	70,00	1,71
1,60	1,13	4,20	1,39	9,50	1,56	80,00	1,71
1,80	1,16	4,40	1,40	10,00	1,57	100,00	1,71
2,00	1,19	4,60	1,41	11,00	1,58	200,00	1,72
2,20	1,21	4,80	1,42	12,00	1,59	400,00	1,72
2,40	1,24	5,00	1,43	13,00	1,60	600,00	1,73
2,60	1,26	5,50	1,46	14,00	1,61	1000,00	1,73
2,80	1,28	6,00	1,47	15,00	1,62		

Fonte: Mamede (2003 p.234)

3.3.3.7 Corrente bifásica-terra de curto-circuito

A corrente de curto-circuito bifásica ($I_{cc2\phi}$) e dada pela equação (3.45).

$$I_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cs} \text{ (kA)} \quad (3.45)$$

3.3.3.8 Corrente de curto-circuito fase-terra máxima

Para o cálculo de corrente de curto-circuito fase-terra máximo deve-se levar em consideração as impedâncias de sequência zero do transformador e condutores. Neste cálculo utiliza-se somente as impedâncias dos condutores e transformador.

$$\vec{I}_{cc1\phi max} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{uot} + \vec{Z}_{uoc}} \text{ (A)} \quad (3.46)$$

onde \vec{Z}_{uot} é a impedância de sequência zero do transformador, que é igual à sua impedância de sequência positiva; e \vec{Z}_{uoc} é a impedância de sequência zero dos condutores.

$$\vec{Z}_{uoc} = R_{uoc} + jX_{uoc} \text{ (pu)} \quad (3.47)$$

$$R_{uoc} = R_{c\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (3.48)$$

$$X_{uoc} = X_{c\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (3.49)$$

onde $R_{c\Omega 0}$ e $X_{c\Omega 0}$ são respectivamente resistência e reatância de sequência zero, valores obtidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistência e reatância dos condutores de cobre (valores médios).

Seção	Impedância de Sequência Positiva(mΩ/m)		Impedância de Sequência Zero (mΩ/m)	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
1,5	14,8173	0,1378	16,6137	2,9262
2,5	8,8882	0,1345	10,6882	2,8755
4	5,5518	0,1279	7,3552	2,8349
6	3,7035	0,1225	5,5035	2,8000
10	2,2221	0,1207	4,0222	2,7639
16	1,3899	0,1173	3,1890	2,7173
25	0,8891	0,1164	2,6891	2,6692
35	0,6353	0,1128	2,4355	2,6382
50	0,4450	0,1127	2,2450	2,5991
70	0,3184	0,1096	2,1184	2,5681
95	0,2352	0,1090	2,0352	2,5325
120	0,1868	0,1076	1,9868	2,5104
150	0,1502	0,1074	1,9502	2,4843
185	0,1226	0,1073	1,9226	2,4594
240	0,0958	0,1070	1,8958	2,4312
300	0,0781	0,1068	1,8781	2,4067
400	0,0608	0,1058	1,8608	2,3757
500	0,0507	0,1051	1,8550	2,3491
630	0,0292	0,1042	1,8376	2,3001

Fonte: Mamede (2003 p.130)

3.3.3.9 Corrente de curto-circuito fase-terra mínima

Neste cálculo além das impedâncias dos condutores e transformador é levado em consideração as impedâncias de contato, de aterramento e da malha terra.

$$\vec{I}_{cc1\phi min} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{uot} + \vec{Z}_{uoc} + 3 \times (R_{uct} + R_{umt} + R_{uat})} \quad (A) \quad (3.50)$$

onde R_{uct} é a resistência de contato, em pu ; R_{umt} é a resistência da malha de terra, também dada em pu ; e R_{uat} é a resistência do resistor de aterramento, dado em pu .

$$R_{uct} = R_{ct} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (pu) \quad (3.51)$$

$$R_{umt} = R_{mt} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (pu) \quad (3.52)$$

$$R_{uat} = R_{at} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (3.53)$$

onde R_{ct} é a impedância de contato; R_{mt} é a impedância da malha de terra; e R_{at} é a impedância de aterramento.

A impedância de aterramento é a resistência que a superfície de contato do cabo e a resistência do solo. Atribui-se geralmente o valor conservativo de $40\Omega/3$.

Pode ser obtido através de cálculo ou por medição. As companhias, por norma, admitem valor máximo de 10Ω nos sistemas de 15 a 25kV.

A impedância de aterramento geralmente é um resistor inserido entre o neutro do transformador e a malha de terra, devido a elevada corrente de curto-circuito de fase-terra.

4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do algoritmo é baseado na seletividade amperimétrica, que é baseada nos níveis de corrente do sistema elétrico.

No algoritmo são inseridos os dados do sistema elétrico como: impedância da rede e nível de curto-circuito no ponto de entrega de energia que são fornecidos pela concessionária, além dos valores de impedância do sistema elétrico referentes ao interior da instalação, como mostrado na Figura 18.

```

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba
Algoritmo de Cálculo de Correntes de Curto-Circuito e Seletividade
Desenvolvido por Willian de Oliveira®

=>Definição de Potência Base(VA) e Tensão Base(V) :
Inserir Tensão de Alta do Transformador em [V]:
Inserir Potência da Rede em [VA] (Adota-se 100MVA) :

=>Inclusão de Dados Fornecidos pela Concessionária Local:

Inserir Nível de Curto-Circuito no Ponto de Entrega da Concessionária.
Corrente em [A]:

=>Inclusão de Níveis e Circuitos do SEI.
Quantos Barramentos tem o SEI:
Quantos Circuitos Tem o barramento :

=>Inclusão de Dados dos Circuitos.[Dados em retangular ex. 2+3i]
Digite o Valor da Impedância fornecido pela Concessionária em pu:
Digite o Valor da Impedância do Transformador em pu(dado de placa):
Digite o Valor de Impedância do Barramento em Ohms:
Digite o Valor de Impedância dos Condutores em Ohms:
Digite a metragem do circuido:
Digite o número de condutores:

```

Figura 18 - Entrada de dados do algoritmo.
Fonte: Autoria própria.

A inclusão de dados do sistema é muito importante para o cálculo das correntes de curto-circuito, então necessita que os dados incluídos ao algoritmo sejam armazenados de forma segura, para que não ocorra uma distorção no resultado final. Portanto através de um *loop* no algoritmo foi possível realizar o armazenamento de todos os dados dos circuitos do sistema em uma matriz $Z_{(M,N)}$, onde M são as colunas e N as linhas, e no algoritmo M é representado por número

de barramentos do sistema e N pelo número de circuitos referente ao barramento escolhido. A referência para o armazenamento do circuito é apresentado na Figura 19, onde sempre a referência dos barramentos é de cima para baixo e a de circuitos é da esquerda para a direita, portanto dos dados do circuito onde está localizado P3 ficará armazenado em $Z_{(3,2)}$.

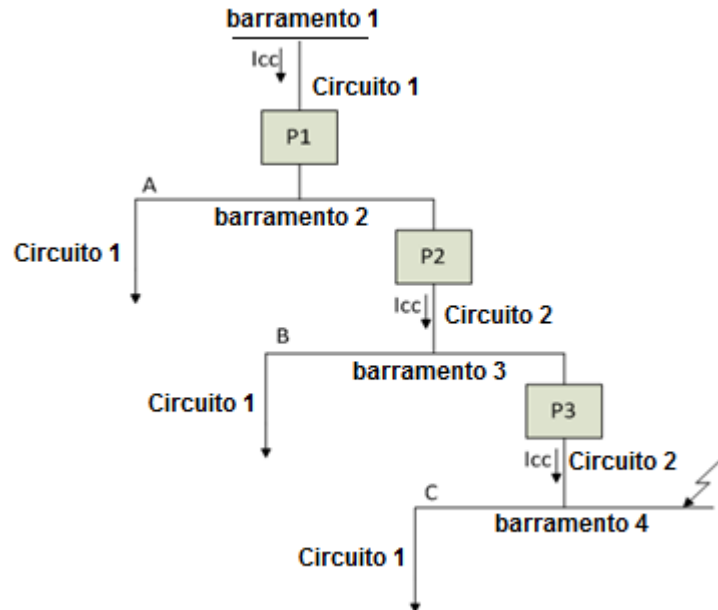


Figura 19 - Referência de barramentos e circuitos.
Fonte: Autoria própria.

Para a realização do cálculo da corrente de curto-circuito no ponto de falta é necessário incluir ao algoritmo quais circuitos esta corrente percorre até a falta para que seja realizada a soma das impedâncias desde o gerador até o ponto de curto-circuito, como mostra a Figura 20. Portanto, caso a falta ocorra no barramento 4, deve-se dizer ao sistema que as impedâncias a serem utilizadas no cálculo serão $Z_{(1,1)}$, $Z_{(2,2)}$ e $Z_{(3,2)}$.

```
=>Inclusão de Dados de Curto-Circuito.
Quais circuitos estão entre o CC e a geração?

O Circuito n do Barramento m deve ser considerado?
[1]Sim [0]Não : 1
```

Figura 20 - Soma de impedância total de falta.
Fonte: Autoria própria.

Após todos os dados inseridos, o algoritmo mostra os resultados de corrente de curto-circuito no ponto de falta e também o nível de curto-circuito na rede elétrica da concessionária, como demonstrado na Figura 21.

Corrente de Curto-Circuito Trifásica Simétrica no ponto de falta é _____ [A]
Corrente de Curto-Circuito Trifásica Assimétrica no ponto de falta é _____ [A]
Corrente de Curto-Circuito Trifásica Simétrica da rede é _____ [A]
Corrente de Curto-Circuito Trifásica Assimétrica da rede é _____ [A]

Figura 21 - Resultados das correntes de curto-circuito.
 Fonte: Autoria própria.

Portanto, é possível através do cálculo das correntes de curto-circuito verificar a seletividade do sistema em relação à companhia de energia elétrica local, tanto quanto aos pontos desejados do SEI. O ponto mais importante de coordenação de proteções é a relação de coordenação seletiva entre o SEI e a companhia de energia, pois as proteções do SEI devem garantir que caso ocorra uma falta no interior de suas instalações, a sua proteção de entrada atue de forma a garantir que o sistema elétrico da companhia continue operando normalmente.

Após ter os valores de corrente de curto-circuito é possível traçar as curvas Corrente x Tempo destas correntes para verificar a seletividade entre elas, como mostrado na Figura 22.

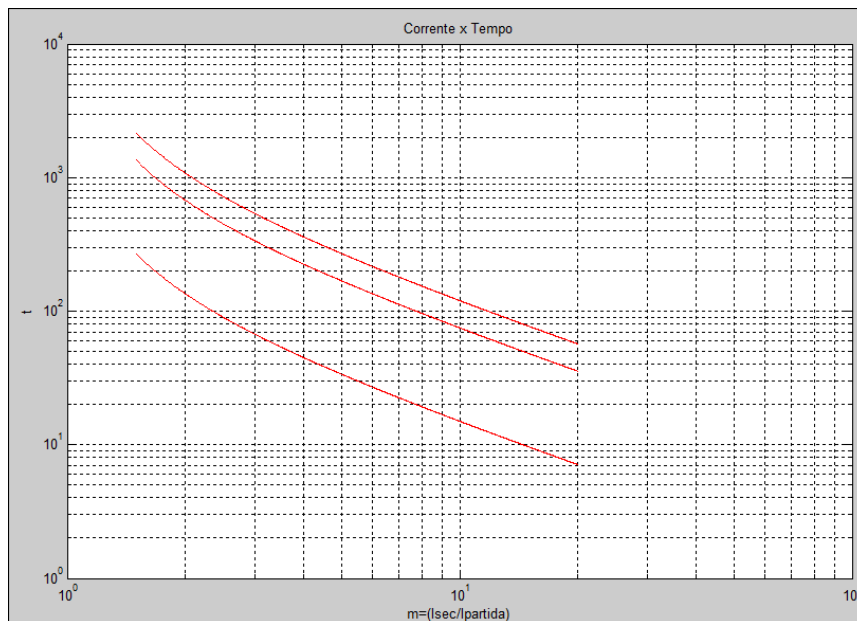


Figura 22 - Curva de seletividade das correntes de curto-circuito.
 Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS

A validação do algoritmo é realizada através do cálculo de curto-circuito demonstrado por Merlin (2011), onde é apresentado o diagrama unifilar do sistema, como mostra a Figura 23, e seus resultados do cálculo de curto-circuito e seletividade na Tabela 8.

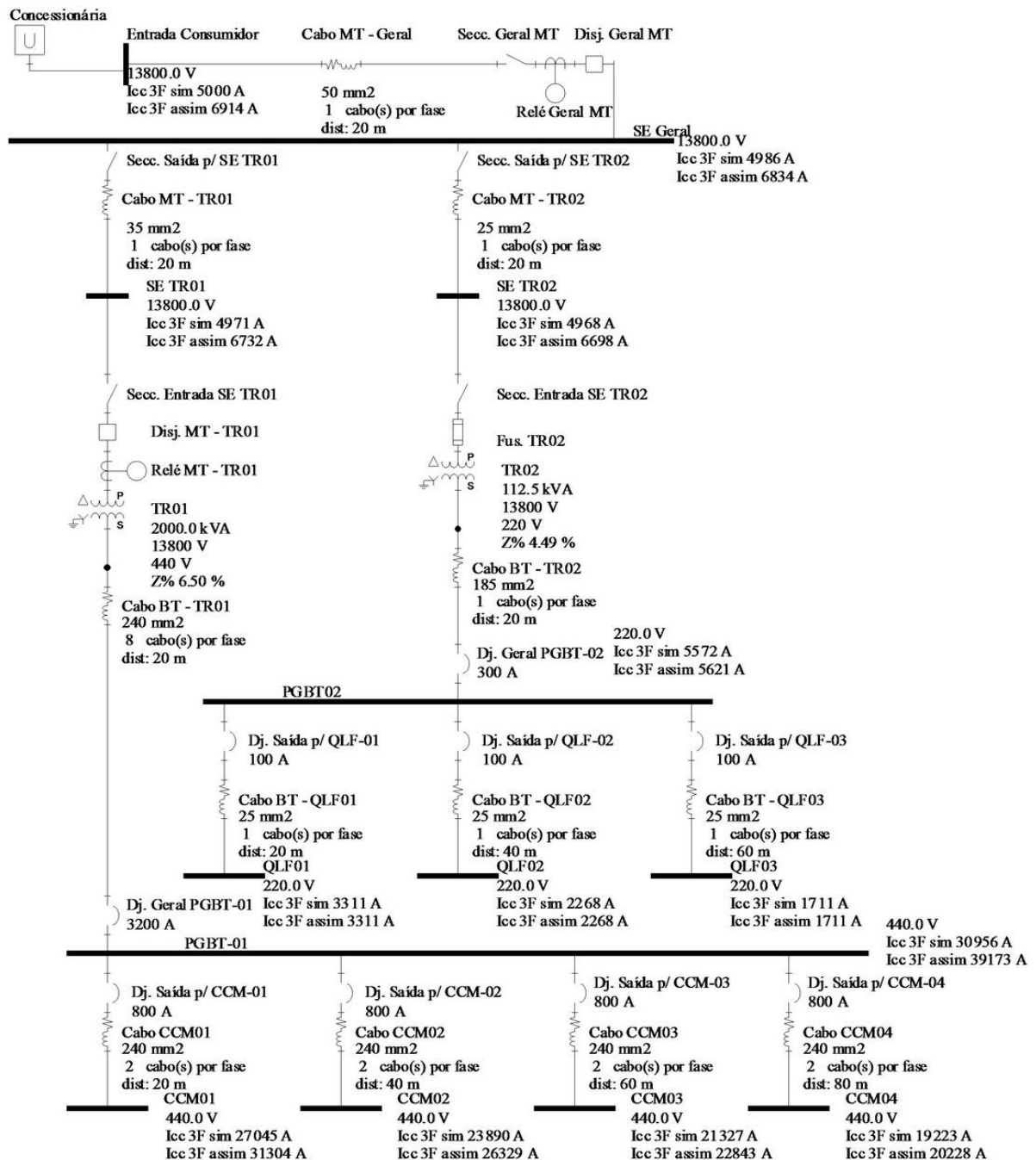


Figura 23- Diagrama unifilar do sistema.
Fonte: MERLIN (2011).

Para a realização dos cálculos referentes ao diagrama da Figura 23, de acordo com Merlin (2011), foram utilizados os dados das Tabelas 4, 5, 6 e 7:

Tabela 4 - Dados da concessionária.

Nível de Curto-Circuito no Ponto de Entrega (A)	Relação X/R
5.000	8

Tabela 5 - Impedância dos cabos de média tensão.

Cabo	Resistência de Sequência Positiva por metro (Ω/km)	Reatância de Sequência Positiva por metro (Ω/km)
50mm ² (8,7/15kV)	0,4938	0,1551
35mm ² (8,7/15kV)	0,6684	0,1651
25mm ² (8,7/15kV)	0,9272	0,1726

Fonte: Catálogo Ficap, cabos Fipex 0,6/1kV, singelos, instalados em trifólio.

Tabela 6 - Impedância dos cabos de baixa tensão.

Cabo	Resistência de Sequência Positiva por metro (Ω/km)	Reatância de Sequência Positiva por metro (Ω/km)
25mm ² (8,7/15kV)	0,9362	0,1150
240mm ² (8,7/15kV)	0,1009	0,0980
185mm ² (8,7/15kV)	0,1303	0,0980

Fonte: Catálogo Ficap, cabos Fipex 0,6/1kV, singelos, instalados em trifólio.

Tabela 7 - Dados dos transformadores.

Transformador	Potência(kVA)	Tensão (V)	Impedância Percentual (Z%)	Resistência Percentual (R%)
TR01	2.000	13.800 – 440/254	6,5%	1,1%
TR02	112,5	13.800 – 220/127	4,49%	2,56%

Através dos dados apresentados anteriormente, foi possível chegar aos resultados de correntes de curto-circuito de forma seletiva para o sistema de acordo com Tabela 8 (MERLIN, 2011).

Tabela 8 - Nível de curto-circuito trifásico calculados.

Ponto de Falta	Tensão (v)	Zeq (pu)	Icc3øsim (A)	Relação X/R	Icc3øassim (A)
Entrada Consumidor	13.800	0,8367	5000	8	6914
SE Geral	13.800	0,8390	4986	7,63	6834
SE TR01	13.800	0,8417	4971	7,19	6732
SE TR02	13.800	0,8421	4968	7,02	6698
PGBT-01	440	4,2388	30956	5,23	39173
PGBT-02	220	47,1018	5572	1,33	5621
CCM01	440	4,8518	27045	3,54	31304
CCM02	440	5,4926	23890	2,81	26329
CCM03	440	6,1524	21327	2,41	22843
CCM04	440	6,8259	19223	2,15	20228
QLF01	220	79,2611	3311	0,63	3311
QLF02	220	115,6912	2268	0,45	2268
QLF03	220	153,3784	1711	0,36	1711

Fonte: MERLIN (2011).

Utilizando o algoritmo elaborado neste trabalho para realizar os cálculos de correntes de curto-circuito trifásicas do diagrama unifilar da Figura 23, foi possível chegar a resultados muito próximos, como mostrados na Tabela 9. Na Figura 24 é apresentado as correntes de curto-circuito calculadas pelo algoritmo para a falta no SE Geral.

Tabela 9 - Níveis de curto-circuito trifásicos simulados pelo algoritmo.

Ponto	Tensão (v)	Zeq (pu)	Icc3øsim (A)	Relação X/R	Icc3øassim (A)
Entrada Consumidor	13.800	0,8367	5000,00	8	6913,53
SE Geral	13.800	0,8390	4986,45	7,63	6833,80
SE TR01	13.800	0,8417	4970,53	7,19	6732,57
SE TR02	13.800	0,8421	4968,17	7,02	6697,24
PGBT-01	440	4,2388	30955,92	5,23	39175,59
PGBT-02	220	47,1018	5571,59	1,33	5620,84
CCM01	440	4,8518	27044,80	3,54	31294,90
CCM02	440	5,4926	23889,59	2,81	26329,44
CCM03	440	6,1524	21327,61	2,41	22846,35
CCM04	440	6,8259	19223,25	2,15	20231,11
QLF01	220	79,2611	3310,98	0,63	3311,14
QLF02	220	115,6912	2268,38	0,45	2268,39
QLF03	220	153,3784	1711,01	0,36	1711,01

Fonte: Autoria própria.


```
=>Inclusão de Dados de Curto-Circuito.  
Quais circuitos estão entre o CC e a geração?  
|  
O Circuito 1 do Barramento 1 deve ser considerado?  
[1]Sim [0]Não : 1  
Corrente de Curto-Circuito Trifásica Simétrica no ponto de falta é 4.986448e+003[A]  
Corrente de Curto-Circuito Trifásica Assimétrica no ponto de falta é 6.833797e+003[A]  
Corrente de Curto-Circuito Trifásica Simétrica da rede é 5.000001e+003[A]  
Corrente de Curto-Circuito Trifásica Assimétrica da rede é 6.913528e+003[A]
```

**Figura 24 - Corrente de curto-circuito no SE Geral simulada pelo algoritmo.
Fonte: Autoria própria.**

Os resultados apresentados não são exatamente iguais, porém podem ser considerados verdadeiros, pois o resultado com maior erro apresentado pelo algoritmo foi de 0,029%.

6 CONCLUSÕES

A partir da metodologia apresentada, foi possível atingir os objetivos específicos e o objetivo geral deste trabalho, que era o desenvolvimento de um algoritmo capaz de realizar cálculo de correntes de curto-circuito e seletividade em SEIs.

Foi possível desenvolver um algoritmo capaz de realizar cálculo de correntes de curto-circuito e seletividade amperimétrica de um SEI, possibilitando que os valores de corrente de curto-circuito de projetos de instalações possa ser apresentado de forma exata, dependendo apenas da exatidão dos dados retirados do sistema e incluídos no algoritmo.

Através do desenvolvimento do algoritmo foi possível observar a complexidade para realizar o cálculo de curto-circuito, pois este foi realizado primeiramente teoricamente para ser inserido ao algoritmo. As equações referentes ao cálculo de curto-circuito são complexas e podem levar o calculista ao erro de forma que este não perceba, gerando um resultado errôneo das correntes de curto-circuito. Portanto, através do algoritmo desenvolvido é possível otimizar o tempo para realização dos cálculos e garantir que o resultado gerado por este algoritmo seja confiável.

O algoritmo serve de auxílio para resolução de cálculos de correntes de curto-circuito e seletividade, e pode ser utilizado para SEIs de grande porte, com número maior de barramentos e circuitos que o apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.

DOCENA, A. P. P. **Software para Cálculo de Curto-Circuito e suas Aplicações para Proteções de Sistemas Industriais**. Projeto Final de Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2003.

FLORES, E. L.; PEREIRA, P. S. **Ajuste Computacional Interativo de Dispositivos de sobrecorrente para Sistemas Elétricos de Potência**. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, 5., Curitiba, 1995, vol. 1, p. 165-168.

GUIMARÃES, E. B. de A., NEUMANN, M. T. P. **Programa para cálculo de curto-circuito**. Projeto Final de Graduação da Universidade Federal do Paraná, 2009.

MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 7ª Ed. São Paulo, LTC, 2003.

MERLIN, V.L. **Análise da Influência do Comprimento de Cabos de Baixa e Média Tensão em Cálculos de Curto Circuito trifásicos**. Revista Lumière, São Paulo, 2011, ed. 161, p. 64-78.

NEGRAO, D. L. A. **Metodologia Automática para a Realização da Coordenação e Seletividade da Proteção de Sobrecorrente em Sistemas Elétricos Industriais**. Monografia da Escola de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

ROEPER, R. **Correntes de Curto-Circuito em Redes Trifásicas**. São Paulo, Nobel: Siemens S.A., 1990.

SATO, F. **Corrente Assimétrica de Curto-Circuito**. In: Notas de Aula da Universidade Estadual de Campinas, 2005.

SILVA, E. P. da; LOPES, V. L.; MARINUS, N. S. de M. L. **Análise e Simulação de Circuitos Elétricos no Ambiente Matlab®**. In: Mini-Curso do Programa de Educação Tutorial da Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

ZANIRATO, E. **Modernização das Funções Seletividade Lógica e Falha do Disjuntor com a Utilização da Norma IEC-61850**. Induscon, 2008.