

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUIS HENRIQUE TOCCOLINI

**PROTEÇÃO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS COM O
AUXÍLIO DE PLANILHAS ELETRÔNICAS**

**PATO BRANCO
2022**

LUIS HENRIQUE TOCCOLINI

**PROTEÇÃO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS COM O AUXÍLIO DE
PLANILHAS ELETRÔNICAS**

**Protection of industrial electrical installations with the Help from electronic
worksheets**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Me. José Paulo de Barros Neto

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUIS HENRIQUE TOCCOLINI

**PROTEÇÃO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS COM O
AUXÍLIO DE PLANILHAS ELETRÔNICAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14 de junho de 2022

Alexandre Batista de Jesus Soares
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Osis Eduardo Silva Leal
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Paulo de Barros Neto
Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Carmen Toccolini e Josmar Toccolini pela educação e apoio que me deram durante toda minha vida. Essa conquista é nossa.

Ao meu namorado Geovani Dias, com todo seu apoio e ajuda que me deu durante esses anos.

Aos meus irmãos Matheus e Michel, sempre me apoiando com minhas escolhas.

Ao meu orientador e professor Me. José Paulo de Barros pela disponibilidade e atenção dada a esse trabalho.

Aos professores da UTFPR-PB que tiveram papel na minha formação e aos servidores que colaboraram com essa realização.

E aos meus amigos dentro e fora da universidade, responsáveis pelo apoio e distração durante esses anos de formação.

RESUMO

TOCCOLINI, Luis Henrique. **Proteção de instalações elétricas industriais com o auxílio de planilhas eletrônicas**. 2021. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

A grande demanda por energia elétrica vem aumentando. Os projetos e exigências das concessionárias e normas relativos à segurança dos sistemas são cada vez maiores. Com isso, os problemas gerados pela complexidade das instalações, tais como curto-circuitos e danos a equipamentos elétricos integrados ao sistema elétrico de uma indústria por exemplo, podem ser muito graves. Por este motivo, o desenvolvimento do sistema de proteção dos sistemas elétricos com qualidade é uma necessidade cada vez maior. A proteção de equipamentos como, disjuntores, transformadores, relés, entre outros, que ao longo dos últimos anos avançaram tecnologicamente, necessita estudos e cuidados cada vez maiores. A automatização desse processo por meio de software, permite ao engenheiro ganhar tempo e confiança ao elaborar estudos e projetos de proteção. Diante disso, este trabalho visa elaborar a automatização do dimensionamento de um sistema de proteção elétrico industrial alimentado em média tensão e carga acima de 300 kVA. Esta situação exige a construção de uma cabine de proteção para alimentar o consumidor. Essa cabine deve ter junto a medição, a proteção e opcionalmente, a transformação no mesmo local. Também são estudadas as características, tipos e comportamento dos equipamentos de proteção, coordenação e seletividade do sistema. Além disso, será apresentado o cálculo automático da demanda prevista no ponto de entrega, considerando diferentes tipos de motores, demanda da iluminação e demais circuitos elétricos. A automatização do dimensionamento da proteção alcança o objetivo ao obter as curvas de fase e neutro do relé e apresentar os pontos da corrente de inrush e ANSI, nominal do circuito, partidas neutro e fase, e as faltas. Tudo isso resumido num coordenograma que facilita a análise e posterior aprovação do projeto, pela concessionária.

Palavras-chave: Proteção, elétrico, coordenação e seletividade, corrente, curto-circuito.

ABSTRACT

TOCCOLINI, Luis Henrique. **Protection of industrial electrical installations with the help of electronic spreadsheets**. 2022. 72 f. Completion of course work - Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2022.

The great demand for electricity is increasing. The projects and requirements of the concessionaires and norms related to the security of the systems are increasing. As a result, the problems generated by the complexity of the installations, such as short circuits and damage to electrical equipment integrated into the electrical system of an industry, for example, can be very serious. For this reason, the development of a quality protection system for electrical systems is an increasing need. The protection of equipment such as circuit breakers, transformers, relays, among others, which over the last few years have advanced technologically, requires increasing studies and care. The automation of this process through software allows the engineer to gain time and confidence when preparing protection studies and projects. Therefore, this work aims to elaborate the automation of the dimensioning of an industrial electrical protection system fed at medium voltage and load above 300 kVA. This situation requires the construction of a protection cabin to feed the consumer. This cabin must have measurement, protection and, optionally, transformation in the same place. The characteristics, types and behavior of the protection, coordination and selectivity equipment of the system are also studied. In addition, the automatic calculation of the expected demand at the point of delivery will be presented, considering different types of motors, lighting demand and other electrical circuits. The automation of protection sizing achieves the objective by obtaining the phase and neutral curves of the relay and presenting the inrush and ANSI current points, circuit rated, neutral and phase starts, and faults. All of this is summarized in a coordination chart that facilitates the analysis and subsequent approval of the project by the concessionaire.

Keywords: Protection, electrical, coordination and selectivity, current, short circuit.

ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
BTU	British Thermal Unit
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
EEPROM	Electrical Erasable Programmable Read Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory
FP	Fator de Potência
FS	Fator Simultaneidade
FU	Fator de Utilização
MT	Média Tensão
p.u.	por unidade
RAM	Random Access Memory
RTC	Relação do Transformador de Corrente
TC	Transformador de Corrente
TUG	Tomada de Uso Geral
TP	Transformador Potencial
TUE	Tomadas de Uso Específico

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Comprimento
D_{CMM}	Demanda no quadro geral dos motores
$D_{iluminação}$	Demanda da iluminação
D_m	Demanda solicitada
F_S	Fator de sobrecorrente
I_{ANSI}	Corrente ANSI da fase
I_{NANSI}	Corrente ANSI do neutro
I_b	Corrente base
I_{cc1}	Corrente de curto-circuito monofásica
I_{cc2}	Corrente de curto-circuito bifásica
I_{cc3}	Corrente de curto-circuito trifásica
I_{inrush}	Corrente inrush
$I_{instantanea F}$	Corrente instantânea da fase
$I_{instantanea N}$	Corrente instantânea do neutro
I_{mag}	Corrente de magnetização
I_n	Corrente nominal
I_p	Corrente de partida
n	Rendimento do motor
N_{lamp}	Número de lâmpadas
n_{mot}	Número de motores
P_N	Potência nominal do motor
P_{btu}	Potência em btu
$P_{eixo-motor}$	Potência no eixo do motor
P_r	Perdas do reato
P_w	Potência em watts
ρ	Resistividade do cobre
S_b	Potência aparente base
S_b	Potência base
S_{cobre}	Área de secção transversal dos condutores

S_n	Potência aparente nominal
t	Tempo
V_b	Tensão base
Z	Impedância
Z_-	Impedância de sequência negativa
Z_+	Impedância de sequência positiva
Z_0	Impedância de sequência zero
Z_b	Impedância base
$Z_{contato}$	Impedância de contato
Z_{pu}	Impedância em p.u.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de sequências positivas, negativas e zero.....	16
Figura 2 - Fasores de tensões e correntes durante os curtos-circuitos.....	17
Figura 3 - (a) Estrutura interna de um TC tipo barra e (b) transformador de corrente tipo barra	21
Figura 4 - Estrutura interna de um TC tipo enrolado	21
Figura 5 - (a) Estrutura interna de um TC do tipo janela e (b) transformador de corrente do tipo janela.....	22
Figura 6 - Estrutura simplificada de um relé.....	25
Figura 7 - Diagrama funcional de um relé digital	26
Figura 8 - Subestação de medição, proteção e transformação acima de 300 kVA...29	
Figura 9 - Diagrama unifilar de proteção	30
Figura 10 - Diagrama unifilar do sistema de proteção.....	38
Figura 11 - (a) Curto-circuito trifásico e (b) circuito de sequências trifásica	39
Figura 12 - (a) Curto-circuito monofásico e (c) circuito de sequência monofásica	41
Figura 13 - (a) Curto-circuito bifásico-terra e (b) circuito de sequência bifásica-terra	42
Figura 14 - Tabela de cálculo de demanda dos motores	51
Figura 15 - Cálculo da potência em watts do ares-condicionados	52
Figura 16 - Cálculo de demanda dos equipamentos comum	52
Figura 17 - Cálculo de demanda das lâmpadas	53
Figura 18 - Demanda contratada.....	53
Figura 19 - Coleta das impedâncias de rede e bases	54
Figura 20 - Tipo de curva e concessionária	54
Figura 21 - Relação de dados das concessionárias COPEL e CELESC	55
Figura 22 - Entrada de dados do transformador 1.....	55
Figura 23 - Entrada de dados do cabo e suas impedâncias por km.....	56
Figura 24 - Cálculo de carga do TP de alimentação	57
Figura 25 - Dados da obra	58
Figura 26 - Resolução do cálculo de demanda dos motores	59
Figura 27 - Resolução do cálculo de demanda da iluminação	60
Figura 28 - Cálculo da demanda total prevista.....	60
Figura 29 - Cálculo das bases.....	61
Figura 30 - Cálculo da impedância da rede em p.u.....	61
Figura 31 - Cálculo de falta trifásica	62
Figura 32 - Cálculo de falta monofásica	62
Figura 33 - Cálculo da falta bifásica	62
Figura 34 - Cálculo da mudança de base e da falta trifásica no ponto do transformador.....	63
Figura 35 - Cálculo das correntes nominais dos transformadores, correntes de partida de fase e de neutro.....	63

Figura 36 - Cálculo das correntes ANSI, de magnetização, inrush, instantânea de fase e neutro	64
Figura 37 - Cálculo do dial de tempo de fase	64
Figura 38 - Coeficientes de curva.....	65
Figura 39 - Dados para plotar o gráfico de coordenograma de proteção	65
Figura 40 - Transformador dimensionado	67
Figura 41 - Dimensionamento do TC e TP de proteção e do disjuntor geral.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator de simultaneidade	33
Tabela 2 - Fatores de utilização	33
Tabela 3 - Corrente típica do ponto ANSI	44
Tabela 4 - Coeficientes para os tipos de curvas.....	47
Tabela 5 - Impedância de sequência dos condutores	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivo específico.....	19
1.2 Estrutura do trabalho.....	19
2 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO	20
2.1 Transformador de corrente	20
2.1.1 Tipos construtivos de TC	20
2.1.1.1 TC do tipo barra	21
2.1.1.2 TC do tipo enrolado	21
2.1.1.3 TC do tipo janela.....	22
2.2 Transformador de potencial	22
2.3 Disjuntor de média tensão	23
2.3.1 Tipos de disjuntores.....	23
2.4 Relé.....	24
2.4.1 Tipos de relés de sobrecorrente	24
2.4.1.1 Relé eletromecânico	25
2.4.1.2 Relé estático	25
2.4.1.3 Relé digital	26
2.5 Fusível	27
2.6 Harmonização dos equipamentos.....	29
3 PROTEÇÃO E SELETIVIDADE	32
3.1 Cálculo de demanda	32
3.1.1 Tipo de equipamentos	32
3.1.1.1 Motor.....	32
3.1.1.2 Ar condicionado	34
3.1.1.3 Iluminação	35
3.1.1.4 Tomadas.....	35
3.2 Cálculo das bases.....	36
3.3 Impedância em PU.....	37
3.4 Cálculo da corrente de curto-circuito.....	38

3.4.1 Curto-circuito trifásico	39
3.4.2 Curto-circuito monofásico	41
3.4.3 Curto-circuito bifásico	42
3.5 Coordenação e dimensionamento	43
3.5.1 Corrente de partida	43
3.5.2 Corrente ANSI	44
3.5.3 Corrente de magnetização.....	45
3.5.4 Corrente de inrush	45
3.5.5 Corrente instantânea	46
3.5.6 Dial de tempo.....	47
3.6 Dimensionamento do TC	48
3.6.1 Critério de sensibilidade.....	48
3.6.2 Critério de saturação.....	48
3.7 Dimensionamento do TP.....	50
4 AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO	51
4.1 Demanda	51
4.2 Dados da concessionária.....	54
4.3 Transformadores.....	55
4.4 Cabos.....	56
4.5 TP de alimentação	57
4.6 Informações do projeto	58
5 RESULTADOS	59
CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A invenção da eletricidade trouxe conforto, praticidade e desenvolvimento de novas tecnologias. Com isso, buscou-se várias formas para distribuir energia elétrica igualmente para todos, independente da distância e da quantidade de carga instalada (MIRANDA, 2006).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a distribuição de energia elétrica é composta por níveis diferentes de tensões, selecionados de acordo com parâmetros técnicos econômicos obtidos para cada situação. De maneira geral alta tensão (AT) (superior a 69 kV e inferior a 230 kV) utiliza-se para transmissão com o intuito de diminuir as perdas, a média tensão (MT) (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) para distribuição e baixa tensão (BT) (igual ou inferior a 1 kV) utilizada no fornecimento de energia elétrica ao consumidor.

Segundo a ANEEL, No Brasil, independente do tipo de carga conectada no sistema de energia elétrica, exige-se que as concessionárias entreguem um produto e serviço de qualidade, ou seja, a energia elétrica deve-se manter a qualidade e continuidade no fornecimento de energia elétrica.

Segundo a NR10 de Segurança em instalações e serviços com eletricidade, são comuns os acidentes em sistemas de energia elétrica, e suas causas são inúmeras. Numa indústria, por exemplo, os acidentes podem ser ocasionados pela falta de manutenção em um equipamento, pela utilização de equipamentos de baixa qualidade, pela operação de equipamentos por pessoas não qualificadas, pela alta umidade num ambiente com condutores expostos, entres outros.

Normalmente, a proteção de sistemas elétricos tem por objetivo mitigar danos causados por curto-circuito, sobrecargas, sobretensões e subtensões os quais podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos. A função da proteção é zelar pela vida, proteger equipamentos de forma a poupar tempo e custos com manutenção e interromper o funcionamento caso ocorra alguma anomalia no sistema (ALMEIDA, 2000).

Segundo Mamede (2017) para que um sistema de proteção cumpra a sua finalidade, o mesmo deve atender os seguintes requisitos:

Seletividade: é a autonomia do sistema de interromper o circuito danificado, garantindo o funcionamento dos outros, sem danificar a qualidade desses.

Exatidão e Segurança: deve garantir com confiabilidade, que o sistema atue de forma correta e segura, independente da situação.

Sensibilidade: um sistema deve estar preparado para qualquer anomalia, para isso se propõe uma faixa de sensibilidade aos equipamentos, o qual deve atuar respeitando esse intervalo, quanto menor a faixa, maior a sensibilidade, logo maior a confiabilidade, porém tem situações em que a sensibilidade muito alta pode interromper desnecessariamente o circuito.

Para iniciar o dimensionamento de um sistema de proteção ideal é necessário realizar o cálculo de curto-circuito, a partir das impedâncias, tensões e potência fornecida pela concessionária. Algumas concessionárias fornecem os dados de impedância do sistema elétrico no ponto de entrega em p.u.¹, outras, fornecem no sistema internacional de medida (MAMEDE,2017).

Num sistema trifásico onde tem três fasores desequilibrados, conforme o Teorema de Fortescue², podem ser decompostos em três sistemas equilibrados de fasores (MEDEIROS, 2011).

Medeiros (2011) define essas componentes como:

Componente de sequência positiva: Três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si, e tendo a mesma sequência de fase que os fasores originais.

Componente de sequência negativa: Três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si, porém, com a sequência de fase oposta à dos fasores originais.

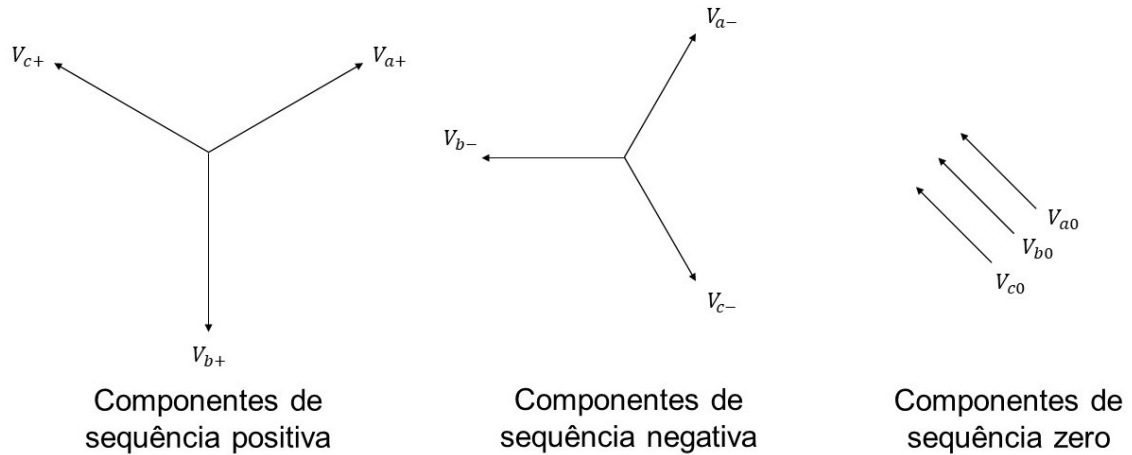
Componente de sequência zero: Três fasores iguais em módulo, com defasagem nula entre si.

¹ Matos (2003) define que, o sistema "por unidade" ou sistema p.u., consiste na definição de valores de base para as grandezas, seguida da substituição dos valores das variáveis e constantes pelas suas relações com os valores de base pré-definidos.

² Medeiros (2011) define o teorema de Fortescue como, qualquer sistema desequilibrado de fasores (tensões ou correntes), pode ser decomposto em três sistemas de fasores equilibrados girando no mesmo sentido do sistema original.

Tais situações podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1 - Componentes de seqüências positivas, negativas e zero

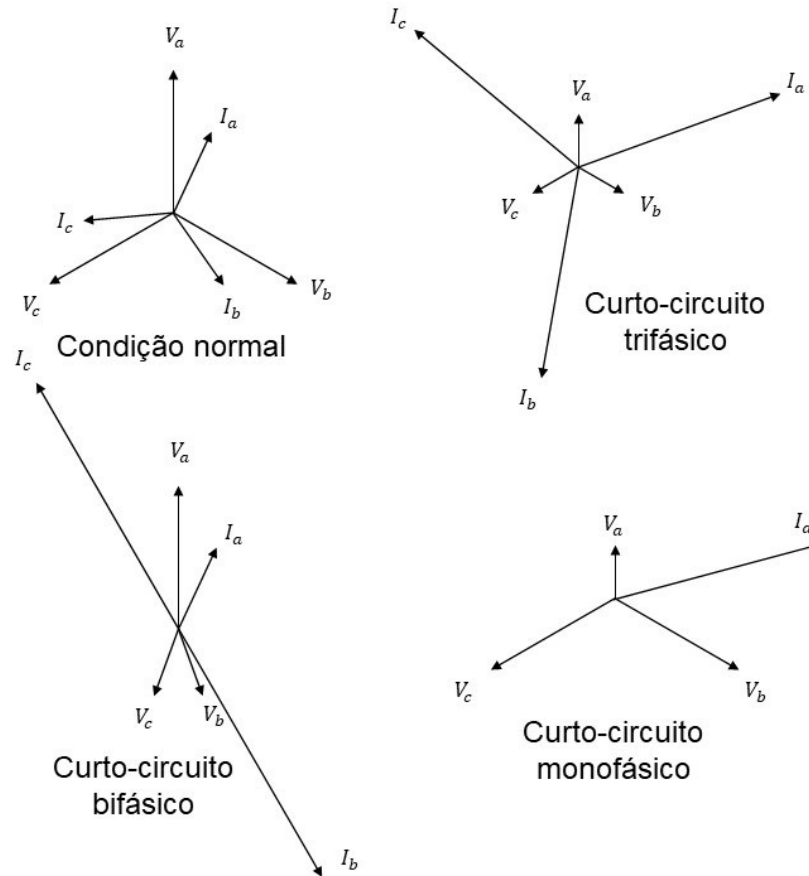


Fonte: Adaptado de Stevenson (1987 p. 296)

Em seguida, calculam-se os níveis de curto-circuitos, as quais são perturbações mais sérias que podem afetar um sistema de energia elétrica, que em sua grande maioria são desequilibrados, podendo ser fase-fase ou fase-terra, sendo esse último o mais comum. Também podem ser classificados por monofásico, bifásico e trifásico, dentre os quais destaca-se o curto-circuito trifásico, pois, é o mais severo por resultar nos maiores valores de corrente elétrica, e o curto-circuito monofásico que apesar de resultar nas menores correntes elétricas de defeito, ocorre com mais frequência. Logo, esses dois são os mais relevantes para serem analisados e estudados (SATO E FREITAS, 2015).

Na Figura 2 é possível observar o comportamento das tensões e das correntes em cada situação.

Figura 2 - Fasores de tensões e correntes durante os curtos-circuitos



Fonte: Adaptado de Sato e Freitas (2015, p. 86)

É possível observar na Figura 2, que na condição normal e no curto-circuito trifásico, tanto a corrente quanto a tensão encontram-se equilibradas, com módulos de tensão e corrente iguais entre as fases e mesma defasagem entre si. Nas outras situações, bifásico e monofásico, o módulo dos vetores de tensão que se encontra em curto-circuito são menores e suas respectivas correntes, as quais são significativamente maiores e defasadas, já as fases que não se encontram em curto, apresentam uma amplitude ligeiramente maior para as tensões (SATO, FREITAS, 2015).

A automatização desse cálculo permite uma maior confiabilidade e agilidade para execução do projeto, fato esses que são empecilhos para a realização do cálculo manual, uma vez que se torna mais trabalhoso e demorado a sua execução.

Para iniciar os cálculos de curto-circuito, define-se a demanda da indústria, a qual deve ser calculada a partir de um fator de potência, conforme a resolução (ANEEL 414/2010) fixada no mínimo em 0,92 e um fator de demanda estimado segundo a carga industrial a ser instalada. No desenvolvimento do cálculo, é preciso considerar a impedância dos equipamentos e a impedância de comprimento dos condutores (MAMEDE,2017).

Para elaboração da automatização dos cálculos de proteção, foi utilizado o Excel com licença obtida pelo aluno, uma vez que é um software mais prático para essa operação, pois não demanda tanto conhecimento do mesmo, uma vez que o foco principal desse trabalho é o estudo do cálculo. Na entrada será solicitado todos os dados necessários para os cálculos, com foco na Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A (CELESC), pois são as duas maiores concessionárias da região. A preferência será pela entrada de valores com unidades pré-determinadas, podendo ser p.u. ou no sistema internacional de medidas.

Na saída apresentou-se o dimensionamento das características dos equipamentos de proteção e também, a curva de comportamento do relé. Os resultados foram aperfeiçoados e aprofundados com a elaboração da automatização dos cálculos.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O trabalho visa elaborar um método rápido para dimensionamento das grandezas dos equipamentos de proteção de sistema elétrico industrial alimentado por uma rede primária para sistemas acima de 300 kVA.

1.1.2 Objetivo específico

- Estudar o comportamento e as características dos principais equipamentos de proteção de sistemas elétricos industriais com alimentação primária e para transformadores acima de 300 kVA.
- Apresentar os cálculos automatizados e seus comportamentos.
- Utilizar os dados de fornecimento das concessionárias do Paraná (COPEL) e Santa Catarina (CELESC) para a automatização.
- Analisar os resultados.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por 5 capítulos, o primeiro capítulo é introdutório, apresentando conteúdo básico ao trabalho, junto com os objetivos geral e específico. O capítulo dois apresenta o estudo dos equipamentos de proteção, com suas características, comportamento e harmonização. No capítulo três será apresentado as equações utilizadas para proteção e seletividade. No capítulo quatro será demonstrada a entrada de dados da automatização do sistema de proteção. No capítulo cinco apresentará os resultados obtidos através da automatização e por fim terá as conclusões do trabalho.

2 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO

Neste capítulo serão estudados os principais equipamento de proteção, bem como o seu comportamento, que são empregados para protegerem contra sobrecorrente, dentre eles estão os transformadores de corrente e potencial, disjuntor de média tensão, relé e fusível. Também será estudado a harmonização desses equipamentos, ou seja, como eles interagem entre si.

2.1 Transformador de corrente

Os transformadores de corrente (TC's) são dispositivos essenciais no sistema de proteção elétrica, tendo como função reduzir a corrente elétrica, ação essa, importante para atuação dos sistemas de proteção e medição, visto que o fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias para as indústrias onde utilizam sistemas de proteção, é em corrente alternada e na maioria dos casos em média tensão. Esses equipamentos podem ser usados tanto para serviço de proteção quanto para serviço de medição (COTOSCK, 2007), porém, neste trabalho será tratado apenas para uso de proteção.

Ligados em série, uma por fase, o TC possui dois enrolamentos de cobre isolados eletricamente, o primário, em geral, possui poucas espiras e o secundário é padronizado para corresponder a uma corrente normalmente de 5 ampères (MARDEGAN, 2010).

2.1.1 Tipos construtivos de TC

Almeida (2000) afirma que o TC possui duas classes:

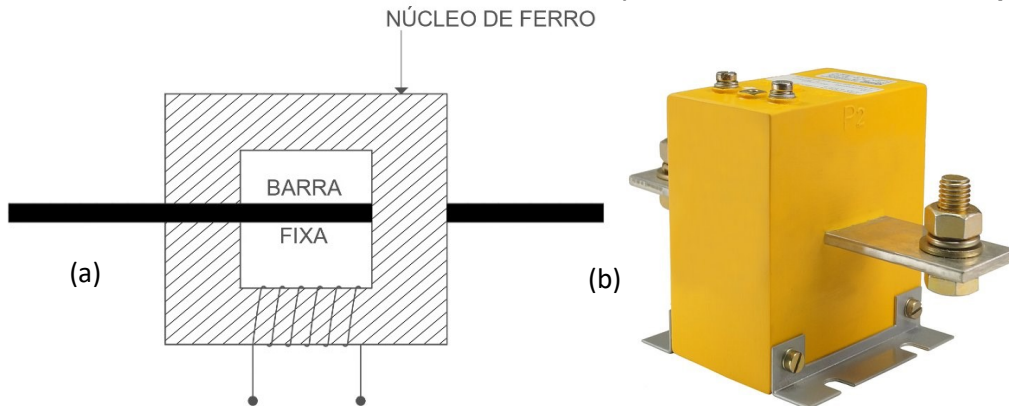
Dependendo das características construtivas dos TCs, a reatância de dispersão do enrolamento secundário será maior ou menor. Na prática eles são ditos de baixa impedância (classe B, segundo a ABNT, ou L, segundo a ASA) ou tipo bucha, e de alta impedância (classe A, segundo a ABNT, ou H segundo a ASA) ou de enrolamento concentrado

Existem diversos tipos de TC, os quais são determinados conforme a disposição do enrolamento primário e a construção do núcleo (MAMEDE, 2017), as principais categorias são descritas a seguir.

2.1.1.1 TC do tipo barra

Esse TC é utilizado em altas correntes, o mesmo possui uma barra fixa em seu núcleo (MAMEDE, 2017) como demonstrada na Figura 3a, já na Figura 3b é possível observar a carcaça do TC tipo barra.

Figura 3 - (a) Estrutura interna de um TC tipo barra e (b) transformador de corrente tipo barra

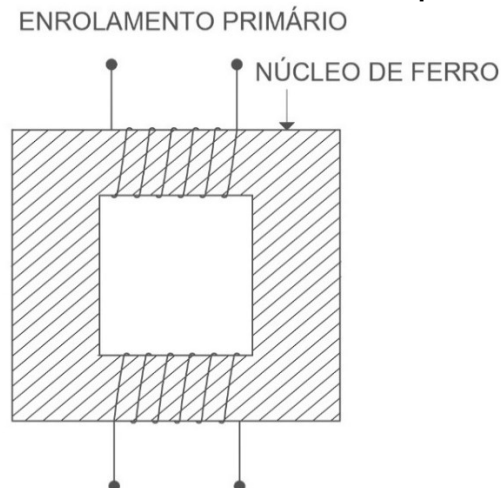


Fonte: (a) - Adaptado de Mamede (2017, p. 518) (b) - Mundo da Elétrica

2.1.1.2 TC do tipo enrolado

O TC tipo enrolado é usado para transformações inferiores a 200 A. O primário é composto por um enrolamento primário com poucas espiras envolvendo o núcleo (MAMEDE, 2017), a representação dessa categoria de TC é demonstrada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura interna de um TC tipo enrolado

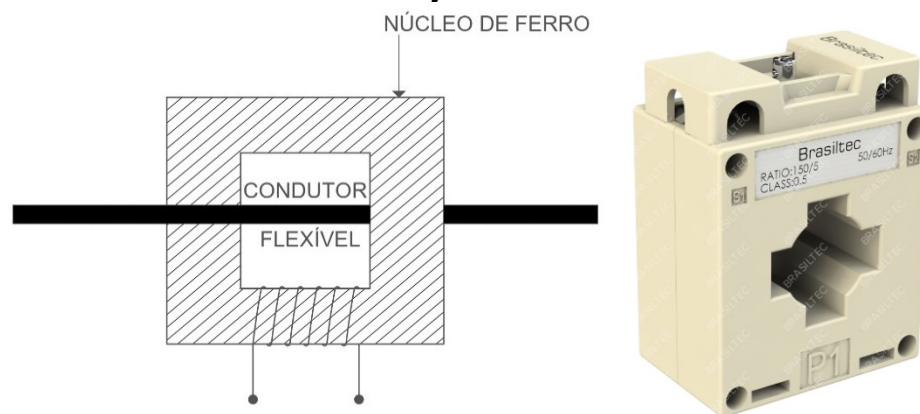


Fonte: Adaptado de Mamede (2017, p. 519)

2.1.1.3 TC do tipo janela

A construção desse TC é semelhante ao TC tipo barra, tendo como diferença o condutor do circuito, o qual é posicionado no centro do núcleo no lugar da barra como demonstrada na Figura 5a. Diferente dos outros TC's, esse não possui enrolamento primário, pois, o condutor do sistema serve como enrolamento primário (MAMEDE, 2017). Na Figura 5b é possível observar o espaço onde o condutor é inserido.

Figura 5 - (a) Estrutura interna de um TC do tipo janela e (b) transformador de corrente do tipo janela



Fonte: (a) Adaptado de Mamede (2017, p. 519) (b) Brasiltec

Neste tipo de TC, é possível diminuir a relação de transformação do primário dando até 3 voltas do condutor no TC, de tal forma que a relação de transformação é dividida pelo número de voltas realizadas (MAMEDE, 2017).

2.2 Transformador de potencial

Semelhante ao TC, o transformador de potencial (TP) possui dois possíveis grupos de ligação, o grupo 1, mais utilizado, abrange os TP's para ligação entre fases com saída do secundário em 115 V e o grupo 2, TP's para ligação entre fase e neutro comumente utilizados em sistemas com o neutro aterrado por impedância, com saída do secundário em $115 V/\sqrt{3}$. Porém, é ligado em paralelo ao circuito. Como a alimentação para sistemas industriais é em média tensão, utiliza-se os TP's do tipo indutivo (COTOSCK, 2007).

2.3 Disjuntor de média tensão

Disjuntor é um equipamento muito conhecido no ramo de instalações elétricas, responsável por abrir e fechar o circuito. Ao detectar curto-circuito no sistema, neste caso, o relé aciona o disjuntor para abrir, de forma que interrompa o fornecimento de energia elétrica a jusante do disjuntor, de forma que comprometa o menor número possível de afetados, garantindo a segurança do sistema e minimizando o impacto (COTOSCK, 2007).

2.3.1 Tipos de disjuntores

Por conta de problemas, a evolução e criação de novos tipos de disjuntores se tornou essencial para a boa eficiência e principalmente segurança humana e do sistema (PAIVA, 2020). Alguns dos principais disjuntores utilizados são descritos a seguir.

O disjuntor a ar comprimido é muito utilizado atualmente, o funcionamento desse disjuntor é simples por utilizar ar comprimido para interromper o arco elétrico. Caracterizado por emitir muito ruído e ocupar muito espaço pela necessidade de uma central de armazenamento de ar, não se torna viável em áreas urbanas. Suporta uma corrente de até 100 kA de amplitude máxima em situações de curtos-circuitos, além de estar disponível para todos os níveis de tensão (PAIVA, 2020).

Com início da produção na década 70, o disjuntor a vácuo é um dos principais disjuntor utilizados em média tensão. Como o arco elétrico não se propaga no vácuo, essa categoria de disjuntor se tornou vantajoso, além de ser silencioso, com acionamento leve e com um porte menor que os outros, o que se torna ideal para usos em cabines (PAIVA, 2020).

O disjuntor a SF₆, utiliza gás hexafluoreto de enxofre (SF₆) para a extinção do arco elétrico. Esse gás é ótimo isolador elétrico, transparente, inodoro, não inflamável e quimicamente estável, por conta disso a manutenção desse tipo de disjuntor é baixa (PAIVA, 2020).

Característico por possuir óleo isolante que imergem os contatos, o disjuntor à óleo permite extinguir o arco elétrico de forma eficiente e segura, uma vez que não tem contato com a própria carcaça (PAIVA, 2020).

2.4 Relé

Este dispositivo fica conectados em paralela ao sistema de alimentação, para receber todas as informações da rede elétrica, como tensão, corrente, frequência e conseqüentemente, potência, ângulo de fase, impedância. Com isso, ao detectar alguma anomalia na rede, ele deverá atuar de acordo com o que foi estipulado no momento de sua programação, podendo ser um alarme sinalizador, bloqueio ou abertura do disjuntor, para proteger o sistema elétrico (Almeida, 2000).

Segundo a tabela ANSI, esses relés podem ter diversas funções, mas nesse caso atuará como relé de sobrecorrente instantâneo (50) e relé de sobrecorrente temporizado (51). Como o nome diz, a unidade 50 atua de forma instantânea ou com um tempo previamente definido, e a unidade 51 atua com um tempo definido ou com curvas de tempo dependente (ALMEIDA, 2000).

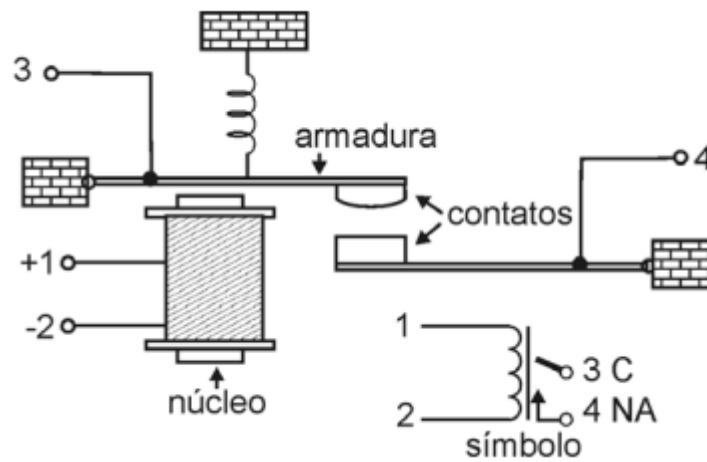
2.4.1 Tipos de relés de sobrecorrente

O relé, assim como os demais equipamentos de proteção, sofreu adaptações ao decorrer dos anos, com isso, existem alguns tipos de relés que podem ser usados, apesar de alguns estarem ultrapassados, ainda existem nos sistemas de proteção e o conhecimento dos mesmos é importante (ALMEIDA, 2000).

2.4.1.1 Relé eletromecânico

Sendo o primeiro relé a ser desenvolvido, encontra-se em sistemas de proteção até hoje, isso devido a sua grande vida útil, por ser uma tecnologia ultrapassada, são mais robustos e lentos (BRAGA, 2012). Sua estrutura simplificada é representada na Figura 6.

Figura 6 - Estrutura simplificada de um relé



Fonte: Braga (2012, p. 19)

Esse relé possui nas proximidades de seu núcleo, uma armadura móvel de metal ferroso, o qual controla o jogo de contatos. Quando a bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético, de forma a atrair a armadura. Com esta atração, a armadura e consequentemente os contatos se movimentam, o que faz com que o contato móvel se encoste no contato fixo inferior (BRAGA, 2012).

2.4.1.2 Relé estático

O relé estático foi a primeira variação após a criação relé eletromecânico, com características melhores que o eletromecânico, destaca-se por serem mais rápidos, isso por não apresentar partes móveis, visto que os comandos são controlados eletricamente, por este motivo apresenta baixa carga de acionamento (COTOSCK, 2007).

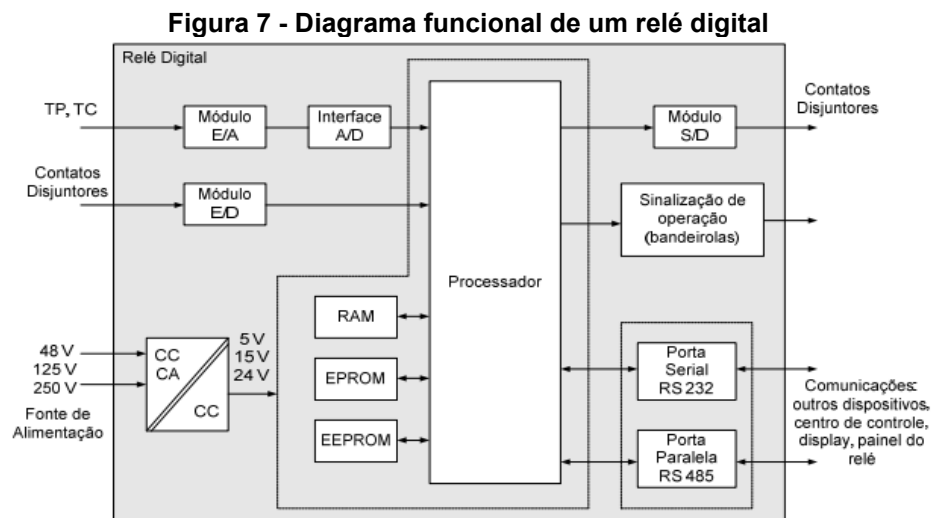
Apesar de ser mais eficiente que o relé eletromecânico, o relé estático no início de sua utilização se tornou inviável, isso devido ao pouco avanço da tecnologia, e por

ser mais sensível devido a comandos elétricos, por esse motivo apresentam baixa durabilidade (COTOSCK, 2007).

2.4.1.3 Relé digital

Com o avanço das tecnologias, novos equipamentos surgem, com isso, os relés digitais, os quais utilizam microprocessadores permitindo que os relés digitais tenham inúmeras funções. Dentre essas, o armazenamento de informações se destaca por permitir ao operador extrair informações e analisar com mais detalhes (COTOSCK, 2007).

Por conta dessa tecnologia, os novos projetos de proteção utilizam os relés digitais, e os sistemas de proteção mais antigos vem substituindo os eletromagnéticos por digitais (GONDIM, 2010). Na Figura 7 é demonstrada a estrutura básica de um relé digital.



Fonte: Mantovai e Leão (2010, p. 7)

Os TP e TC's alimentam o módulo entrada/analógica (E/A), esse módulo exerce algumas funções como, proteger o relé de eventuais sobrecargas, isolar o circuito eletrônico do circuito de entrada, condicionar a entrada de corrente e tensão para determinada faixa necessária e funciona também como filtro “*anti-aliasing*”, filtrando as frequências até um valor máximo igual à metade da frequência de amostragem (LEÃO E MANTOVANI, 2010).

A Interface Analógica/Digital (A/D) é responsável pela conversão analógica do sinal para digital. Os módulos de entradas discretas (E/D) e saídas discretas (S/D), são responsáveis por isolar o circuito eletrônico das entradas, neles é conectado os contatos dos disjuntores. O módulo E/D com o auxílio de uma fonte de alimentação auxiliar, também verifica a situação dos contatos para condicionar os sinais para sua aplicação ao processador, e os módulos S/D também são responsáveis por mandar sinal de comando para abrir o disjuntor (CODÁ, 2008).

As funções do processador do relé digital são encarregadas de executar os algoritmos de proteção, controlar diversas funções temporizadas e realizar tarefas de autodiagnóstico e comunicação com os periféricos (LEÃO E MANTOVANI, 2010). O processador possui três memórias principais sendo: a *random access memory* (RAM) ou em português “memória de acesso aleatório”, são memórias que armazenam informações de entrada sendo precisa se manter alimentada eletricamente para manterem armazenadas, podem ser acessadas para extraí-las; Erasable programmable read only memory (EPROM) ou em português “memória somente de leitura, programável e apagável” onde armazenam o algoritmo de proteção do relé, ou seja são informações que vem de fábrica; a electrical erasable programmable read only memory (EEPROM) ou em português “memória somente de leitura, programável e apagável eletricamente” é a memória que o operador pode programar, pode ser reconfigurada da forma que for desejável (CODÁ, 2008).

A sinalização de operação (bandeirolas) realiza a sinalização visual de operação do relé. A porta serial serve para troca de informações com centro de operações e dentro do relé, como display e painel do mesmo, já a porta paralela permite a saída de informações para fora do equipamento (CODÁ, 2008).

2.5 Fusível

Os fusíveis são equipamentos de proteção simples compostos por um filamento ou lâmina de metal, ou liga metálica que se rompe contra sobrecorrentes e curtos-circuitos, ao ultrapassar a faixa de corrente dimensionada, o elo de baixa fusão rompe a forma de isolar o circuito elétrico. Ele rompe conforme a lei de Joule, que diz que uma corrente elétrica produz um determinado calor, ou seja, quando a corrente passa de uma faixa de segurança, a temperatura atinge o ponto de rompimento do elo (PAIVA, 2012).

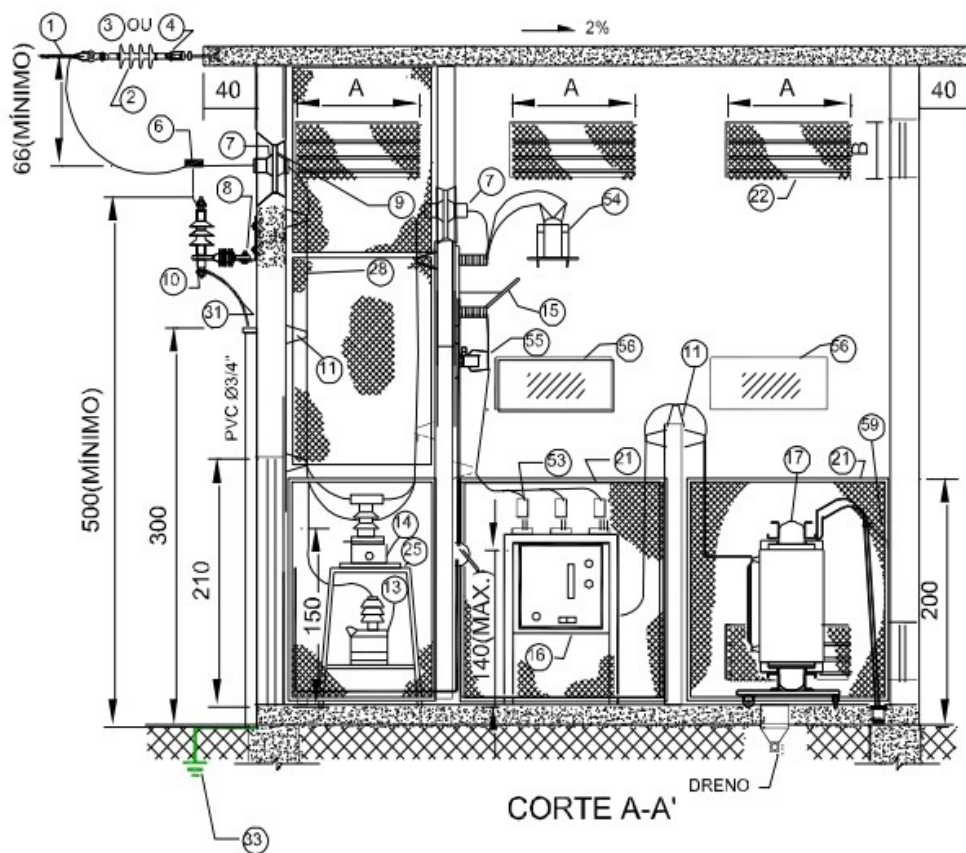
O fusível ou elo fusível é o equipamento que vai na chave fusível, cuja função é a extinção do arco-elétrico com o rompimento do seu elo em caso de aquecimento. Para definir qual fusível utilizar, é necessário analisar as informações do transformador (ALMEIDA, 2000).

De todas as categorias de fusíveis, em sistemas de proteção elétrica industrial, o tipo HH é o mais utilizado em cabines de alimentação primária, pois, atua como limitador de correntes elétricas e também de alta inclinação para rupturas (ALMEIDA, 2000).

2.6 Harmonização dos equipamentos

A harmonização e o bom funcionamento dos equipamentos citados nesse capítulo permitem um sistema de proteção elétrica eficiente, de forma que possa operar bem e agir quando necessário. Na Figura 8 é demonstrada uma cabine de medição, proteção e transformação em média tensão para instalação acima de 300 kVA com ramal subterrâneo.

Figura 8 - Subestação de medição, proteção e transformação acima de 300 kVA



Fonte: Norma Técnica N-321.0002 da CELESC (2016, p. 97).

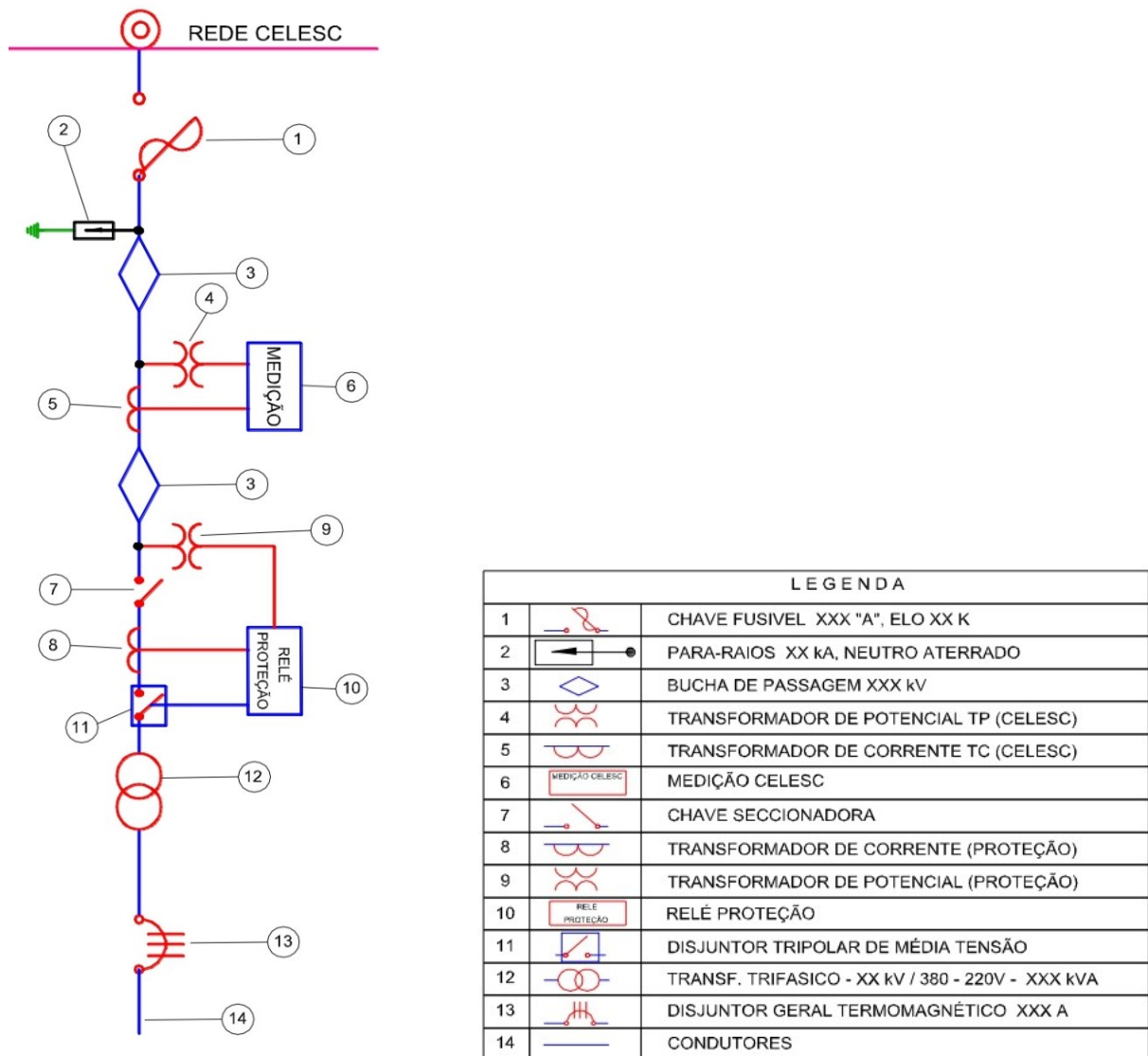
A primeira seção representa a medição em MT, onde a concessionária é responsável, tanto pelo TC (14) quanto pelo TP (13). Na terceira seção, a de transformação, onde contém o transformador (17) e em alguns casos contém junto a chave fusível para a proteção do mesmo.

Na segunda seção, a de proteção, o TP de proteção (54) e o TC de proteção (55) alimentam o relé que encontra com o disjuntor (16). O relé recebe todas as informações da rede e quando necessário, no caso de curto-circuito, por exemplo,

aciona o disjuntor, de forma a proteger o sistema. Porém, vale observar que nessa cabine ainda, encontra-se uma chave seccionado (15) para manutenção, na norma N-321.0002 da CELESC e no livro Mamede (2017) citam que normalmente utiliza a chave seccionadora com alavanca de manobra.

O diagrama unifilar da cabine é representada na Figura 9 para explicar o funcionamento da proteção.

Figura 9 - Diagrama unifilar de proteção



Fonte: Norma Técnica N-321.0002 da CELESC (2016, p. 98).

A concessionária fornece energia, por onde passa por uma chave fusível com elo do tipo k (1) e um para-raios (2), para proteger contra sobretensões. Através de uma bucha de passagem (3), alimenta os TP de medição (4) e o TC de medição (5),

os quais alimentam os equipamentos de medição (6). Ao chegar na cabine de proteção, liga ao TC de proteção (7) o qual, com o TP de proteção (9) alimenta o relé de proteção (10), que manda comando para o disjuntor de MT (11) em casos de faltas. O disjuntor protege o transformador trifásico (12) que, em baixa, alimenta o disjuntor geral de BT (13).

3 PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

Cada sistema de proteção elétrico é exclusivo, portanto, é preciso analisar cada situação e realizar os devidos passos.

3.1 Cálculo de demanda

A demanda de uma futura instalação é o primeiro passo para decidir quais equipamentos escolher, quais passos tomar e a dimensão que a cabine de proteção terá. Em alguns casos a demanda já é calculada, mas na maioria das situações em que não é entregue, é preciso que o profissional a calcule, para isso, é preciso ter conhecimento dos equipamentos elétricos a serem instalados, e se pretende futuramente realizar a instalação de novos equipamentos que demandem uma maior potência (MAMEDE, 2017).

3.1.1 Tipo de equipamentos

Os equipamentos podem ser divididos em quatro categorias diferentes, que são, motor, ar-condicionado, iluminação e tomadas.

3.1.1.1 Motor

O motor é o equipamento que mais afeta o sistema, pois, demanda uma abundante energia elétrica por possuir altas potências e por se tratar de uma indústria, se mantêm ligados na maioria do tempo (MAMEDE, 2017).

Para calcular a demanda dos motores deve-se primeiro listar todos os aparelhos existentes e separar conforme a Tabela 1 para obter o fator simultaneidade (FS)³ (MAMEDE, 2017).

Tabela 1 - Fator de simultaneidade

FATOR DE SIMULTANEIDADE								
Aparelhos (cv)	número de aparelhos							
	2	4	5	8	10	15	20	50
motores 3/4 cv a 2,5 cv	0,85	0,80	0,75	0,70	0,60	0,55	0,50	0,40
Motores: 3 cv a 15 cv	0,85	0,80	0,75	0,75	0,70	0,65	0,55	0,45
Motores: 20 cv a 40 cv	0,80	0,80	0,80	0,75	0,65	0,60	0,60	0,50
Acima de 40 cv	0,90	0,80	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,65
Retificadores	0,90	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,70
Soldadores	0,45	0,45	0,45	0,40	0,40	0,30	0,30	0,30
Fornos Resistivos	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-
Fornos de Indução	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Mamede (2017, p. 29).

Para obter a potência média absorvida pelo aparelho, deve-se multiplicar a potência nominal pelo fator de utilização (FU) (Mamede, 2017), representada pela Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de utilização

Fatores de Utilização (FU)	
Aparelhos	FU
Fornos a resistência	1,00
Secadores, caldeiras, etc	1,00
Fornos de Indução	1,00
motores 3/4 cv a 2,5 cv	0,70
Motores: 3 cv a 15 cv	0,83
Motores: 20 cv a 40 cv	0,85
Acima de 40 cv	0,87
Soldadores	1,00
Retificadores	1,00

Fonte: Adaptado de Mamede (2017, p. 29)

Baseado nessas duas tabelas, e nos dados do motor como, potência (cv) rendimento (%), fator de potência (FP) e quantidade iniciam-se os cálculos de demanda dos motores (MAMEDE, 2017).

³ Mamede (2017) define FS como a relação entre a demanda máxima do grupo de aparelhos e a soma das demandas individuais dos aparelhos do mesmo grupo, num intervalo de tempo considerado.

Primeiramente calcula-se a potência no eixo do motor ($P_{eixo-motor}$) em cavalos (cv) a partir da fórmula 1 (MAMEDE, 2017).

$$P_{eixo-motor} = P_N * FU, \quad (1)$$

onde, P_N é a potência nominal do motor em cavalos e FU é o fator de utilização encontrado na tabela 2. A partir da potência no eixo do motor obtida na equação 1, calcula-se a demanda solicitada (D_m) com a equação 2 (MAMEDE, 2017).

$$D_m = \frac{P_{eixo-motor} * 736}{FP * n}, \quad (2)$$

onde, n que representa o rendimento do motor e FP são fornecidos pela fábrica, 736 é utilizado para converter cv em watts. Porém, ainda é preciso calcular a demanda no quadro geral dos motores (D_{CMM}), que resulta na soma dos motores baseado na equação 3 (MAMEDE, 2017).

$$D_{CMM} = D_m * FS * n_{mot}, \quad (3)$$

onde, FS é encontrado na tabela 1 e n_{mot} é o número de motores com a mesmas características. Portanto, após fazer esses passos para os diferentes tipos de motores, soma-se todos os D_{CMM} para obter a demanda total dos motores (MAMEDE, 2017).

3.1.1.2 Ar condicionado

Nessa etapa, considera-se apenas os aparelhos de ares-condicionados, com a entrada em BTU e a quantidade de equipamentos, converte-se para watts e considera a eficiência do aparelho, para isso, utiliza-se a equação 4.

$$P_w = \frac{P_{btu} * 0,293}{3,27}, \quad (4)$$

onde P_w é a potência em watts e P_{btu} a potência em BTU. A constante 0,293 é a conversão de BTU para watts, ou seja, 1 watts equivale a 0,293 BTU, a constante 3,27

é utilizado para demonstrar a eficiência do aparelho, considerando que o mesmo não terá seu funcionamento em potência constante.

3.1.1.3 Iluminação

Essa etapa envolve todos os sistemas de iluminação da instalação, abordando as diversas categorias de lâmpadas, apesar das lâmpadas de led serem a tecnologia mais utilizada atualmente, lâmpadas com reator ainda são utilizadas, e nesses casos é preciso uma atenção especial para calcular a sua demanda de energia elétrica (MAMEDE, 2017).

Para calcular a demanda das lâmpadas com reator é preciso coletar as informações da lâmpada como, potência nominal (P_W), quantidade (N_{lamp}), FP e perdas do reator (P_r). Enquanto as lâmpadas sem reator bastam a potência dela e o FP, dependendo do material (MAMEDE, 2017).

Com os dados da lâmpada basta utilizar as informações na equação 5 (MAMEDE, 2017).

$$D_{iluminação} = \frac{\sum N_{lamp} * (P_W + P_r)}{FP * 1000} (kVA), \quad (5)$$

calculado essa demanda, soma com as demais demandas sendo elas com ou sem reator para descobrir a demanda total de iluminação. Após a soma, multiplica-se pelo fator de demanda para estimar o consumo médio.

3.1.1.4 Tomadas

As tomadas englobam as tomadas de uso geral (TUG's) e as tomadas de uso específico (TUE's) (MAMEDE, 2017), que não sejam motores ou ar-condicionado, que podem ser cafeteira, chuveiro, torneira elétrica, entre outros.

Para calcular a demanda total das tomadas é mais simples que os outros casos, basta somar as TUE's e multiplicar pelo fator de potência definido pelo projetista e somar com as TUG's, esta operação é demonstrada na equação 6 (MAMEDE, 2017).

$$D_{tomadas} = \sum TUG's * FP + \sum TUE's (W). \quad (6)$$

Após calculado a demanda das tomadas, multiplica-se pelo fator de demanda, o qual varia de acordo com demanda dessas tomadas (MAMEDE, 2017).

3.2 Cálculo das bases

Calculada a demanda prevista a ser instalado no sistema, começam-se os passos para calcular o dimensionamento dos equipamentos de proteção elétrica do projeto, para isso, calcula-se a corrente de base (I_b) e impedância de base (Z_b) a partir das equações 7 e 8 respectivamente. Para achar esses valores, utiliza-se a Potência base (S_b) e a tensão de base (V_b) (MAMEDE, 2017).

$$I_b = \frac{S_b}{V_b * \sqrt{3}}, \quad (7)$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}, \quad (8)$$

para a potência base normalmente a maioria das concessionárias utiliza 100 MVA, já para a tensão base normalmente são 13,8 kV, 23,1 kV ou 35,1 kV. Quando for calcular a corrente base e a tensão base para baixa tensão, utiliza-se V_b normalmente como 220 V ou 380 V (MAMEDE, 2017).

A corrente nominal (I_n) é a corrente em condições ideais, ou seja, sem perdas, tanto de algum equipamento ou do sistema, para achá-lo utiliza-se a equação 9 (MAMEDE, 2017).

$$I_n = \frac{DEMANDA}{V_b * FP * \sqrt{3}}, \quad (9)$$

onde V_b corresponde à tensão de fornecimento da concessionária, e FP normalmente corresponde a 0,92 segundo a ANEEL.

Outra corrente nominal a ser calculada é do transformador, a partir de sua potência nominal e a tensão do primário, ou seja, em MT, para encontrar a corrente nominal do transformador utiliza-se a equação 10 (MAMEDE, 2017).

$$I_{n_trafo} = \frac{S_{n_trafo}}{V_{b_trafo} * \sqrt{3}}. \quad (10)$$

3.3 Impedância em PU

Calculado a impedância base, procura-se deixá-las em uma única unidade, conhecido como p.u., para isso, utiliza-se a equação 11 para encontrar a impedância em p.u (MAMEDE, 2017).

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b}, \quad (11)$$

onde Z_{pu} é a impedância em pu, Z_b é a impedância base, e Z é a impedância em ohm.

Das impedâncias a serem encontrada num sistema de proteção elétrica, tem-se a impedância de rede fornecida pela concessionária que pode ser dada em p.u. ou em ohms e a impedância do cabo de média tensão, que corresponde a distância do poste de fornecimento até a cabine de medição, ou o cabo de baixa tensão que vai do transformador até o quadro geral. Porém, a impedância do cabo é fornecida pela fábrica em ohms/km, para converter em p.u. utiliza-se a equação 12 (MAMEDE, 2017).

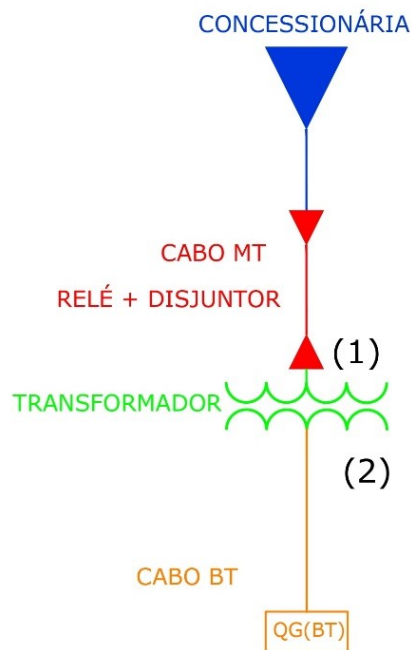
$$Z_{pu} = \frac{Z * c}{Z_b}, \quad (12)$$

o comprimento (c) deve ser em km pois a impedância do cabo é dada em ohms/km.

3.4 Cálculo da corrente de curto-circuito

Quando flui corrente de uma fase para outra, ou para a terra, gera uma sobrecorrente, a qual chama-se de corrente de curto-circuito, a qual pode ser monofásica, bifásica ou trifásica (MAMEDE, 2017). O curto-circuito será calculado em dois pontos principais, sendo eles representados na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama unifilar do sistema de proteção



Fonte: Autoria própria (2022)

No ponto 1, o cálculo de falta utiliza a impedância de rede e do cabo de MT, onde se calcula os curto-circuitos monofásico, bifásico e trifásico, e no ponto 2 que utiliza as impedâncias de rede, cabo MT e transformador, porém nem todas as concessionárias exigem, e as que exigem pede apenas ao curto-circuito trifásico em BT (ALMEIDA, 2000).

O cálculo de curto-circuito utiliza as impedâncias de sequência positiva (Z_A), sequência negativa (Z_B) e sequência zero (Z_C), pois, são utilizadas para calcular as condições de desbalanço do sistema (Fleming, 1998).

Antes de iniciar o cálculo das correntes de curto-circuito, Almeida (2000) afirma que, de acordo com as componentes simétricas para sistemas trifásicos tem-se as seguintes relações:

$$a = 1\angle 120^\circ; a^2 = 1\angle 240^\circ;$$

$$V_{AN} = V_0 + V_1 + V_2; \quad (13)$$

$$V_{BN} = V_0 + aV_1 + a^2V_2; \quad (14)$$

$$V_{CN} = V_0 + a^2V_1 + aV_2; \quad (15)$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2; \quad (16)$$

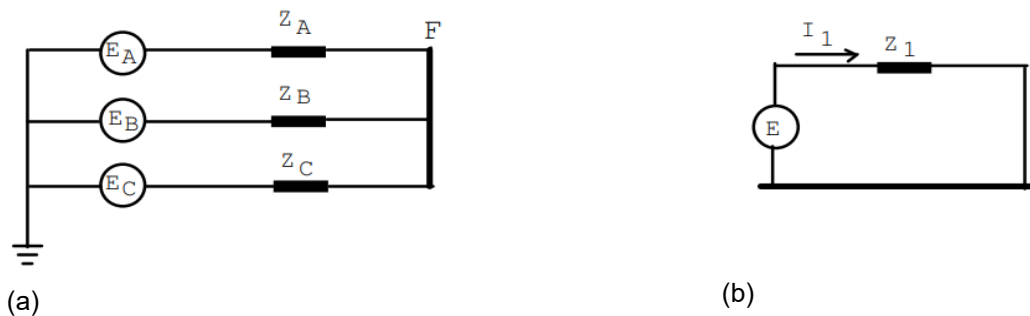
$$I_B = I_0 + aI_1 + a^2I_2; \quad (17)$$

$$I_C = I_0 + a^2I_1 + aI_2; \quad (18)$$

3.4.1 Curto-circuito trifásico

Para o cálculo da falta trifásica utiliza-se apenas da impedância positiva, expressa pela equação 13, pois as correntes negativa e zero são nulas (MAMEDE, 2017), como é possível observar na Figura 11a o curto-circuito trifásico e na Figura 11b, o circuito de sequência trifásica gerada pelo curto-circuito trifásico.

Figura 11 - (a) Curto-circuito trifásico e (b) circuito de sequências trifásica



Fonte: Almeida (2000, p. A-4,

Por se tratar de um sistema equilibrado e como é possível observar na Figura 11, considera-se apenas a impedância positiva (Z_1), e para obter o valor na unidade de medida, basta multiplicar pela corrente de falta trifásica real. Portanto, obtém-se a equação 19 (MAMEDE, 2017).

$$I_1 = I_{cc3.pu} = \frac{E_{pu}}{Z_{1.pu}}. \quad (19)$$

Sabe-se que para encontrar qualquer corrente de falta em p.u. utiliza a equação 20.

$$I_{cc3_pu} = \frac{I_{cc3}}{I_b}. \quad (20)$$

Sendo assim, representando E_{pu} por $1\angle 90^\circ$ na equação 19 e substituindo na equação 20, resulta na corrente de falta trifásica representada pela equação 21 (MAMEDE, 2017).

$$I_{cc3} = \frac{I_b}{Z_1}$$

ou

$$I_{cc3} = \frac{I_b}{Z_{+total}}. \quad (21)$$

Para Z_{+total} utiliza-se todas as impedâncias por fase de sequência positiva que estão para trás do ponto de curto (ALMEIDA, 2000).

Algumas concessionárias exigem a falta trifásica no transformador, nesse caso, a impedância do transformador deve ser calculada na base da rede, para isso utiliza-se a equação 22 para mudar de base (MAMEDE, 2017).

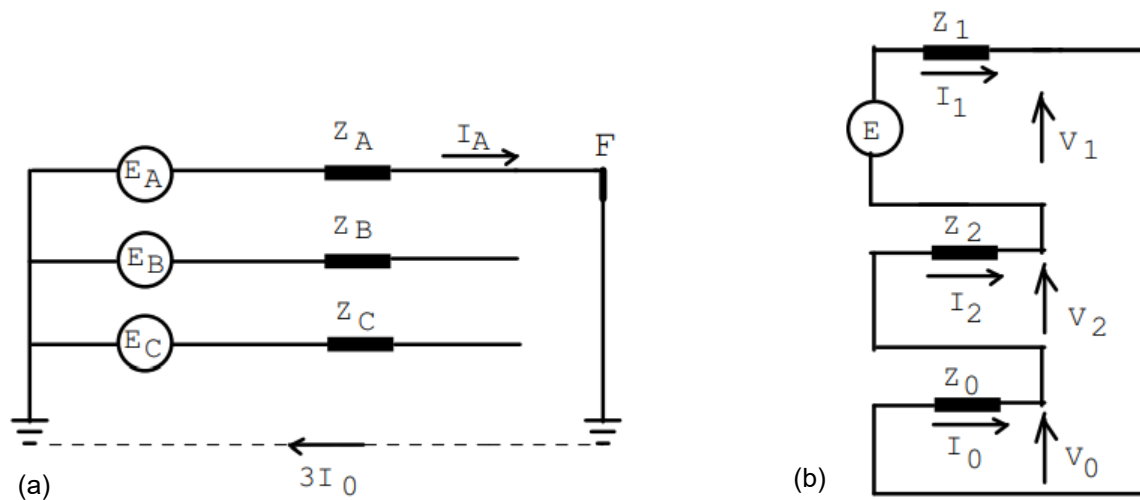
$$Z_{pu_novo} = Z_{pu_velho} * \left(\frac{V_{btrafo}}{V_{bredede}} \right)^2 * \left(\frac{S_{bredede}}{S_{btrafo}} \right). \quad (22)$$

Após calcular a nova impedância, soma-se com as demais impedâncias da equação 22 para então substituir os demais dados, para encontrar a corrente de falta trifásica no transformador (ALMEIDA, 2000).

3.4.2 Curto-circuito monofásico

Esse sistema é o curto-circuito de uma fase com a terra, por este motivo, considera-se as seqüências positiva, negativa e zero (ALMEIDA, 2000), na Figura 12a apresenta-se o curto-circuito monofásico e na Figura 12b, o circuito de seqüência monofásica.

Figura 12 - (a) Curto-circuito monofásico e (c) circuito de seqüência monofásica



Fonte: Almeida (2000, p. A-7)

Conforme a Figura 12a, obtém-se que, $I_B = I_C = 0$, pois as fases não estão em curto-circuito, portanto o ponto de falta está em V_A , com isso, $I_1 = I_2 = I_0$ (ALMEIDA, 2000).

Do circuito restante tem-se a equação 23.

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}. \quad (23)$$

Portanto, substituindo os valores das componentes simétricas da equação 18 na equação 23, obtém-se a equação 24, utilizada para calcular o curto-circuito monofásico máximo (ALMEIDA, 2000).

$$I_{cc1} = \frac{3 * I_b}{|Z_{0_total} + Z_{-_total} + Z_{+_total}|}. \quad (24)$$

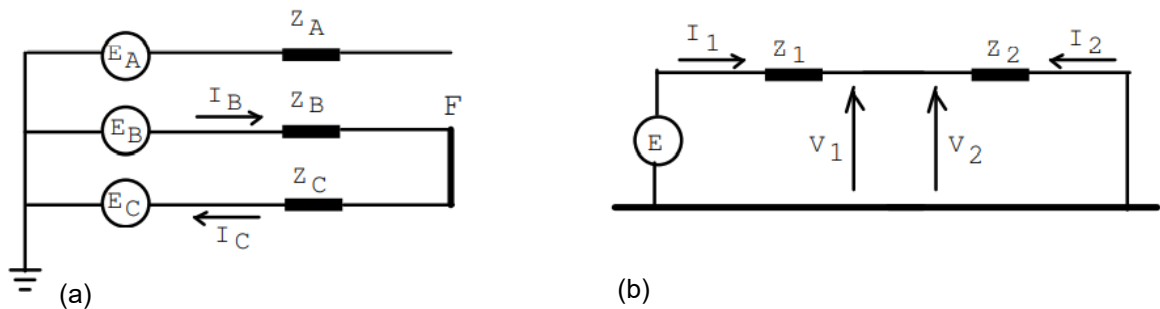
Para calcular o curto fase-terra mínimo considera-se que este curto-circuito está em contato com a terra, ou seja, fase-terra, para determinar a impedância terra, utiliza-se três vezes a impedância de contato ($Z_{contato pu}$), que seria a impedância da terra, o qual é definida pela concessionária, expressa na equação 25, porém, a impedância deve ser convertida antes em p.u. para ser aplicada à fórmula (MAMEDE, 2017).

$$I_{cc1 min} = \frac{3 * I_b}{|Z_{ototal} + Z_{+total} + Z_{-total} + 3 * Z_{contato pu}|} \quad (25)$$

3.4.3 Curto-circuito bifásico

Na falta bifásica a impedância zero não aparece, pois o curto não envolve a terra, portanto, utiliza-se a impedância negativa e positiva (ALMEIDA, 2000). Como é possível observar na Figura 13, as correntes são defasadas 180° graus.

Figura 13 - (a) Curto-circuito bifásico-terra e (b) circuito de seqüência bifásica-terra



Fonte: Almeida (2000, p. A-6)

Tem-se que, $I_A = 0$ e que $I_B = -I_C$, portanto $V_B = V_C$, logo, $V_1 = V_2$ e $Z_1 = Z_2$ e $I_1 = -I_2$, portanto, da Figura 13 é possível obter a equação 26 (ALMEIDA, 2000).

$$I_1 = -I_2 = \frac{E}{2 * Z_1} \quad (26)$$

Substituindo-se as equações 17 e 18, obtém-se, as equações 27 e 28.

$$I_B = I_1(a - a^2), \quad (27)$$

$$I_C = I_1(a^2 - a), \quad (28)$$

sendo que,

$$(a - a^2) = \sqrt{3},$$

da equação 26 obtém-se a equação 29.

$$I_{cc2} = \frac{\sqrt{3} E}{2 Z_1}. \quad (29)$$

Substituindo a equação 21, e $E = 1 \angle 90^\circ$ na equação 29, encontra-se a corrente de falta bifásica representada pela equação 30 (ALMEIDA, 2000).

$$I_{cc2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc3}, \quad (30)$$

para ser válida essa equação, a impedância de sequência positiva precisa ser igual à impedância de sequência negativa. Caso não sejam iguais, é preciso fazer por método das componentes simétricas (ALMEIDA, 2000), o qual não será tratado neste trabalho.

3.5 Coordenação e dimensionamento.

Após a realização dos cálculos básicos nominais, de base e de falta, começa-se a resolução dos cálculos para o dimensionamento dos equipamentos de proteção.

3.5.1 Corrente de partida

A corrente de partida temporizada é a unidade 51 do relé, segundo a tabela ANSI. Para a corrente de partida da fase (51F) utiliza-se a equação 31 (MAMEDE, 2017).

$$I_p = I_n * D, \quad (31)$$

onde D é um fator de segurança definido pela concessionária, normalmente tem-se o seguinte intervalo (MAMEDE, 2017):

$$1,05 < D < 1,20.$$

A partir do corrente de partida da fase, calcula-se a corrente de partida do neutro, multiplicando pelo fator de assimetria B , representado pela equação 32 (MAMEDE, 2017).

$$I_{pn} = I_p * B, \quad (32)$$

onde, B respeita o seguinte intervalo conforme a concessionária (MAMEDE, 2017):

$$0,2 < B < 0,33.$$

3.5.2 Corrente ANSI

Mamede, 2017 define corrente ANSI como:

O maior valor de corrente que um transformador pode suportar durante um período definido de tempo sem ser danificado. Para defeitos de fase e terra, o valor do ponto ANSI para transformadores de distribuição, ligação triângulo estrela, é de 58% do ponto ANSI.

Sendo assim, para definir esse ponto existem duas técnicas, a primeira, onde a corrente nominal do transformador multiplica pelo fator conforme a impedância do transformador, como demonstrado na Tabela 3 (MAMEDE, 2017).

Tabela 3 - Corrente típica do ponto ANSI

Z%	Ponto ANSI(A)	Tempo Máximo (s)
4	25*In	2
5	20*In	3
6	16,6*In	4
7	14,3*In	5

Fonte: Adaptado de Mamede (2017, p. 667)

Outro método mais recomendado, pois é apenas substituir a corrente nominal do transformador (I_{n_TRF}) independente da impedância do transformador ($Z\%$) na equação 33 (MAMEDE, 2017).

$$I_{ANSI} = \frac{I_{n_TRF}}{Z\%} * 100, \quad (33)$$

Como já citado acima, para encontrar a corrente do neutro (I_{NANSI}), corresponde a 58% da corrente da fase, expressa na equação 34 (MAMEDE, 2017).

$$I_{NANSI} = 0,58 * I_{ANSI}. \quad (34)$$

3.5.3 Corrente de magnetização

Segundo Mardegan, 2010 a corrente de magnetização de um transformador gera harmônicos, quando ocorre, entre outras, algumas das seguintes situações:

- Energização do transformador;
- Ocorrência de falta externa;
- Tensão de restabelecimento após a eliminação de uma falta externa;
- Mudança no tipo de falta durante uma contingência, como de falta fase-terra, para falta fase-fase-terra;
- Ao paralelar um transformador já energizado com outro.

A corrente de Magnetização pode alcançar de 8 a 14 vezes a corrente nominal do transformador como demonstrado na equação 35 (MAMEDE, 2017).

$$I_{mag} = G * I_{n_trafo}, \quad (35)$$

onde, G varia conforme o tipo de resfriamento e as normas de cada concessionária (MAMEDE, 2017):

$G=8-10$ p/ transformado à óleo,

$G=12-14$ p/ transformado a seco.

3.5.4 Corrente de inrush

A energização do transformador gera aumento na indução magnética em seu núcleo, com amplitude maior que a da corrente nominal (RAFFO, 2010).

A corrente de inrush ou de energização utiliza a maior corrente de magnetização dos transformadores e as correntes nominais dos demais transformadores, como demonstrado na equação 36 (MORDEGAN, 2010).

$$I_{inrush} = I_{mag_maior} + \Sigma I_{nom_demais} \quad (36)$$

Onde possui dois transformadores ou mais, soma-se a maior corrente de magnetização com as correntes nominais dos demais transformadores. Em situações onde tem-se apenas um transformador, a corrente de inrush é igual a corrente magnetização (MORDEGAN, 2010).

3.5.5 Corrente instantânea

A corrente instantânea (função 50) segundo a tabela ANSI, utiliza a corrente de inrush como base, multiplicando por um fator para obter o seu resultado. Para a corrente instantânea da fase será utilizado a equação 37 (MAMEDE, 2017).

$$I_{instantanea\ F} = M * I_{inrush}, \quad (37)$$

o fator M varia conforme a concessionária, na maioria das concessionárias segue o seguinte intervalo (MAMEDE, 2017):

$$1,05 < M < 1,20,$$

para concessionárias que não definem, utiliza-se 1,05, ou seja, um fator de segurança de 5% (MAMEDE, 2017).

Para a corrente instantânea do neutro utiliza-se como base a corrente instantânea da fase e um fator B , como mostrado na equação 38 (MAMEDE, 2017).

$$I_{instantanea\ N} = B * I_{instantanea\ F}, \quad (38)$$

onde B representa o fator de assimetria, o qual varia conforme o intervalo abaixo (MAMEDE, 2017):

$$0,2 < B < 0,33.$$

3.5.6 Dial de tempo

É responsável pelo tempo de atuação da curva do relé. Para calcular o dial de tempo da fase precisa utilizar a equação 39 (MAMEDE, 2017):

$$DT = \left(\frac{\left(\frac{I_{inrush}}{I_p} \right)^\alpha - 1}{k} \right) * t(I), \quad (39)$$

onde $t(I)$ é o tempo do relé, ou em questão gráficas, o tempo para iniciar a curva, tendo como padrão equação 40 (MAMEDE, 2017).

$$t(I) = 0,1s + Atraso, \quad (40)$$

onde 0,1s é o tempo de magnetização, o qual o transformador permite, e o atraso é a folga, que segue o seguinte intervalo (MAMEDE, 2017):

$$0,05s \leq Atraso \leq 0,1s.$$

Já k e α São as constantes que variam conforme a curva que a concessionária exige do relé, como mostrado na Tabela 4 (MAMEDE, 2017).

Tabela 4 - Coeficientes para os tipos de curvas

TIPO DE CURVA	coeficientes	
	K	α
Tempo inverso	0,14	0,02
Tempo muito inverso	13,5	1
Tempo longo inverso	120	1
Tempo extremamente inverso	80	2
Tempo ultra-inverso	315,2	2,5

Fonte: Adaptado de Mamede (2017, p. 669)

Quanto maior o dial de tempo, mais lento é a operação do relé, por isso é necessário calculá-lo para ter uma boa coordenação com os demais equipamentos, para poder protegê-los com eficiência (MAMEDE, 2017).

Já para o dial de tempo do neutro, é preciso verificar o regulamento da concessionária, já que é a mesma que define.

3.6 Dimensionamento do TC

É preciso que os TC's sejam devidamente dimensionados para funcionem com eficiência, para isso ter como base dois critérios:

3.6.1 Critério de sensibilidade

Nesse caso se consideram as correntes de falta que podem atingir ao primário do TC. Utiliza-se a equação 41 para definir o valor máximo do TC (ALMEIDA, 2000).

$$I_p = \frac{I_{CS}}{F_S}, \quad (41)$$

onde, I_{CS} é a maior corrente de falta fornecido pela concessionária, no caso é a corrente de curto-circuito trifásico e F_S é o fator de sobrecorrente, podendo ser determinado no máximo por 20 (MAMEDE, 2017).

Lembrando que deve ser considerado os valores comerciais do TC, nesse caso, será considerado o primeiro valor comercial de TC acima do calculado. Outro ponto a ser observado é a corrente de saída do secundário, o qual deve ser de 5A, portanto a relação de transformação do TC deve ter o seguinte formato (MAMEDE, 2017):

$$\text{TC: } ITC_p: 5,$$

$$\text{RTC: } \frac{ITC_p}{5}.$$

onde ITC_p é a corrente do TP no primário.

3.6.2 Critério de saturação

Nessa etapa é considerado as cargas conectadas ao secundário do TC, pois influenciará na tensão do secundário a qual poderá saturar. Para isso, a tensão calculada deverá ser menor que a tensão de saturação nominal. Para calcular a tensão de saturação, determinam-se primeiramente as impedâncias do relé, do TC e

da fiação que liga o TC ao relé. Na equação 42 calcula-se a impedância da fiação (MAMEDE, 2017).

$$Z_{fiação} = \rho_{condutor} * \frac{c}{S_{cobre}}, \quad (42)$$

onde:

$Z_{fiação}$: Impedância dos condutores;

$\rho_{condutor}$: Resistividade do cobre;

c : Comprimento dos condutores;

S_{cobre} : Área de secção transversal dos condutores.

Em seguida a impedância do relé é demonstrada na equação 43 (MAMEDE, 2017).

$$Z_{relé} = (Z_{fase} * 3) + Z_{neutro}, \quad (43)$$

onde, Z_{fase} representa a impedância da fase do relé e Z_{neutro} , a impedância do neutro do relé.

A impedância do TC pode ser definida como:

$$Z_{TC} = 100m\Omega.$$

A impedância do relé segue a equação 44, onde $S_{relé}$ é a potência do relé, e I_{TCs} é a corrente de saída do TC (MAMEDE, 2017).

$$Z_{relé} = \frac{S_{relé}}{(I_{TCs})^2}, \quad (44)$$

Após calcular as impedâncias, soma-se elas para obter a Z_{carga} , substituindo na equação 45 para encontrar a tensão de saturação do TC (PRADO, 2017).

$$V_{sat\ calc} = \frac{I_{CC\ max}}{RTC} * Z_{carga}, \quad (45)$$

Onde o TC definido terá formato de $10BV_{sat\ nom}$.

3.7 Dimensionamento do TP

Algumas concessionárias exigem ligação entre fase e fase, ou seja, um TP a cada duas fases, nesse caso a ligação é delta aberto, respeitando a seguinte relação (MAMEDE, 2017):

$$V_{F-F}:115.$$

Já se a ligação for fase-terra, o qual utilizará um TP por fase possui a seguinte relação (MAMEDE, 2017):

$$V_{F-F/\sqrt{3}}:115/\sqrt{3}.$$

Apesar de simples, é preciso tomar cuidado com a exigência da concessionária e optar preferencialmente pela ligação fase-terra (MAMEDE, 2017).

4 AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO

4.1 Demanda

Com a utilização do programa Excel elaborou-se a automatização do cálculo de proteção de sistemas elétricos industriais com fornecimento em média tensão para sistemas acima de 300 kVA.

Para iniciar os cálculos é preciso informar a previsão de demanda a ser instalada caso não seja informada, realizou-se a automatização do cálculo da mesma, com base nas informações de entrada como responsável de maior carga, os motores, os quais devem ser separados por categorias, como demonstrado na Figura 14.

Figura 14 - Tabela de cálculo de demanda dos motores

CÁLCULO DE DEMANDA - MOTORES						
	APARELHOS	DESCRIÇÃO	POTÊNCIA(cv)	RENDIMENTO(%)	FP	QUANTIDADE
1-	Fornos a resistência	Estufa	30	0,92	0,92	1
2-	Secadores, caldeiras, etc	Avanço	10	0,92	0,92	2
3-	Fornos de Indução	Picador	55	0,92	0,92	4
4-	motores 3/4 cv a 2,5 cv	esteria	1,5	0,92	0,92	3
5-	Motores: 3 cv a 15 cv	Desdobro	14	0,92	0,92	4
6-	Motores: 20 cv a 40 cv	Circular	35	0,92	0,92	2
7-	Acima de 40 cv	Destopadeira	45	0,92	0,92	2
8-	Soldadores	metalurgica	30	0,92	0,92	1
9-	Retificadores	retifica	25	0,92	0,92	2
10-	-	-	0	0,92	0,92	0
11-	-	-	0	0,92	0,92	0
12-	-	-	0	0,92	0,92	0
13-	-	-	0	0,92	0,92	0
14-	-	-	0	0,92	0,92	0
15-	-	-	0	0,92	0,92	0

Fonte: Autoria própria (2022)

Para cada aparelho selecionado, preenche-se com sua potência em cavalos, rendimento, fator de potência, quantidade, categoria de aparelho e uma descrição. Com base nesses valores utilizam-se as tabelas 1 e 2, e as equações 2, 3 e 4 para calcular a demanda dos motores, baseado em suas quantidades e tipos de aparelhos.

Para calcular as potências dos aparelhos de ar-condicionado criou-se a Figura 15 com a entrada em BTU, e com base na eficiência e na conversão de BTU para watts.

Figura 15 - Cálculo da potência em watts do ares-condicionados

CÁLCULO DE DEMANDA DE AR-CONDICIONADO				
Descrição	Btu's	Quantidade	Potencia(kW)	Potência Total (kW)
escritorio	9000	5	806,42	4,032
manutenção	12000	2	1075,23	2,150
portaria	4000	1	358,41	0,358
			0	0
			0	0
			0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

Chuveiros e TUE's devem ser fornecidos para o cálculo de demanda na Figura 16, onde deve-se preencher com a potência da mesma e o seu fator de potência.

Figura 16 - Cálculo de demanda dos equipamentos comum

CÁLCULO DE DEMANDA - ESCRITÓRIO/AREA COMUM		
Tipo de Carga	Potência(W)	FATOR DE DEMANDA
Chuveiro (TOTAL)	10000	1
TUE's	14000	1
TUG's	3000	0,8
OUTROS	5000	0,7
OUTROS	0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

A iluminação também é importante, as mesmas devem ser informadas com potência e quantidade, caso tenha reator é preciso fornecer suas perdas, demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Cálculo de demanda das lâmpadas

CÁLCULO DE DEMANDA - LÂMPADAS				
	Pnominal(W):	Quantidade:	Fp:	Perdas Reator
Lâmpadas com Reator	40	500	0,9	15,3
Lâmpadas sem Reator	100	52	1	
Lâmpadas sem Reator	32	59	1	
Lâmpadas sem Reator	24	20	1	

Fonte: Autoria própria (2022)

Após o preenchimento de todos os dados da demanda, podendo adicionar novas células para preenchimento caso seja necessário, sendo assim têm-se a demanda prevista, essencial para a realização do cálculo de curto-circuito.

Também tem a opção de adicionar demandas futuras, o qual permitirá dimensionar de forma que, quando for aumentar a indústria, não precise redimensionar o cálculo de proteção. Essa demanda pode ser adicionada tanto em potência (kVA) quando em porcentagem (%). Outra opção é a se a demanda já está calculada como mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Demanda contratada

Demanda Contratada:	
DEMANDA CALCULADA	487,79 kVA
DEMANDA JÁ DEFINIDA:	1200 kVA
PREVISÃO DE INSTALAÇÕES FUTURAS	NÃO
DEMANDA FUTURAS (CASO TENHA):	10 %
DEMANDA A SER CONTRATADA:	487,79 kVA

Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Dados da concessionária

Na entrada de dados têm-se as informações dadas pelas concessionárias no ponto de derivação da rede, como impedância positiva, negativa e zero da rede, o valor da tensão e potência fornecida pela concessionária e a tensão do secundário que pode ser alterada pelo projetista. Essa entrada de dados é mostrada na Figura 19.

Figura 19 - Coleta das impedâncias de rede e bases

IMPEDÂNCIA DE REDE							
	Resistência		Reatância	unidade		valor	unidade
Z+:	1,111	+	2,232	ohms	Vb(MT)	13,8	kV
Z-:	1,111	+	2,232	ohms	Sb:	100	MVA
Z0:	4,26	+	9,165	ohms	V(BT)	220	V

Fonte: Autoria própria (2022)

As impedâncias podem ser fornecidas em p.u. ou em ohm, por este motivo, a opção de escolha de unidade fica disponível, a tensão fornecida pela concessionária segundo a ANEEL respeita o intervalo de 1 kV a 69 kV, mas normalmente são 13,8 kV, 23,1 kV e 34,5 kV. A potência fornecida pela concessionária normalmente é 100 MVA, e a baixa tensão segundo a ANEEL são valores a baixo de 1 kV, mas normalmente são 127 V, 220 V ou 380 V.

Cada concessionária tem regras diferentes as quais devem ser consultadas em sua norma, portanto é preciso selecionar a concessionária para carregar os dados e o tipo de curva que deseja, visto na Figura 20.

Figura 20 - Tipo de curva e concessionária

DADOS FORNECIDO PELA CONCESSIONÁRIA			
CONCESSIONÁRIA:	COPEL	TIPO DE CURVA:	Tempo Inverso

Fonte: Autoria própria (2022)

Foi inserido os dados das concessionárias do Paraná (COPEL) e de Santa Catarina (CELESC), porém é possível adicionar outras concessionárias, basta acessar as normas das mesmas e coletar as informações exigidas, as quais são demonstradas na Figura 21.

Figura 21 - Relação de dados das concessionárias COPEL e CELESC

Concessionária	D	B(neutro)	G_oleo	G_seco	M(fase)	B(neutro)	DT conc. (ad)	Dtneutro	Z_contato
COPEL	1,2	0,2	8	14	1,2	0,2	0,1	0,1	40
CELESC	1,1	0,2	8	14	1,4	0,2	0,1	0,1	40

Fonte: Autoria própria (2022)

Para realizar a automatização baseado em outras concessionárias, basta coletar os dados das respectivas normas. Vale observar que apenas do recomendado para o fator M que utiliza para encontrar a corrente instantânea é menor que 1,2, porém, a CELESC utiliza 1,4 segundo a norma.

4.3 Transformadores

Os dados do(s) transformador(es) são essenciais, para isso é preciso saber a previsão de demanda. Sobre os dados do transformador, exige-se a potência e as tensões do primário e secundário, além do tipo do resfriamento, como mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Entrada de dados do transformador 1

TRANSFORMADOR 1						
	valor	unidade		Resistência	Reatância	unidade
S(kVA)/VI(V)	750/220	KVA/V	Z+:	0,000860444	+	0,003443458 ohms
S:	750	kVA	Z-:	0,000860444	+	0,003443458 ohms
Vn(BT):	220	V	Z0:	0,000860444	+	0,003443458 ohms
Z%:	5,5	%				
Vn(MT):	13,8	kV				
Tipo :	a óleo					

Fonte: Autoria própria (2022)

Os demais dados variam conforme a seleção das opções de dados acima. Nesta automatização, pode-se desenvolver projetos com até dois transformadores, onde ambos têm entradas iguais como mostrado na Figura 22.

4.4 Cabos

Os cabos também possuem impedância, portanto é preciso suas informações como comprimento e seção do cabo. Na Figura 23 é possível observar que apenas com esses dados já atualiza a impedância por quilômetro conforme a seção selecionada, isso porque há um banco de dados com as impedâncias de cabo, representado pela Tabela 5.

Figura 23 - Entrada de dados do cabo e suas impedâncias por km

CABO MT							
	valor	unidade		Resistência		Reatância	unidade
comprimento:	100	m	Z+:	0,1502	+	0,1074	ohms/km
seção:	150	mm ²	Z-:	0,1502	+	0,1074	ohms/km
			Z0:	1,9502	+	2,4843	ohms/km

Fonte: Autoria própria (2022)

Para o comprimento deve-se considerar do ponto do poste até o transformador.

Tabela 5 - Impedância de sequência dos condutores

Seção(mm)	impedância de seq positiva (mΩ/m)		Impedância de seq zero a (mΩ/m)	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
1,5	14,8137	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	2,8
10	2,2221	0,1207	4,0222	2,7639
16	1,3899	0,1173	3,189	2,7173
25	0,8891	0,1164	2,6891	2,6692
35	0,6353	0,1128	2,4355	2,6382
50	0,445	0,1127	2,245	2,5991
70	0,3184	0,1096	2,1184	2,5681
95	0,2352	0,109	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	0,107	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	1,855	2,3491
630	0,0292	0,1042	1,8376	2,3001

Fonte: Mamede (2017, p. 168)

4.5 TP de alimentação

O TP de alimentação é utilizado para fornecer energia ao no-break que mantém o relé e disjuntores alimentados na falta de energia, para que o mesmo possa atuar, também alimenta a cabine de proteção, sendo a iluminação e tomadas. Esse processo para calcular a potência térmica do TP é manual, mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Cálculo de carga do TP de alimentação

CÁLCULO DE CARGA DO TP					
CARGA DA SUBESTAÇÃO - ALIMENTAÇÃO AUXILIAR					
Carga	Quantidade	Potência(W)	FP	FD	Demanda Total
Lâmpada	4	50	0,85	1	235,2941176
Luz de emergência	2	80	0,85	0,25	47,05882353
Tomadas	4	200	0,85	0,5	470,5882353
Outros	0	0	1	0	0
				TOTAL(kVA)	752,9411765
CARGA DA SUBESTAÇÃO - COMANDO/PROTEÇÃO					
Carga	Quantidade	Potência(W)	FP	FD	Demanda Total (kVA)
Lâmpada Ligado	1	5	0,85	0,5	2,941176471
Lâmpada Desligado	1	5	0,85	0,5	2,941176471
Lâmpada Mola Carregada	1	5	0,85	1	5,882352941
Motor de Carregamento	1	625	0,85	1	735,2941176
Bobina de Abertura	1	100	0,85	1	117,6470588
Bobina de Fechamento	1	100	0,85	1	117,6470588
Carga No-Break	1	125	0,85	1	147,0588235
Carga do Relé (Alimentação)	1	5	0,85	1	5,882352941
				TOTAL(kVA)	1135,294118

Fonte: Autoria própria (2022)

Os dados necessários são: potência (W), quantidade, FP e FD para obter a demanda total em kVA. Feito o preenchimento, o TP ideal é determinado.

4.6 Informações do projeto

Como se trata da automatização de um projeto, as informações da obra, cliente e engenheiro são essenciais, para isso, na Figura 25 é possível preencher com essas informações.

Figura 25 - Dados da obra

DADOS DA OBRA	
Descrição da Obra:	
Nome da Edificação:	
Proprietário:	
CNPJ:	
Endereço:	
Cidade - UF:	
CEP:	
Responsável Técnico:	
CFT/UF:	
Projetista:	
Endereço:	
Bairro:	
Cidade:	
UF:	
Telefone:	
CREA/UF	
Mês - ano	

Fonte: Autoria própria (2022)

5 RESULTADOS

Simulado a partir de dados baseado num projeto real, obtêm-se os resultados descritos ao longo deste capítulo. Para a demanda, foram utilizados valores não-reais para explorar as funções da automatização.

Com base nos motores selecionados e com os campos preenchidos de suas características de operação, na Figura 26 obteve a seguinte potência para os mesmos.

Figura 26 - Resolução do cálculo de demanda dos motores

APARELHOS	índice	POTÊNCIA(cv)	RENDIMENTO(%)	FP	FU	Peixo-motor	DM(kVA)	quantidad	FS	Dcmm	
1	2	30,00	0,92	0,92	1,00	30	26,086957	1	1	26,0870	kVA
2	3	10,00	0,92	0,92	1,00	10	8,6956522	2	1	17,3913	kVA
3	4	55,00	0,92	0,92	1,00	55	47,826087	4	1	191,3043	kVA
4	5	1,50	0,92	0,92	0,70	1,05	0,9130435	3	0,85	2,3283	kVA
5	6	14,00	0,92	0,92	0,83	11,62	10,104348	4	0,8	32,3339	kVA
6	7	35,00	0,92	0,92	0,85	29,75	25,869565	2	0,8	41,3913	kVA
7	8	45,00	0,92	0,92	0,87	39,15	34,043478	2	0,9	61,2783	kVA
8	9	30,00	0,92	0,92	1,00	30	26,086957	1	1	26,0870	kVA
9	10	25,00	0,92	0,92	1,00	25	21,73913	2	0,9	39,1304	kVA
10	1	0,00	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0,0000	kVA
11	1	0,00	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0,0000	kVA
12	1	0,00	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0,0000	kVA
13	1	0,00	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0,0000	kVA
14	1	0,00	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0,0000	kVA
15	1	0,00	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0,0000	kVA
DcmmTotal:										437,3317	kVA

Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 26 é possível observar que obteve os resultados, onde se calcula a potência no eixo do motor ($P_{eixo-motor}$) e a demanda solicitada (D_m) respectivamente, para então obter a demanda no quadro geral de motores (D_{CMM}) individual, para juntos somar a demanda total dos motores ($D_{cmm\ totalr}$).

Para a demanda dos ares-condicionados, não é preciso multiplicar pelo fator de demanda, pois já está sendo considerado sua eficiência. Já para as TUG's e chuveiros, basta multiplicar pelo fator de demanda, estimada em 0,64.

Para obter a demanda da iluminação baseado nos valores de entrada representada na Figura 27, utiliza-se a equação 5 e multiplica-se pelo fator de demanda.

Figura 27 - Resolução do cálculo de demanda da iluminação

Demanda de Iluminação		$D_{iluminação} = F_m * \frac{\sum N_{num\ lap} * \left(P_{NL} + \frac{P_r}{F_p} \right)}{1000} \text{ (kVA)}$	
ρ/ lâmpadas fluorescentes			
Nmul lap:	500	Número de Lâmpadas	
Pnl:	40	Potência Nominal das Lâmpadas	
Pr:	15,3	Perdas reatores	
Fp:	0,9	Fator de potência	
Dilum:	30,72222	kVA	com reator
Dilum:	5,2	kVA	sem reator
Dilum:	1,888	kVA	sem reator
Dilum:	0,48	kVA	sem reator
Dilumsom	38,29022	kVA	
FD:	0,64		
Dilum_total	24,50574	kVA	

Fonte: Autoria própria (2022)

Após as demandas calculadas, soma-se todas para obter a demanda prevista, como já foi multiplicado pelo FD, não é preciso multiplicar novamente. Na Figura 28 mostra as demandas calculadas.

Figura 28 - Cálculo da demanda total prevista

DEMANDA GERAL DA SUBESTAÇÃO		
DilumTotal:	24,50574	kVA
DcmmTotal:	437,3317	kVA
TUG's	6,4	kVA
Dchuv	8,96	kVA
Dtugs	1,536	kVA
Doutros	2,24	kVA
Doutros	0	kVA
Ar-cond	6,813519	kVA
Demanda TOTAL	487,79	kVA

Fonte: Autoria própria (2022)

Para iniciar os cálculos de falta, inicia-se pela padronização das medidas, e para isso, calcula os valores de base demonstrados na Figura 29.

Figura 29 - Cálculo das bases

Cálculo de Corrente e Impedância de Base				
Vb	13800	V	$I_b = \frac{S_b}{V_b \cdot \sqrt{3}}$	$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$
Sb	100000000	VA		
Ib	4547,49739	amperes		
Zb	1,9044	ohms		

Fonte: Autoria própria (2022).

Onde Vb e Sb são fornecidos pela concessionária para encontrar a corrente e a impedância de base. Com esses dados, calculam-se as impedâncias em p.u. da rede, do transformador e do cabo de MT. Na Figura 30 exemplifica essa conversão, nas demais situações, o processo é semelhante.

Figura 30 - Cálculo da impedância da rede em p.u.

Cálculo de conversão da impedância da rede						
IMPEDÂNCIA DE REDE					$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b}$	
	valor			unidade		
Z+:	1,111	+	2,232	ohms/pu	mult.:	0,52509977
Z-:	1,111	+	2,232	ohms/pu	mult.:	0,52509977
Z0:	4,26	+	9,165	ohms/pu	mult.:	0,52509977
	valor			unidade		
Z+:	0,58338584	+	1,172022684	pu		
Z-:	0,58338584	+	1,172022684	pu		
Z0:	2,23692502	+	4,812539382	pu		

Fonte: Autoria própria (2022)

A unidade de medida é um fator muito importante a tomar cuidado, pois é preciso considerar todos para obter valores esperados.

Com os dados obtidos, inicia-se os cálculos das faltas do sistema, a partir da equação 15 para obter a falta trifásica, representada na Figura 31.

Figura 31 - Cálculo de falta trifásica

CÁLCULO DE DE FALTA TRIFÁSICO				I=0 IO=0	$I_{cc3} = \frac{I_b}{ Z_{+total} }$
Ztotal:	0,591272842	+	1,177662256		
Ztotal :	1,317760207				
icc3:	3450,929366	amperes			

Fonte: Autoria própria (2022)

A falta monofásica máxima e a falta monofásica mínima são demonstradas na Figura 32 o seu desenvolvimento.

Figura 32 - Cálculo de falta monofásica

CÁLCULO DE DE FALTA MONOFÁSICA				$I_{cc1max} = \frac{3 * I_b}{ Z_{0total} + Z_{-total} + Z_{+total} }$
Ztotal:	3,521875656	+	7,29831443	
Ztotal :	8,103641259			
icc1max:	1683,501496	amperes	*obs.: Curto fase-Terra Máximo	
$I_{cc1min} = \frac{3 * I_b}{ Z_{0total} + Z_{-total} + Z_{+total} + 3 * Z_{contato} }$				
3*Zcontato:	120	ohm		
3*Zcontato:	63,01197227	pu		
Ztotal:	66,53384793	+	7,29831443	
Ztotal :	66,93293893			
icc1min:	203,8232954	amperes	*obs.: Curto fase-Terra Mínimo	

Fonte: Autoria própria (2022)

Para a falta bifásica basta utilizar a falta trifásica, fato mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Cálculo da falta bifásica

CÁLCULO DE DE FALTA BIFÁSICO				IO=0 I+=-I-	$I_{cc2} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{cc3}$
icc2:	2988,592497	amperes			

Fonte: Autoria própria (2022)

Nos casos em que se calcula a corrente de curto-circuito trifásica no ponto do transformador, tem-se mais a Figura 34, demonstrando a mudança de base necessária para o devido cálculo.

Figura 34 - Cálculo da mudança de base e da falta trifásica no ponto do transformador

FALTA 2 (falha no tranformador no lado de baixa)			
Z trafo:	0,055	pu	$Z_{pu_novo} = Z_{pu_velho} * \left(\frac{V_{b_trafo}}{V_{b_rede}} \right)^2 * \left(\frac{S_{b_rede}}{S_{b_trafo}} \right)$
Vb:	13,8	kV	
V_trafo:	13,8	kV	
Sb:	100	MVA	
S_trafo:	0,75	MVA	
Z_novo:	7,333333333	PU	
CÁLCULO DE DE FALTA TRIFÁSICO			
			$I_{cc3} = \frac{I_b}{ Z_{+total} }$
Z+total:	0,591272842	+	8,510996
Z+total :	8,531509215		
lcc3:	533,0237921	amperes	

Fonte: Autoria própria (2022)

Feito esse processo para todos os pontos de faltas, inicia-se o próximo passo para definição dos equipamentos de proteção.

Agora o cálculo das correntes nominais da demanda e dos transformadores são essenciais para a próxima etapa, iniciando pelo cálculo da corrente de partida de fase e neutro, detalhados na Figura 35.

Figura 35 - Cálculo das correntes nominais dos transformadores, correntes de partida de fase e de neutro

CORRENTES NOMINAIS			$I_{nominal} = \frac{DEMANDA}{V_{FFnominal} * \sqrt{3} * 0,92}$		
DEMANDA:	487787,0007	W	Inom_Trafo1:	31,37773	A
Inominal:	20,40753306	A	Inom_trafo2:	0	A
CORRENTE DE PARTIDA DE FASE			$I_p = \frac{I_{nominal} * D}{RTC(h)}$		
D:	1,2		1,05 < D < 1,20		
Ip:	24,48903967	A			
CORRENTE DE PARTIDA DE NEUTRO			$I_{pn} = I_p * B$		
B:	0,2		0,2 < B < 0,33		
Ip:	4,897807933	A			

Fonte: Autoria própria (2022)

Nesse caso, a corrente nominal do transformador 2 é zero por não utilizar o mesmo no exemplo.

Na Figura 36 mostra que as correntes de ANSI, magnetização, inrush e instantânea de fase e neutro são os próximos a ser calculados com base nas equações já comentadas.

Figura 36 - Cálculo das correntes ANSI, de magnetização, inrush, instantânea de fase e neutro

CORRENTES ANSI (T1)			CORRENTES ANSI (T2)			
t:	2	s				$I_{ANSI} = I_{nominal} TRF * 25$
IANSI(T1):	570,50422	A	IANSI(T2):	#DIV/0!	A	$I_{NANSI} = 0,58 * I_{ANSI}$
INANSI(T1):	330,89245	A	INANSI(T2):	#DIV/0!	A	
CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO						$I_{inrush} = G * I_{nominal}$
G:	8		G:	8		G= 8 - 10 P/ Trafo a Óleo
Imag:	251,02186	A	Imag:	0	A	G= 12 - 14 P/ Trafo Seco
CORRENTE Inrush			CORRENTE Inrush (saída)			$I_{inrush} = I_{mag} + I_{nomina}$
linrush.fase	251,02186	A	linrush	251,0218562		
Imag:	0					
CORRENTE DE INSTANTÂNEA fase			CORRENTE DE INSTANTÂNEA neutro			$I_{instantânea} = M * I_{inrush}$
M:	1,2		B:	0,2		1,05 < M < 1,20
linst.fase	301,22623	A	linst.neutro	60,24524548	A	0,2 < B < 0,33

Fonte: Autoria própria (2022)

Dados estes necessários para calcular o dial de tempo mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Cálculo do dial de tempo de fase

	TIPO DE CURVA		coeficientes		$td(I) = \frac{\beta}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} * DT$
			k	α	
	Tempo Inverso		0,14	0,02	$DT = \frac{\left(\frac{I_{inrush}}{I_P}\right)^\alpha - 1}{k} * t(I)$
	Tempo muito Inverso		13,5	1	
	Tempo longo Inverso		120	1	
	Tempo extremamente Inverso		80	2	
	Tempo ultra-Inverso		315,2	2,5	
ÍNDICE TEMPO	t(I):	0,2010499	k/ α :	0,14	0,02
1			0,05s < Atraso < 0,1s	tl=0,1s+Atraso	
		$DT = \frac{\left(\frac{I_{inrush}}{I_P}\right)^\alpha - 1}{k} * t$	Tempo Usual (TMS)		
			Atraso:	0,05	s
			tl:	0,15	s
			DTf:	0,0510499	
			DTn:	0,1	

Fonte: Autoria própria (2022)

Agora é possível elaborar a curva do relé e da rede da corrente em função do tempo, a partir de valores variáveis da corrente de partida de fase e neutro com tempo variável a partir da Figura 38.

Figura 38 - Coeficientes de curva

CURVA NORMAL INVERSA (FASE RELÉ)	$td(I) = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} * DT$	
Ip:	24,4890397	Imin:
α:	0,02	24,4890397
k:	0,14	Imax:
DT:	0,0510499	301,226227

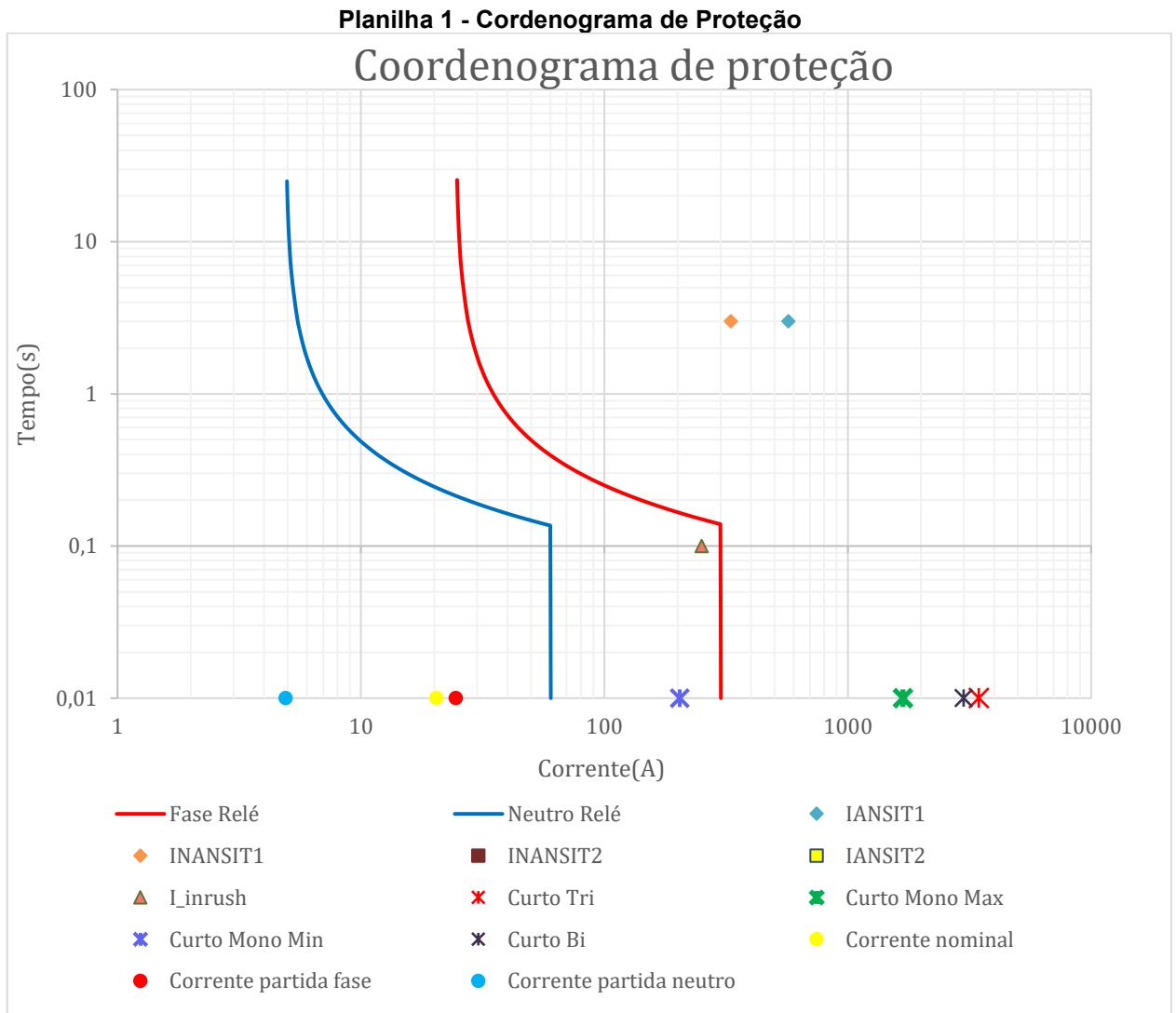
Fonte: Autoria própria (2022)

Para a curva do neutro, o princípio é o mesmo, muda apenas os dados. A Figura 39 apresenta todas as correntes que devem ser plotadas para formar a Planilha 1 de coordenograma de proteção.

Figura 39 - Dados para plotar o gráfico de coordenograma de proteção

DADOS DO RELÉ	
Dial de Tempo F (s):	0,051
Dial de Tempo N (s):	0,100
Corrente nominal (A):	20,408
Corrente partida fase (A):	24,489
Corrente partida neutro (A):	4,898
Curto Tri (A):	3450,929
Curto Bi (A):	2988,592
Curto Mono Max (A):	1683,501
Curto Mono Min (A):	203,823
I_inrush (A):	251,022
IANSIT1 (A):	570,504
INANSIT1 (A):	330,892
IANSIT2 (A):	#DIV/0!
INANSIT2 (A):	#DIV/0!

Fonte: Autoria própria (2022).



Fonte: Autoria própria (2022)

Com o gráfico traçado, basta estudá-lo para verificar se será eficiente o projeto de proteção elétrica. As curvas de fato estão protegendo os transformadores, pois as curvas ANSI e NANSI estão à direita dos limites parametrizados no relé. Caso ocorra falta trifásica ou bifásica, a curva fase irá proteger, e no caso de a falta monofásica ocorrer, a curva do neutro estará protegendo.

Podemos perceber que a curva temporizada de fase permite que aconteça a corrente de partida (Inrush) do transformador aconteça, com uma folga de no mínimo 300 ms.

Com o coordenograma demonstrando que a proteção será efetiva, basta definirmos os demais equipamentos, começando pelo transformador representado pela Figura 40.

Figura 40 - Transformador dimensionado

Transformador 1			
S(kVA):	750	V_AT(kV):	13,8
Z(%):	5,5	V_BT(V):	220
Fusível de proteção HH (A):		50	
Disjuntor de proteção (BT) (A):		2500	

Fonte: Aatoria própria (2022).

Os demais equipamentos são demonstrados na Figura 41.

Figura 41 - Dimensionamento do TC e TP de proteção e do disjuntor geral

TC de Proteção:	
TC:	200:5
RTC:	40
Tensão de Saturação(V):	50
TP de Proteção:	
TP de alimentação (VA):	2000
TP de proteção:	0,3P75
Disjuntor Geral	
I_nominal (a):	630
I_interrupção (a):	4313,66

Fonte: Aatoria própria (2022).

Com as informações coletadas, basta realizar o memorial de cálculo e o memorial descritivo a partir dos dados calculados.

Para coletar informações sobre os equipamentos, como potência, tensão, corrente, impedância, foram coletados dados de catálogos e manuais da Weg, Siemens e Kron.

CONCLUSÕES

Com base no estudo desenvolvido é possível determinar que para uma boa elaboração de projeto de proteção de sistemas elétricos industriais é preciso muita atenção a cada detalhe, seja da concessionária, equipamentos ou consumidor, pois cada um desses pode variar dependendo da situação.

Neste trabalho foram apresentados os equipamentos e os passos para uma correta coordenação e seletividade de proteção, além de desenvolver uma automatização do cálculo, apresentando resultados esperados. Simulando uma situação prática futura, uma vez que permitiu-se vivenciar um projeto profissional enfrentado pelo autor.

O desenvolvimento desse trabalho trouxe conhecimento mais aprofundado sobre sistema de proteção, apresentando complexidade na sua elaboração.

A elaboração da automatização do cálculo de demanda prevista no ponto de entrega também foi realizada neste trabalho, de forma a otimizar o tempo e facilitar o engenheiro ao elaborar um projeto de sistema de proteção.

O objetivo em elaborar uma automatização do cálculo de proteção de sistema elétrico industrial com mais de 300 kVA foi concluído com sucesso, podendo ser utilizado para as concessionárias COPEL e CELESC, é possível um sistema com até dois transformadores. Limitações essas que podem ser superadas se necessário, bastando coletar as informações das demais concessionárias de interesse e alterar para suportar mais transformadores.

Os resultados obtidos foram os esperados, havendo pequenas diferenças, as quais podem ter sido devido aos bancos de dados das impedâncias do cabo e transformador, além de possíveis erros numéricos de aproximação nos cálculos.

Apesar de auxiliar na elaboração de sistema de proteção, essa automatização pode ser mais explorada, com a proteção e seletividade de motores, sendo que são equipamentos de grande custo e sensível a falhas do sistema.

Como trabalhos futuros, pode-se integrar a planilha com um editor de texto para elaboração de memorial descritivo, integração com listas de materiais, inserção de curvas dos religadores das concessionárias e, também, dos fusíveis de proteção existentes na rede.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC), 2015. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 12 abril 2022.

ALMEIDA, M. A. D. de Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. Natal, 2000, 129p. Notas de aula. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).
BRAGA, C.N. Relés- conceitos e aplicações. Instituto Newton C Braga. São Paulo, 2012.

BRASÍLIA. Resolução normativa ANEEL. nº 414/2010 de 09 de setembro de 2010. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acessado em 06/05/2022.

CAMINHA, Amadeu C. Introdução à proteção dos sistemas elétricos. 16. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1977. 225 p. ISBN 978-85-212-0136-6.

CELESC. Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição- Norma Técnica N-321.0002. Ed. Maio. Santa Catarina-SC,2016. Disponível em: <<https://www.CELESC.com.br/arquivos/normas-tecnicas/especificacao-tecnica/l3130002.pdf>>. Acesso em: 21 fev de 2021.

CODÁ, R.M.L. Dispositivos lógicos programáveis. Departamento de engenharia elétrica e de computação-USP, São Paulo.

COPEL. Manual de apresentação de projetos de projeção para acessante de projeção. Normativa NTC 905200. NTC 905100. Paraná-PR,2021.

COTOSCK, R.K. Proteção de sistemas elétricos: Uma abordagem tecnico-pedagógica. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte-BH, 2007.

DEOTTI, P.M.L; GOMES, V.F. Sistemas elétricos de potência. 1ed. Editora NT. Brasília-DF, 2018.

FILHO, J.M. Instalações elétricas industriais: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015. ed.9. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2017.

FILHO, M.J. Instalações elétricas industriais. 7.ed. Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 2007.

FLEMING, B. Elemento Direcional de Impedância de Seqüência-Negativa. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 10th Annual ProTest User Group Meeting Pasadena, 24–26 de fevereiro, California- USA, 1998.

- GONDIM, C.M.P. Estudos dos relés eletromecânicos aos digitais nos sistemas eletrônicos de potência. Universidade Federal de Campina Grande. Trabalho de conclusão de curso. Campina Grande-PB, 2010.
- MAMEDE, João. Instalações elétricas industriais. 9. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora, 2018. 950 p. ISBN 978-85-216-33723.
- MARDEGAN,C. Proteção e seletividade. Dispositivos de proteção – Parte 1. Revista: O setor elétrico. Cap II.. ed.64 Abril. São Paulo-SP, 2010.
- MARDEGAN,C. Proteção e seletividade. Proteção dos transformadores –Parte I. Revista: O setor elétrico. Cap IV.ed 64 Junho. São Paulo-SP, 2010.
- MARDEGAN,C. Proteção e seletividade. Revista: O setor elétrico. Cap I. ed.64 Março. São Paulo-SP, 2010.
- MARDEGAN,C. Proteção e seletividade. Revista: O setor elétrico. Cap III. ed.64 Maio. São Paulo-SP, 2010.
- MARDEGAN,C. Curto-circuito para a seletividade. Componentes simétricas. Revista o setor elétrico. Cap IV. ed 123 abril, São Paulo-SP, 2016.
- MEDEIROS, C. Análise de Sistemas Desequilibrados – Faltas Assimétricas. Pontifícia Universidade Católica do Goiás. Goiás, 2011.
- MIRANDA, F.C.C. Diagnóstico e análise ao sistema de gestão dos trabalhos de tensão BT/MT/AT/MAT. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Trabalho de conclusão de curso. Porto-Portugal, 2006.
- MONARO,M.R; SILVA,M.P.R;JUNIOR,V.M.C.J;COURY,V.D. Sistemas integrados para desenvolvimento e execução em tempo real de algoritmos de proteção de sistemas elétricos. Revista Controle e Automação. vol.23 no.2/Março e Abril. São Carlos-SP, 2012.
- OLIVEIRA,W. Cálculo de correntes de curto-circuito e seletividade em instalações elétricas industriais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Trabalho de conclusão de curso. Curitiba-PR, 2014.
- PAIVA,A.D.T. Aparelhagem de média tensão: Tensão e aplicação prática. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Dissertação de mestrado. Porto-Portugal, 2020.
- PRADO,B.P. Estudo de saturação de transformadores de corrente aplicados em sistemas elétricos de potência. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio-PR, 2017.
- RAFFO, V.G. Projeto de diplomação: Análise de corrente de inrush em transformadores de potência. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2010.

RODRIGUES,R.S.G. et al. Desenvolvimento de cabine de subestação em média tensão. Revista ForScience. IFMG, Formiga, v. 5, n. 1, e00248, jan./jun. 2017.

SATO, Fujio; FREITAS, Walmir. Análise de curto-circuitos e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica: Fundamento e prática. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier Editora Ltda., 2015. 445 p. ISBN 978-85-352-6886-7.

STERVERNSON,D.W. Elementos de análise de sistemas de potência. Tradução e revisão técnica Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Somchai Ansuaj. 2.ed- São Paulo: McGraw-hill, 1996.

STEVENSON, William D. Elementos de análise de sistemas de potência. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, Ltda., 1986. 458 p.