UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
LUIS HENRIQUE RECH

SISTEMA DE PROTEÇÃO ELÉTRICO UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA SERVIÇO AUXILIAR 6,3KV DE USINA TERMELÉTRICA

Tubarão
2020

LUIS HENRIQUE RECH

SISTEMA DE PROTEÇÃO ELÉTRICO UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA SERVIÇO AUXILIAR 6,3KV DE USINA TERMELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Sérgio Martins Barcelos, Me. Eng.

Tubarão

2020

LUIS HENRIQUE RECH

SISTEMA DE PROTEÇÃO ELÉTRICO UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA SERVIÇO AUXILIAR 6,3KV DE USINA TERMELÉTRICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 15 de novembro de 2020.

Professor e orientador Sérgio Martins Barcelos, Me. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. e coordenador Francisco Duarte de Oliveira, Me. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Grégori Felisberto Darós, Eng.
ENGIE Brasil Energia S.A.

Dedico este momento muito importante na minha vida a todos os meus familiares e pessoas que me cercam, pois sempre me apoiaram, sendo fonte de inspiração e dedicação, fazendo-me retribuir assim, todo o carinho e afeto.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus por ter saúde e estar vivenciando este momento, me dando forças e me encorajando cada vez mais a buscar o objetivo de conclusão deste trabalho. Aos meus familiares, em especial ao meu pai Bruno Rech, minha mãe Renate Wilges Rech e aos meus dois irmãos, Gustavo e Marisa Rech que sempre me apoiaram e me deram motivações para terminar este curso, a minha esposa Laisa Nunes Menezes que sempre esteve ao meu lado e por vezes entendeu da minha ausência quando precisei para a conclusão deste referido trabalho.

A todos os professores da UNISUL que participaram da minha trajetória acadêmica e que com certeza cada um faz parte deste trabalho. Quero frisar três nomes bem importantes, que são do Engº Francisco Duarte, coordenador do curso que sempre me ajudou e esteve ao meu lado, a professora Silvana Dal-Bó que me auxiliou na montagem do trabalho e ao Engº Sérgio Martins Barcelos que foi meu orientador, onde foi muito dedicado e atencioso para a realização deste TCC.

Ao setor da manutenção elétrica da ENGIE, a MAN-E, em especial meu chefe direto, Claiton Alcides Marcos, meu supervisor Antônio Maurício e o coordenador do setor o Engº Anderson Beltrame, que por muitas vezes entenderam de certas ausências para a realização deste estudo, ao Engº Grégori Felisberto Darós pelo apoio no trabalho. E a todos os técnicos, em especial da UTLC, que não mediram esforços trabalhando ao meu lado, e que também fazem parte desta conquista.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar de novo com mais inteligência”

(HENRY FORD, 1863-1947).

RESUMO

Com o passar dos anos, as máquinas, equipamentos e processos vem ficando obsoletos, pois hoje o mundo está cada vez mais inserido na era da digitalização, uma usina termelétrica com mais de 20 anos de operação, onde seus equipamentos são da época de seu comissionamento, não poderia ser diferente. A modernização de equipamentos como relés de proteção, permite maior precisão e exatidão no momento da atuação da proteção em comparação aos antigos. Estes equipamentos têm novas funções agregadas que antigamente não existiam, como por exemplo a detecção de arco elétrico com o uso de fibra óptica. Esta função proporciona um tempo menor de atuação da proteção frente a um curto-circuito, onde, todo o tempo que o equipamento elétrico está exposto a esta falta, sofrerá danos materiais devido a energia dispersada durante o tempo de falha. Além dos danos materiais também existem os danos pessoais, pois o local onde ficam instalados os equipamentos a serem protegidos, existe a circulação de pessoas. Neste trabalho será exposto o processo de instalação do sistema de detecção de arco em um barramento 6,3kV de serviço auxiliar de uma usina termelétrica, assim como suas vantagens comparado a um sistema sem esta tecnologia.

Palavras-chave: Relé de Proteção. Fibra Óptica. Serviço Auxiliar

ABSTRACT

Over the years, machines, equipment and processes have become outdated, because today the world is increasingly inserted in the age of digitalization, a thermoelectric plant with more than 20 years of operation, where its equipment is from the time of its commissioning , it couldn't be different. The modernization of equipment such as protection relays, allows greater precision and accuracy at the moment of protection operation compared to the old ones. These equipment's have new added functions that did not exist in the past, such as the detection of electric arc using optical fiber. This function provides a shorter time for the protection to act in the event of a short circuit, where, all the time that the electrical equipment is exposed to this fault, it will suffer material damage due to the energy dispersed during the time of failure. In addition to material damage, there are also personal injuries, as the place where the equipment to be protected is installed, there are circulation of people. This work will expose the process of installing of the arc detection system in a 6.3 kV bus of auxiliary service of a thermoelectric plant, as well as its advantages compared to a system without this technology.

Keywords: Protection Relay. Optical fiber. Auxiliary Service

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Processos de uma Usina Termelétrica. 21
Figura 2 — Caldeira Aquatubular 22
Figura 3 — Turbina a Vapor 23
Figura 4 — Gerador Elétrico 24
Figura 5 — Transformador elétrico 25
Figura 6 — Disjuntor de média Tensão 27
Figura 7 — Cubículos formando um barramento de distribuição. 29
Figura 8 — Zonas de proteção 30
Figura 9 — Princípio de funcionamento de um relé eletromecânico. 33
Figura 10 — Relé Eletrônico 34
Figura 11 — Relé Digital 35
Figura 12 — Composição da fibra óptica 36
Figura 13 — Transmissão da luz na fibra óptica 37
Figura 14 — Fibra óptica pontual 38
Figura 15 — Fibra óptica regional 39
Figura 16 — Nuvem de plasma gerado pelo arco elétrico 41
Figura 17 — Consequência de um curto circuito 42
Figura 18 — Curto circuito sobre um trabalhador. 43
Figura 19 — Relação tempo temperatura que o tecido humano suporta. 44
Figura 20 — Decomposição de um sistema desequilibrado. 46
Figura 21 — Enrolamento de núcleo envolvido 47
Figura 22 — Enrolamento de núcleo envolvente 48
Figura 23 — Ligação Y-Y com os neutros aterrados 49
Figura 24 — Ligação Y-Δ 50
Figura 25 — Fonte de tensão aplicada no lado delta. 50
Figura 26 — Detalhamento de correntes em um curto circuito. 61
Figura 27 — Detalhamento de espaçamento ente os condutores. 65
Figura 28 — Ponta de uma fibra óptica pontual 67
Figura 29 — Fibra ótica regional instalada 68
Figura 30 — Lugares de instalação da fibra representados por setas. 69
Figura 31 — Local de instalação da fibra óptica regional. 70
Figura 32 — Pontos de instalação da fibra óptica pontual. 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Tipos de curva 16
Tabela 2 — Tempo de operação do disjuntor de potência. 55
Tabela 3 — Classes de equipamentos e distâncias entre barramentos. 55
Tabela 4 — Distâncias típicas de trabalho 56
Tabela 5 — Limites de parâmetros para a Equação 15. 57
Tabela 6 — Expoente da distância “x”. 58
Tabela 7 — Dados dos transformadores. 62
Tabela 8 — Valores encontrados na barra BU1 e BU2 64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 JUSTIFICATIVA 14
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA 15
1.3 OBJETIVOS 17
1.3.1 Objetivo Geral 17
1.3.2 Objetivos Específicos 18
1.4 DELIMITAÇÕES 18
1.5 METODOLOGIA 18
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 19

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
2.1 USINA TERMELÉTRICA 20
2.1.1 Caldeira 21
2.1.2 Turbina a Vapor 22
2.1.3 Gerador 23
2.1.4 Serviço Auxiliar de uma Usina Termelétrica 24
2.1.5 Transformador 25
2.1.5.1 Transformador de Potencial 26
2.1.5.2 Transformador de Corrente 26
2.1.6 Disjuntor Trifásico 27
2.1.7 Barramento 28
2.1.8 Cubículo 28
2.2 PROTEÇÃO ELÉTRICA 29
2.2.1 Seletividade 29
2.2.2 Zonas de proteção 30
2.2.3 Velocidade 30
2.2.4 Sensibilidade 31
2.2.5 Confiabilidade 31
2.2.6 Automação 31
2.3 RELÉ DE PROTEÇÃO 32
2.3.1 Relé Eletromecânico 33

2.3.2 Relê Eletrônico 34
2.3.3 Relé Digital 35
2.4 FIBRA ÓPTICA 36
2.4.1 Transmissão da Luz 37
2.4.2 Tipos de Captação de luz para detecção de arco 38
2.4.2.1 Fibra Pontual 38
2.4.2.2 Fibra Regional 38
2.5 CURTO CIRCUITO 39

3 CURTO CIRCUITO 40
3.1 ETAPAS EM UM CURTO CIRCUITO 40
3.2 CONSEQUÊNCIAS DE UM CURTO CIRCUITO 42
3.3 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO 44
3.3.1 Componentes Simétricas 44
3.3.2 Circulação de corrente entre o transformador 46
3.3.2.1 Tipos de enrolamentos de transformadores 47
3.3.2.1.1 Núcleo Core-Type 47
3.3.2.1.2 Núcleo shlell-type 47
3.3.2.2 Esquema de ligação dos transformadores e suas impedâncias de sequência zero 48
3.3.2.2.1 Transformador trifásico ligados em Y-Y com os neutros aterrados 48
3.3.2.2.2 Transformador trifásico ligados em Y-Δ com o neutro aterrado 49
3.4 SOMA DAS IMPEDÂNCIAS PARA O CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO 51

4 ENERGIA INCIDENTE EM UM EVENTO DE CURTO CIRCUITO 52
4.1 PASSOS ANTES DE REALIZAR O CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE 52
4.1.1 Coleta de dados da instalação e do sistema 52
4.1.2 Determinar os modos de operação do sistema 53
4.1.3 Determinar a corrente de curto circuito sólida 53
4.1.4 Determinar a corrente de arco elétrico 54
4.1.5 Encontrar as características de proteção do dispositivo e a duração do arco 54
4.1.6 Documentar as tensões do sistema e classes do equipamento 55

4.1.7 Determinar as distâncias de trabalho 56
4.1.8 Determinar a energia incidente para todos os equipamentos 56

5 ESTUDO DO CASO 60
5.1 CORRENTE DE CURTO CIRCUITO NO SISTEMA AUXILIAR 60
5.2 ENERGIA INCIDENTE NO SERVIÇO AUXILIAR 64

6 UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA 67

7 CONCLUSÃO 72

REFERÊNCIAS 74

ANEXOS 76

ANEXO A Detalhamento da Unidade Geradora UTLC 76

ANEXO B Ficha de Teste Disjuntor de Alimentação Barramento BU1 77

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas tecnologias o tempo todo e em todas as áreas de atuação, com o ramo da engenharia elétrica não podia ser diferente, mais precisamente no setor de proteção elétrica. Para melhorar processos e proteções tanto humanas quando físicas nos locais de instalação, se faz necessário a substituição dos relés de proteção antigos por outros mais modernos.

Dentre os riscos apresentado em um local de trabalho, mais especificamente como estudo deste trabalho em uma usina termelétrica, o curto circuito traz muitos danos à saúde ocupacional e patrimonial de uma empresa devida as altas temperaturas, energia liberada e liberação de gases tóxicos na atmosfera do incidente, causando assim à pessoa que estiver operando o equipamento ou a que estiver transitando na sala durante o momento da falta, queimaduras graves irreversíveis ou até mesmo podendo levar a óbito.

Os curtos-circuitos, as sobrecargas e as sub e sobretensões são inerentes ao funcionamento dos sistemas de potência, apesar das precauções e cuidados tomados durante a elaboração do projeto e a execução das instalações, mesmo seguindo as normas mais severas e as recomendações existentes. Essas anormalidades poderão ter consequências irrelevantes ou desastrosas, dependendo do sistema de proteção preparado para aquela instalação em particular. (MAMEDE, 2013)

O Complexo Jorge Lacerda fica localizado no sul de Santa Catarina no município de Capivari de Baixo e é constituído por sete grupos geradores, agrupados em três usinas: Jorge Lacerda A, com duas unidades geradoras de 50 MW e duas de 66 MW cada, Jorge Lacerda B, com duas unidades de 131 MW cada e, Jorge Lacerda C, com uma unidade geradora de 363 MW, totalizando 857 MW (ENGIE, 2020).

Neste trabalho de conclusão de curso, será abordado o projeto para a instalação e implementação de um sistema de detecção de arco voltaico através de um sensor de fibra óptica ligada a um relé de proteção, este estudo foi feito em um sistema auxiliar de 6,3kV da unidade C na usina termelétrica Jorge Lacerda.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um sistema de transmissão de energia elétrica pelo Brasil, onde todas as regiões do país são conectadas através de linhas de transmissão e

subestações, esta interligação de todo território nacional permite atender todo um mercado formado por indústrias, empresas e cidades com maior confiabilidade e economia possível.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN (ONS, 2020).

Para uma usina se tornar confiável e conseguir gerar o maior tempo de energia possível, um sistema de proteção elétrico adequado se faz necessário, pois estas funções minimizam os danos causados por sobrecargas, sub e sobretensões e danos causados por curtos-circuitos.

Um sinistro ocasionado por um curto-circuito no barramento de serviço auxiliar de uma usina, pode indisponibilizar a unidade geradora por muitos dias, ou dependendo da extensão do problema e da demora de interrupção desta falta, por meses, levando em consideração somente danos materiais, pois vidas podem ser prejudicadas ou perdidas durante um acontecimento desta magnitude.

Para tornar mais seguro o ambiente de trabalho e também as manobras operacionais, tais como, inserção e extração de um disjuntor, ligar ou desligar um equipamento, se faz necessário um estudo de implementação de um sistema de detecção de arco voltaico utilizando a fibra óptica conectada a um relé de proteção, para assim, minimizar o tempo de atuação em um curto-circuito, garantindo a integridade dos equipamentos e da vida dos colaboradores que ficam presente no recinto.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente o sistema de serviço auxiliar da Usina Termelétrica Jorge Lacerda C (UTLC) conta com seis relés de proteção para o seu serviço auxiliar através do ramal de alimentação proveniente do Transformador de Unidade (TU), este transformador faz a transformação da tensão do seu primário, proveniente da saída do gerador da usina, de 20kV para dois secundários de 6,3kV. O secundário 1, chamado de SEC.1 alimenta o Barramento

de Unidade (BU1), e o secundário 2, SEC.2, alimenta o Barramento de Unidade 2 (BU2) conforme mostra o esquema elétrico no Anexo A.

A alimentação do BU1 possui 3 relés de proteção de sobrecarga, um para cada fase, pois na época da construção da usina, com fornecimento de responsabilidade da INEPAR, era o procedimento técnico do momento. No BU2, existe os outros 3 relés, com as mesmas configurações do BU1, totalizando assim os 6 relés de proteção.

Estes relés de proteção atualmente tem a função de sobrecarga temporizado, com característica de respeitar a curva de sobrecorrente muito inversa que está descrita na Tabela 1 conforme norma IEC.

Tabela 1 — Tipos de curva

Tipo de curva Tempo/Corrente	**Equação**
Normal Inversa (SI)	$t = TMS.\frac{0{,}14}{\left(\frac{I}{I_S}\right)^{0{,}02} - 1}$
Muito Inversa (VI)	$t = TMS.\frac{13{,}5}{\left(\frac{I}{I_S}\right)^{1} - 1}$
Extremamente Inversa (EI)	$t = TMS.\frac{80}{\left(\frac{I}{I_S}\right)^{2} - 1}$
Longamente Inversa	$t = TMS.\frac{120}{\left(\frac{I}{I_S}\right)^{1} - 1}$

Fonte: (MARDEGAN, 2012)

Onde:

$t =$ tempo de operação em segundos;

$TMS =$ Dial de tempo, em segundos;

$I =$ Corrente no secundário do TC;

$I_s =$ Corrente de *pick-up.*

Através destas equações nota-se que não temos nenhum elemento de curva de tempo definido nas entradas do BU1 e BU2, ou seja, não existem curvas de atuação instantâneas, podendo assim ocorrer um curto circuito e levar um tempo excessivo para a sensibilização da proteção, e por sua vez, interrupção da falta através do disjuntor de entrada.

Para diminuir este tempo, sem modificação da filosofia de proteção elétrica do serviço auxiliar da UTLC, pode-se inserir uma fibra óptica descoberta, aonde existe a adoção de uma filosofia que combina a detecção de luz dentro do painel (que indica a formação de um arco elétrico) com a detecção de aumentos significativos nos valores nominais da corrente de carga (que confirma a presença de um curto-circuito entre as partes vivas no interior do painel) eliminando detecções falsas da iluminação e fornece a detecção e o disparo mais rápidos possíveis (SEL, 2011).

Diminuindo este tempo, tem-se menos efeitos negativos proveniente de um arco elétrico. A corrente de curto circuito, de acordo com a lei de Joule, provoca a dissipação de potência no circuito, cujo aquecimento pode ser quantificado pela Equação (1). No ponto de falta, este aquecimento e o formato do arco podem provocar graves danos nas instalações elétricas, dependendo de I_{cc} e de t. Portanto, para uma dada corrente de curto-circuito, o tempo t deve ser o menor possível para reduzir os danos (SATO, 2015).

$$Q = R.\int_{t_1}^{t_2} i^2.dt \tag{1}$$

Onde:

$Q =$ Calor gerado;

$R =$ Resistência;

$i =$ Corrente;

$t =$ Tempo;

1.3 OBJETIVOS

Para a realização deste projeto e melhoria do sistema de proteção elétrica do sistema auxiliar da UTLC, serão descritos abaixo o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Elaborar um projeto de proteção contra curto-circuito utilizando a fibra óptica para detecção da falta como sensor de sensibilização, em estudo de caso na usina Jorge Lacerda, no serviço auxiliar de 6,3kV da unidade 7 da UTLC.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar levantamento dos dados originais e equipamentos disponíveis que estão em funcionamento;
- Realizar estudos de esquemas elétricos e unifilares da usina, para ter total entendimento do funcionamento de proteção da planta, para assim, não alterar uma filosofia de funcionamento;
- Propor modelo de equipamento para aceitação da tecnologia que se estuda a implementação;
- Realizar cálculos e exemplos de um curto-circuito acontecendo no sistema auxiliar de 6,3kV da unidade para a comprovação da utilização do sistema em análise;
- Proporcionar segurança operacional dos equipamentos, assim como a segurança das pessoas que operam e visitam a planta.

1.4 DELIMITAÇÕES

O desenvolvimento deste estudo para a implementação da fibra óptica como elemento de detecção de arco-elétrico será feito no complexo Jorge Lacerda, usina termelétrica UTLC, especificamente no seu serviço auxiliar de 6.3kV.

1.5 METODOLOGIA

O presente estudo será realizado o levantamento dos documentos e manuais disponíveis no acervo técnico da usina, e por materiais de instrução e estudos enviados por um dos possíveis fornecedores dos relés compatíveis com a tecnologia a ser estudada, onde pode-se destacar os seguintes materiais:

- Fichas de calibrações dos relés de proteção que se encontram em operação na planta;
- Manuais e estudos do fabricante da nova tecnologia a ser estudada;
- Esquemas elétricos do serviço auxiliar da unidade;
- Desenhos construtivos da forma de instalação e disposição dos equipamentos instalados no serviço auxiliar da unidade.

Os estudos destes documentos têm por finalidade o aprofundamento no conhecimento da metodologia utilizada que está em operação, assim como a filosofia a ser adotada com este estudo de nova tecnologia.

Será feito uma análise do projeto para compreender tudo que for necessário de forma direta ou indireta para a execução deste estudo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está divido em cinco capítulos, estruturados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: É apresentado uma introdução sobre o tema a ser estudado frisando a importância deste assunto, bem como a justificativa, objetivos e metodologias utilizadas para o trabalho de conclusão de curso;
- Capítulo 2: Será abordado toda a explicação e conhecimento necessário para a realização do estudo, de forma a deixar o leitor em plena sabedoria sobre o que abrange o tema proposto, ou seja, a fundamentação teórica através de revisões bibliográficas;
- Capítulo 3: Neste capítulo é apresentado o cálculo de curto circuito necessário para a abordagem do tema;
- Capítulo 4: Neste capítulo é apresentado o cálculo de energia incidente necessário para a abordagem do tema;
- Capítulo 5: É apresentado o estudo de caso, onde é realizado o estudo de curto circuito e energia incidente na planta em estudo;
- Capítulo 6: Neste capítulo é apresentado a tecnologia para detecção de arco elétrico através de fibras ópticas, e alguns fabricantes que utilizam esta mesma tecnologia;
- Anexos: Os anexos contêm partes de projetos elétricos e desenho construtivo dos painéis para total compreendimento dos leitores para que possa ser visualizado o projeto por completo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado todas as informações necessárias sobre equipamentos e componentes que fazem parte deste trabalho, para deixar o leitor melhor informado e proporcionar uma leitura com mais clareza.

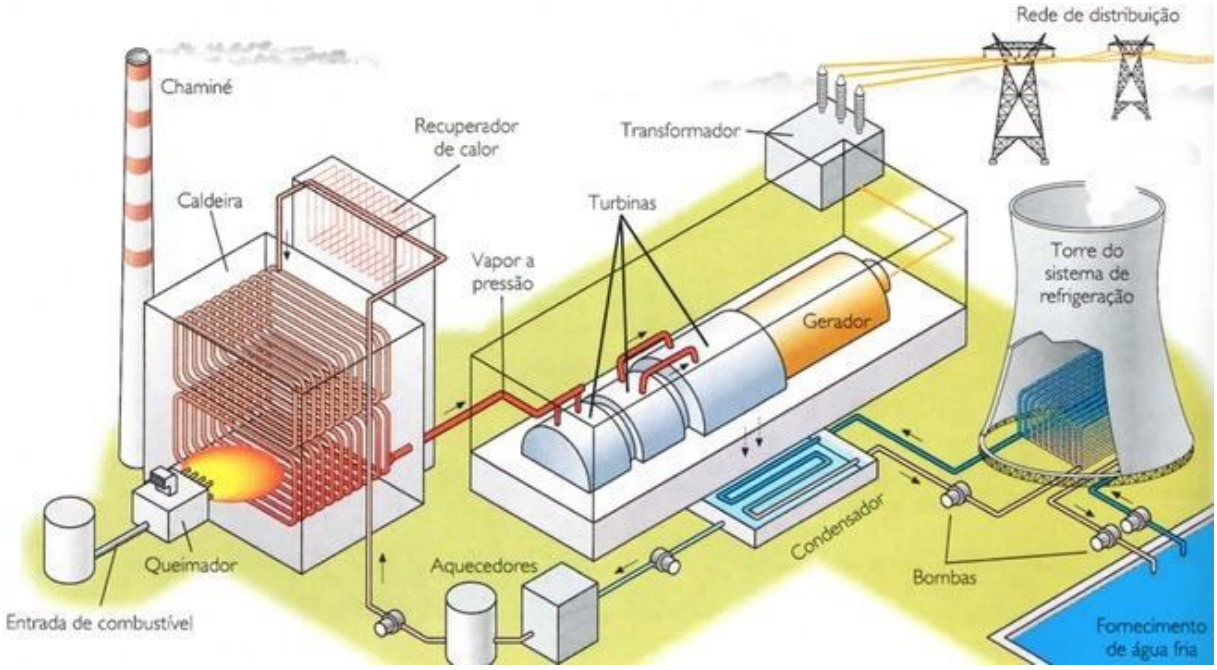
2.1 USINA TERMELÉTRICA

As usinas termelétricas são unidades que necessitam queimar um determinado combustível, seja ele renovável ou não, para que possa ser gerado o vapor, e então este vapor ser convertido em energia elétrica conforme representa a Figura 1. A usina que será realizado o estudo, a UTLC, utiliza o carvão mineral como fonte de energia térmica dentro da caldeira, este carvão é trazido da região de Criciúma – SC através da utilização de trem.

Basicamente, nas termelétricas, a caldeira é aquecida com água e produz vapor, o qual, em alta pressão, move as pás da turbina do gerador. A energia nuclear, por meio de reações nucleares, também é uma fonte de calor para aquecer a água. Por sua vez, após ter movimentado as turbinas, o vapor é conduzido a um condensador que será resfriado para ser reutilizada em um novo ciclo.

Na realidade, a eletricidade é produzida a partir da energia cinética obtida pela passagem do vapor pela turbina, transformando a potência mecânica em potência elétrica. A energia gerada é transmitida através de cabos, que por sua vez é levada aos transformadores, onde tem sua tensão levada a níveis adequados para utilização pelos consumidores. Daí, a energia é distribuída para consumo (TODA MATÉRIA, 2017).

Figura 1 — Processos de uma Usina Termelétrica.



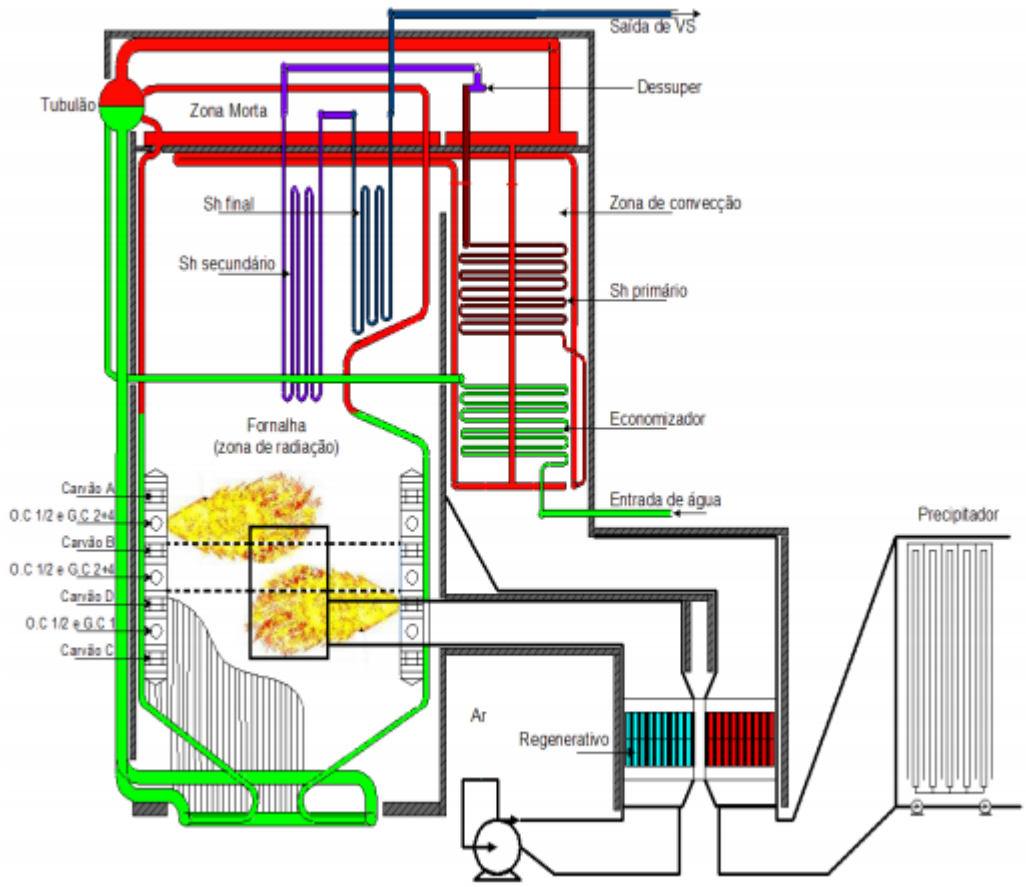
Fonte: (MARTINS, 2020)

2.1.1 Caldeira

As caldeiras utilizadas em plantas termelétricas são equipamentos normalmente de grande porte, onde é utilizado para a partir da queima de um combustível, seja ele renovável ou não, podendo ser carvão mineral, óleo diesel, gás natural, bagaço de cana etc. estes equipamentos geram vapor através da água que passa por dentro do seus tubos obtendo assim temperatura e pressão para posteriormente ingressar em turbogerador.

No caso da unidade 7 da UTLC, a caldeira é do tipo aquotubular, que tem como característica a passagem de água por dentro dos tubos da parede da água, e os gases da combustão pela parte externa conforme representa a Figura 2.

Figura 2 — Caldeira Aquatubular



Fonte: da Silva, Murilo Prates (2013)

2.1.2 Turbina a Vapor

Turbina a vapor como é mostrado na Figura 3, é uma máquina térmica que utiliza a energia do vapor sob forma de energia cinética. A sua contribuição dentro de um processo termelétrico é transformar em energia mecânica a energia contida no vapor vivo sob a forma de energia térmica e de pressão.

O trabalho mecânico realizado pela turbina vai ser transportado por energia mecânica contida no eixo a um gerador elétrico. A energia, que permanece no vapor descarregado pela máquina, é, em muitos casos, simplesmente rejeitada para o ambiente, em um condensador. Em outras situações, entretanto, é possível aproveitar o vapor descarregado pela máquina para fins de aquecimento, por exemplo. Aproveita-se assim sua energia residual, melhorando, em consequência, de forma significativa o rendimento global do ciclo.

Figura 3 — Turbina a Vapor

Fonte: (STROSKI, 2020)

2.1.3 Gerador

O gerador elétrico conforme mostrado na Figura 4, inserido no ciclo de uma usina termelétrica, tem por finalidade a conversão da energia mecânica no seu eixo fornecida por uma turbina a vapor, em energia elétrica nos seus terminais de saída.

No caso de geradores acoplado ao SIN, são geradores síncronos, ou seja, existe um sincronismo entre o sistema do país e o enlace magnético contido nas bobinas do estator e do rotor do gerador.

Em um gerador síncrono, um campo magnético é produzido no rotor que está diretamente acoplado a turbina. Durante o projeto do rotor, para obter esse campo magnético, pode-se optar pelo de um eletroímã, obtido pela aplicação de uma corrente CC a um enrolamento desse rotor. O rotor do gerador é então acionado, por uma máquina motriz primária, que produz um campo magnético girante dentro da máquina. Esse campo magnético girante induz um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos de estator do gerador (CHAPMAN, 2013).

Figura 4 — Gerador Elétrico

Fonte: (ANEEL, 2018)

2.1.4 Serviço Auxiliar de uma Usina Termelétrica

O serviço auxiliar de uma usina termelétrica, é uma composta por um ou mais barramentos de distribuição e de alimentação para motores de grande porte cujo os quais são ligados em alta tensão. Estes barramentos por sua vez, fornecem alimentação elétrica para os barramentos de sub-distribuição, comumente utilizados em tensões menores (entre 380 até 480Vca).

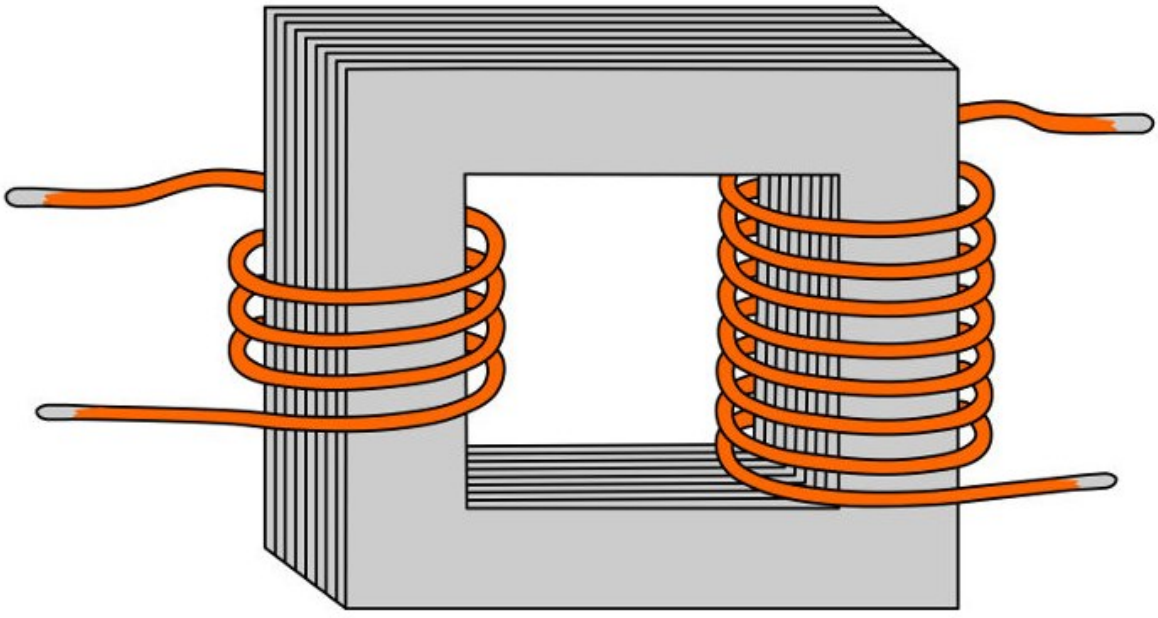
Este sistema é responsável por fornecer alimentação elétrica para que a planta possa entrar e continuar em operação, desde o motor mais importante para esta operação, até a parte de iluminação e tomadas de toda a instalação.

2.1.5 Transformador

Os transformadores elétricos são dispositivos que comumente são utilizados para baixar ou elevar tensões e correntes elétricas. Normalmente são equipamentos que possuem dois enrolamentos, um enrolamento primário e outro enrolamento secundário, envolvidos por um núcleo metálico laminado conforme representa a Figura 5.

> Basicamente, um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos, o *primário,* for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido um fluxo alternado cuja amplitude dependerá da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras. Uma porção desse fluxo, denominado *fluxo mútuo,* concatena um segundo enrolamento, o *secundário,* 1 induzindo neste uma tensão cujo valor depende do número de espiras do secundário, assim como da magnitude do fluxo comum e da frequência. Ao se estabelecer uma proporção adequada entre os números de espiras do primário e do secundário, praticamente qualquer *relação de tensões,* ou *relação de transformação,* pode ser obtida (UMANS, 2014, p. 63-64)

Figura 5 — Transformador elétrico



Fonte: (HELERBROCK, O que é um transformador?, 2020)

A passagem de corrente elétrica alternada pelo enrolamento primário forma no seu núcleo um campo magnético variável, como este núcleo está envolvido também pelo enrolamento secundário, esta variação de campo magnético vai gerar uma tensão alternada no enrolamento secundário respeitando a equação (2).

$$\frac{V_P}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \quad (2)$$

Onde:

$V_P =$ Tensão no enrolamento primário;

$V_S =$ Tensão no enrolamento secundário;

$N_P =$ Número de espiras no enrolamento primário;

$N =$ Número de espiras no enrolamento secundário.

2.1.5.1 Transformador de Potencial

Os transformadores de potencial (TP) são equipamentos com o mesmo princípio de funcionamento dos transformadores convencionais, porém é utilizado para permitir que os instrumentos de medição e proteção funcionem adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes e tensões nominais de acordo com a carga nominal e a tensão principal do circuito em que está sendo empregado.

Os transformadores de potencial são comumente utilizados para suprir aparelhos que apresentam elevada impedância, como é o caso de voltímetros, medidores de energia e faturamento e relés de proteção. A sua tensão primária é utilizada pela tensão nominal da tensão que se deseja medir, e a sua tensão secundária padronizada em 115Vca ou $115/\sqrt{3}$ (MAMEDE, 2013).

2.1.5.2 Transformador de Corrente

Os transformadores de corrente (TC) em sua forma mais simples, possui um primário, geralmente de uma barra ou algumas poucas espira, e um secundário com muitas espiras, onde na maioria dos casos, sua corrente a ser medida em regime nominal de projeto, é transformada para 5A, por este motivo os instrumentos e relés de medição são dimensionados em tamanhos reduzidos devido ao baixo valor de leitura de corrente secundária.

“A relação de transformação das correntes primárias e secundárias é inversamente proporcional à relação entre o número de espiras dos enrolamentos primários e secundários” (MAMEDE, 2013).

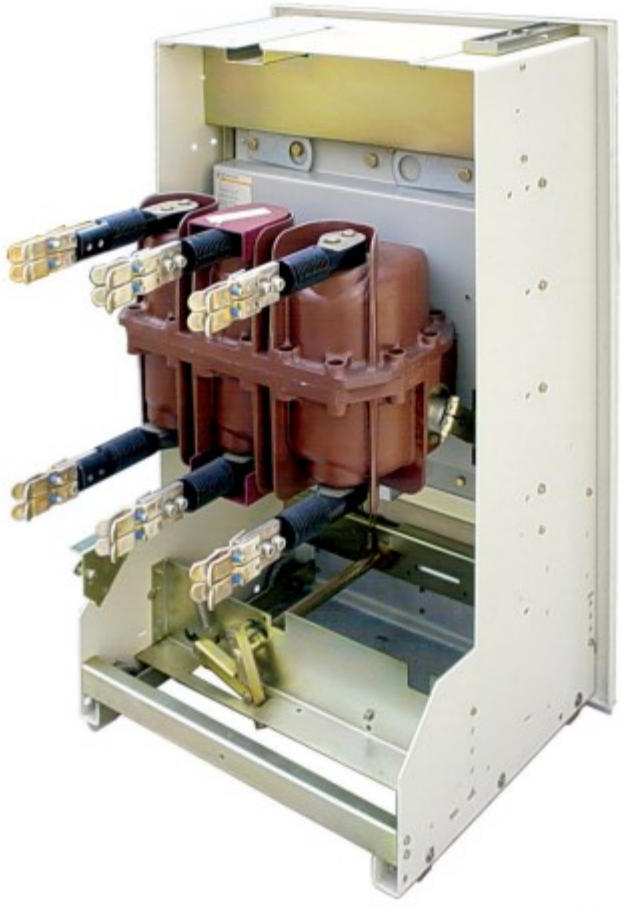
2.1.6 Disjuntor Trifásico

O disjuntor que está inserido na área industrial, mais especificamente, na parte de distribuição e sub-distribuição, são disjuntores trifásico de alta capacidade de segregação da corrente durante uma sobrecarga, curto circuito ou qualquer outra falta que tenha sido destinado no circuito a ser protegido.

Estes dispositivos podem ser utilizados como elementos de interrupção de falha, assim como elemento de manobra.

O disjuntor conforme representa a Figura 6 é o elemento que vai atuar para a interrupção da falta, então tem que ter uma alta confiabilidade e seu dimensionamento deve ser feito para as condições mais extremas de um sistema de potência. Entende-se também que este equipamento é constituído de vários outros componentes, como fiação, bornes, relés auxiliares, partes mecânicas fixas e móveis, que no seu conjunto propiciam a sua operação

Figura 6 — Disjuntor de média Tensão



Fonte: (ABRAMAN, 2006)

2.1.7 Barramento

Um barramento, comumente falando, são barras geralmente de cobre, porém podem ser de outros materiais condutores como o alumínio, que tem como função conectar tanto os circuitos que servirão como alimentadores, como suas próprias cargas, como motores por exemplo.

Um barramento principal de subestação agrega uma grande quantidade e capacidade de potência e diversos ramais de alimentação para as cargas elétricas, tornando assim um elemento de grande importância e confiabilidade do sistema. Assim uma proteção bem dimensionada deve garantir que somente defeitos internos ao barramento possam afetar a sua continuidade operacional e as demais falhas provenientes dos equipamentos conectados a este barramento sejam eliminadas coordenadamente para separar a parte defeituosa (Mamede, 2013).

2.1.8 Cubículo

Cubículos são equipamentos destinados a abrigar/armazenar equipamentos elétricos, como disjuntores, seccionadoras, barramento, relés de lógica, reles de proteção, entre outros. São fabricados geralmente de materiais metálicos de alto desempenho que possam suportar falhas elétricas, e proteger contra animais ou pessoas que possam acessar acidentalmente cabos ou barras elétricas energizadas.

Um serviço auxiliar de uma usina termelétrica por exemplo, utiliza diversos cubículos em sequência para formar um barramento onde cargas elétricas e subdistribuidores serão conectados a um barramento principal, como mostra a Figura 7.

Figura 7 — Cubículos formando um barramento de distribuição.

Fonte: (WEG, 2020)

2.2 PROTEÇÃO ELÉTRICA

A parte da engenharia elétrica no que diz respeito a proteção elétrica visa evitar danos a máquinas e equipamentos que possam por ventura sofrer algum desgaste, falha humana, fadiga de material ou má formação do mesmo quando da sua utilização, assim como estabelecer o fornecimento ininterrupto de energia e seu rápido reestabelecimento no caso da identificação de alguma falta.

Será abordado alguns itens mínimos que segundo Mamede, se faz necessário para um sistema de proteção.

2.2.1 Seletividade

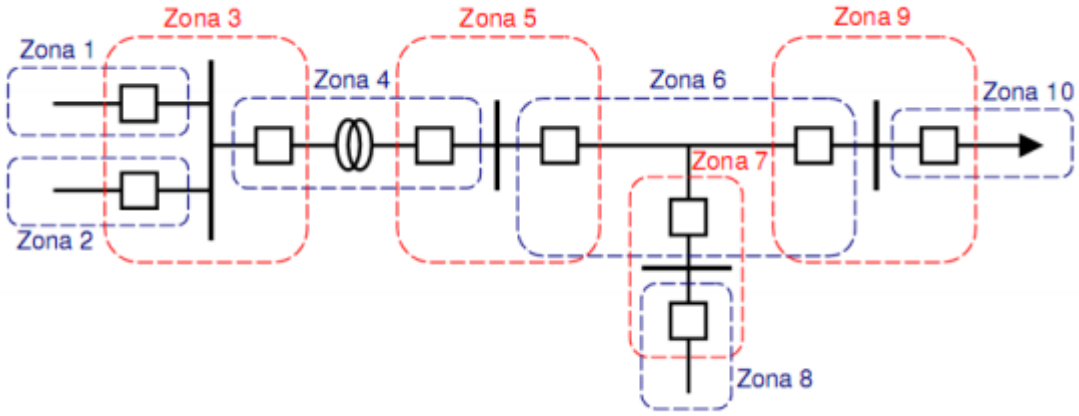
Esta técnica é utilizada para quando da detecção da falta, seja ela por sobrecorrente, falha a terra, ou qualquer outro método de detecção, o dispositivo de proteção mais próximo venha a detectar e agir, causando assim somente a separação do circuito com defeito do restante, evitando uma desenergizarão de um circuito sem defeitos.

2.2.2 Zonas de proteção

A zona de proteção é o trecho em que um dispositivo faz a proteção elétrica, como mostra na Figura 8.

Quando da ocorrência de um defeito, o elemento mais próximo de onde ocorre a falta tem que ter a capacidade de definir se é uma ocorrência interna ou externa dentro de seus limites. Se esta ocorrência está nos limites da sua zona protegida o elemento deve identificar, atuar, e comandar a abertura do disjuntor, no tempo em que foi definido através de um estudo de proteção. Porém se a ocorrência está fora da sua zona de proteção, o mesmo não pode se sensibilizar, ou se a ocorrência disto, deve ser bloqueado o seu sistema de proteção (MAMEDE, 2013).

Figura 8 — Zonas de proteção



Fonte: (SILVA, 2008)

2.2.3 Velocidade

Quando da definição do tempo de atuação pelo cálculo de proteção elétrica na sua zona de proteção, a velocidade de atuação deve ser a menor possível a fim de proporcionar as seguintes condições favoráveis:

- Reduzir ou eliminar os danos no sistema que está sendo protegido;
- Reduzir o tempo de afundamento da tensão durante uma ocorrência;
- Permitir a ressincronização dos motores. (MAMEDE, 2013)

2.2.4 Sensibilidade

Conforme Memede é a capacidade em que um elemento de proteção reconhecer com precisão a faixa e os valores indicados para a sua operação e não operação.

Para avaliar numericamente o nível de sensibilidade de um elemento de proteção, deve-se aplicar a equação (3) e os valores de N para que a sensibilidade esteja adequada deve ser $1{,}5 < N_s < 2$.

$$N_s = \frac{I_{ccmi}}{I_{ac}} \tag{3}$$

Onde:

I_{ccmi} = Corrente de curto-circuito em seu valor máximo, tomado no ponto mais extremo da zona de proteção, considerando a condição de geração mínima;

I_{ac} = Corrente de acionamento do elemento de proteção, isto é, o valor mínimo da corrente capaz de acionar o referido elemento de proteção.

2.2.5 Confiabilidade

É a propriedade de um elemento de proteção elétrica, atuar quando da sua necessidade dentro das suas funções que foram designadas.

2.2.6 Automação

É a propriedade que um elemento opera de forma automaticamente quando da sua necessidade através de suas medições elétricas, e sem o retorno por interferência humana, quando se programado para isso, retorna a sua posição depois que é cessada a ocorrência de falta por ele registrada.

“Existem também outras propriedades fundamentais para o bom desempenho dos dispositivos de proteção:”

- Os relés não devem ser sensibilizados por sobrecargas e sobretensões momentâneas;

- Os relés não devem ser sensibilizados pelas oscilações de corrente, tensão e frequência ocorridas naturalmente do sistema, desde que consideradas normais pelo projeto;
- Os relés devem ser dotados de bobinas e circuitos de pequeno consumo de energia;
- Os relés devem ter suas características inalteradas para diferentes configurações do sistema elétrico. (MAMEDE, 2013)

2.3 RELÉ DE PROTEÇÃO

Os relés de proteção são dispositivos elétricos mais importantes em um sistema de proteção, pois ficam ligados o tempo todo para quando da necessidade de atuação sua rápida atuação para qualquer falha ou falta dentro do sistema protegido. Este dispositivo por exemplo que comanda a abertura de um disjuntor na sua sensibilização, conforme sua característica construtiva ou programação feita, analisando suas grandezas medidas, como tensão, corrente, frequência, ângulo de fase, etc. Comumente os relés de proteção têm entradas para medição de corrente e tensão da zona a ser protegida.

Existe uma gama muito grande de relés de proteção e dispositivos que oferecem proteção de muitas formas, como proteção por sobrecorrente, sobrecarga, sobretensão, entre outras funcionalidades.

Conforme Memede os relés de proteção vêm evoluindo ao longo dos tempos, começando pelo relé eletromecânico, confeccionado em meados do ano 1900, a qualidade e complexibilidade dos dispositivos eletromecânicos gerada durante sua evolução com o passar dos anos, permitiu uma confiabilidade e sofisticação maior.

O autor ainda aborda que conforme o surgimento das tecnologias com semicondutores por volta de 1930 surgiram os primeiros relés a base de componentes eletrônicos, cujo o qual não foi aceito imediatamente pelo mercado e nem por parte dos profissionais de proteção pois os relés eletromecânicos já eram fabricados com tecnologia de alta qualidade, competitividade e aceitação.

Na década de 1980 com o avanço acelerado da microeletrônica começaram a surgir os primeiros relés utilizando a tecnologia digital, porém como os outros dispositivos eletrônicos tiveram bastante falhas ao decorrer da sua história , esta nova tecnologia também não foi bem aceita pelo mercado, pois os relés eletromecânicos na variação de temperatura e ambientes

agressivos apresentava confiabilidade na sua operação, já no caso dos eletrônicos e depois os digitais apresentavam falhas (MAMEDE, 2013).

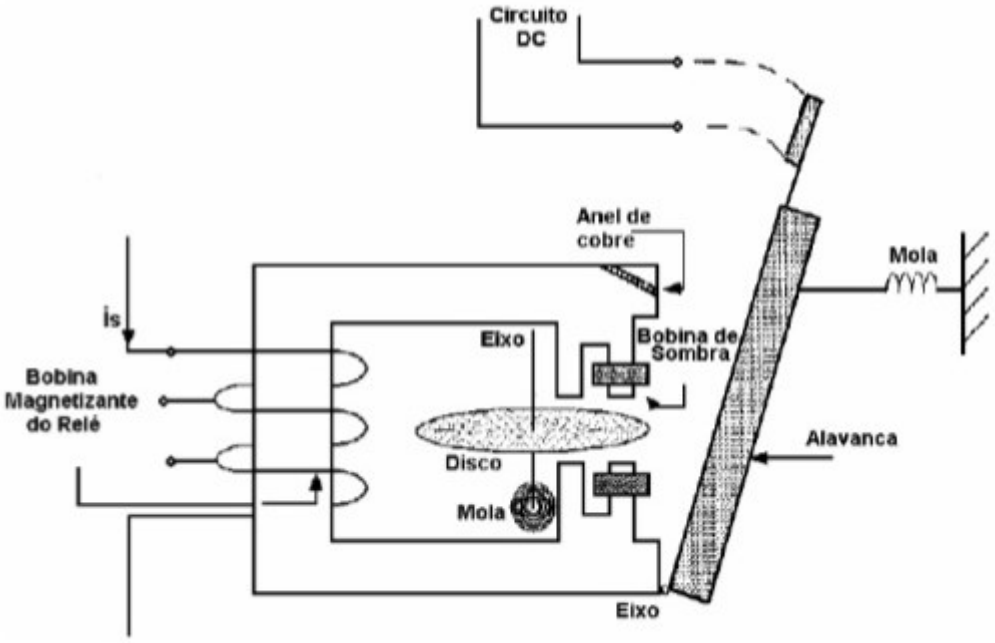
A partir do surgimento dos relés digitais, assim como todo o mundo, os software e dispositivos foram ficando mais modernos e mais precisos, incorporando funções que antes se faziam com muitos equipamentos, como por exemplo, antigamente para fazer uma lógica elétrica se necessitava de muitos botões, contatores, temporizados, etc. hoje em dia apenas um relé digital faz tudo isso e se consegue alterar e reeditar quantas vezes for necessário.

2.3.1 Relé Eletromecânico

Assim como dispositivos elétricos como contatores, os relés eletromecânicos eram formados por uma parte totalmente mecânica e contatos elétricos que comandavam a abertura do circuito de força, normalmente por intermédio de um disjuntor.

Conforme mostra a Figura 9, o princípio de funcionamento era onde a corrente que passava na carga, sensibilizava toda a parte mecânica através do fluxo magnético contido no circuito, fazendo assim acionar a alavanca que por sua vez fechava um contato.

Figura 9 — Princípio de funcionamento de um relé eletromecânico.



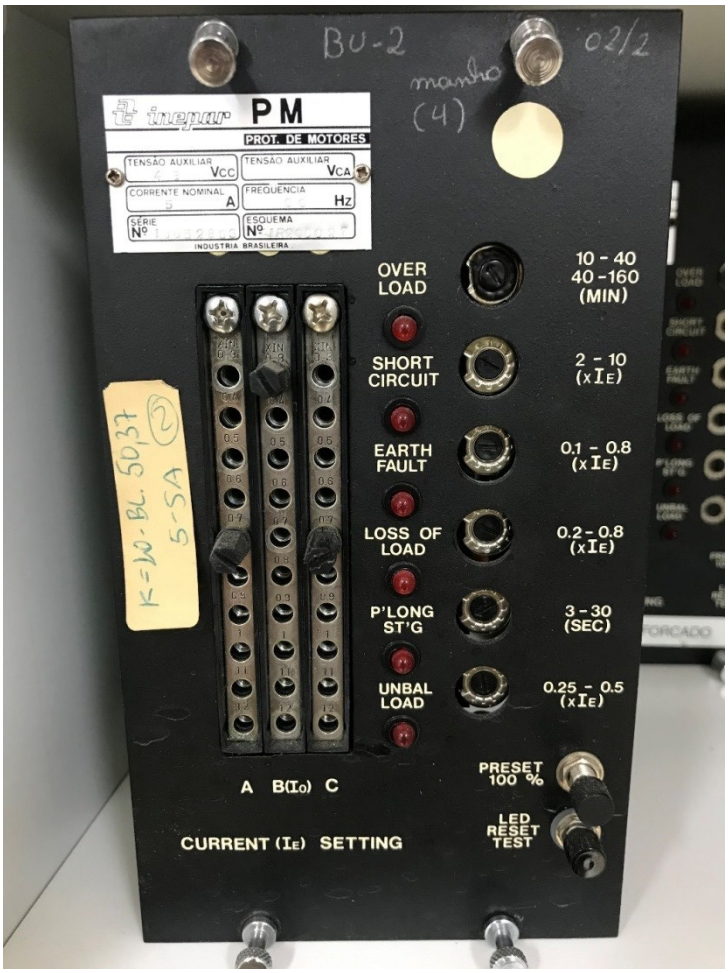
Fonte: (LIMA, 2016)

2.3.2 Relê Eletrônico

Os relés eletrônicos, conforme mostra a Figura 10, podem ser chamados também de relés estáticos, são de dimensões menores que os relés eletromecânicos, permitindo assim, montagem de painéis menores, são constituídos de circuitos integrados dedicado a cada função de proteção e essas regulagens se dão através de dial fixados na sua parte frontal. A sinalização da atuação de alguma proteção pode ser observado pelos *LED's* frontais normalmente nas cores vermelhas ou verdes (MAMEDE, 2013).

Os relés eletrônicos desempenham as mesmas funções que os relés eletromecânicos, porém através de circuitos integrados e não de componentes mecânicos que funcionam a base de princípios magnéticos.

Figura 10 — Relé Eletrônico



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

2.3.3 Relé Digital

Os relés digitais modernos, conforme representa a Figura 11, também conhecido no mercado como *Intelligent Eletronic Devices* (IED) vem substituindo os relés eletromecânicos e digitais que já não são mais usuais devido a grande função que os relés digitais contém, pois além das funções de proteção, os dispositivos fazem processos de automação, como lógicas e comunicações externas e entre os dispositivos.

Figura 11 — Relé Digital

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Sua tecnologia se dá em um microprocessador central, e suas entradas de tensão e corrente ou qualquer outra variável analógica são convertidas da forma analógica para a forma digital através de conversores, então essa informação é processada pelo microprocessador e quando necessário ou programado atua em saídas digitais e até mesmo em seu display para informação ao usuário.

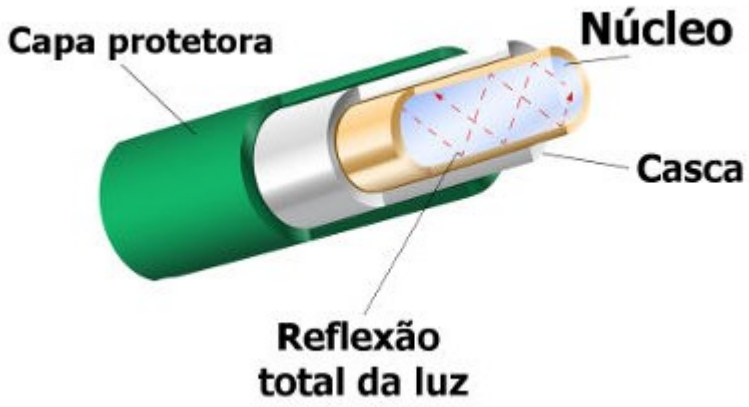
Um grande diferencial dos relés digitais são suas interfaces através de software's onde se faz todo o seu programa, cujo qual você pode mudar a hora que for conveniente, tanto dados de proteção quanto de automação.

> Ao contrário dos relés eletromecânicos de indução e dos relés eletrônicos, os relés digitais, devido ao fato de operarem segundo uma programação inteligente e poderosa, têm a capacidade de processar digitalmente os valores medidos do sistema, tais como tensão, corrente, frequência etc., e de realizar operações lógicas e aritméticas. (MAMEDE, 2013, p. 40).

2.4 FIBRA ÓPTICA

As fibras ópticas são elementos constituídos de um filamento de material flexível podendo ser fibra de vidro ou plástico, mostrado na Figura12, onde este filamento é revestido por uma casca e depois por uma capa ou não, dependendo da sua aplicação. Este filamento de plástico ou vidro é sensível a luz, ou seja, se a luz for incidida diretamente nele, esta luz irá se propagar ao longe de todo o seu filamento, podendo ser recebida na sua extremidade.

Figura 12 — Composição da fibra óptica



Fonte: (JUNIOR, 2020)

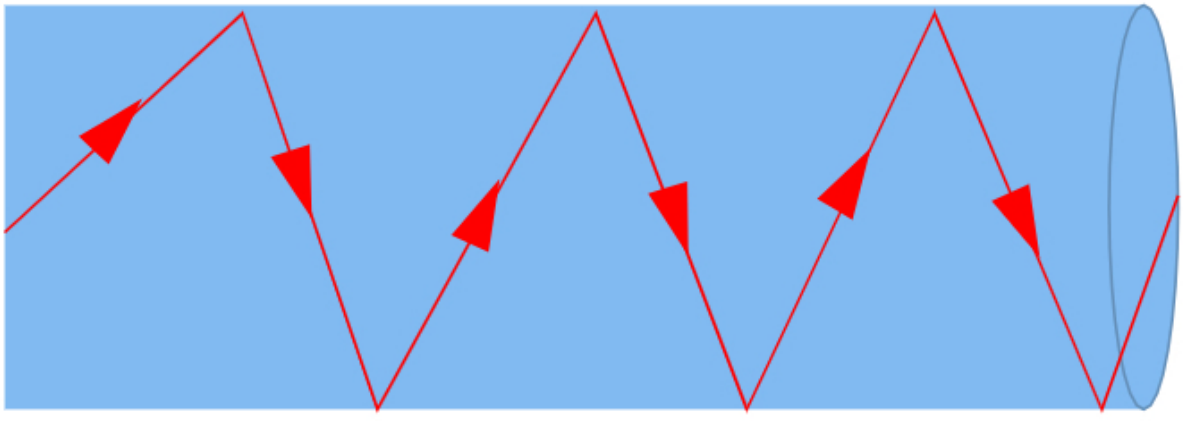
A fibra óptica pode ser empregada em vários ramos, a sua maior utilização é nas telecomunicações, onde se destaca por sua imunidade ao ruído externo e velocidade de transmissão, porém também pode ser empregada na medicina, onde se faz o uso para diagnóstico de imagem como é o caso da endoscopia, onde é inserido no paciente uma fibra óptica especial juntamente com uma fonte de luz, assim são proporcionadas imagens para detectar o estado interno do órgão.

Neste presente trabalho, a fibra óptica será utilizada para a detecção de luz originada por um curto circuito, essa luz que será captada pela fibra óptica é transmitida até um dispositivo de proteção, no caso um relé digital, para juntamente com a elevação de corrente ser detectado um curto circuito em um barramento, tal fibra é mostrada na Figura 12.

2.4.1 Transmissão da Luz

Como foi mencionado, a fibra óptica faz a transmissão da luz, para que ocorra esta transmissão, esta luz necessita ser emitida até o interior da fibra óptica com um ângulo mínimo de incidência que se chama de ângulo limite ou também conhecido como ângulo crítico, este ângulo permite sucessivas reflexões internas no interior da fibra sem que seja dispersada do seu núcleo, conforme mostra a Figura 13 (HELERBROCK, 2020).

Figura 13 — Transmissão da luz na fibra óptica



Fonte: (HELERBROCK, Fibra Optica, 2020)

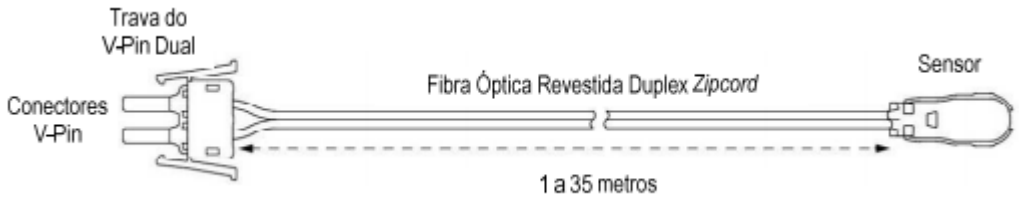
2.4.2 Tipos de Captação de luz para detecção de arco

Existe duas maneiras para a captação da luz, em um cubículo de média tensão, através de uma fibra pontual, ou de uma fibra regional. Estas fibras, se for pego como exemplo de aplicação os relés da *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), o diâmetro da fibra que vai ser propagada a luz é 1000µm, e o comprimento de onda através da mesma é de 640nm.

2.4.2.1 Fibra Pontual

A fibra pontual é uma fibra óptica, toda revestida por uma camada *zipcord duplex* que envolve seu corpo ao longo do barramento tendo apenas uma parte descoberta para a captura da luz em uma extremidade, e na outra extremidade é colocado um conector que vai acoplado ao relé para chegar esta informação de luz. Tudo isto é representado na Figura 14 (SEL, 2011).

Figura 14 — Fibra óptica pontual

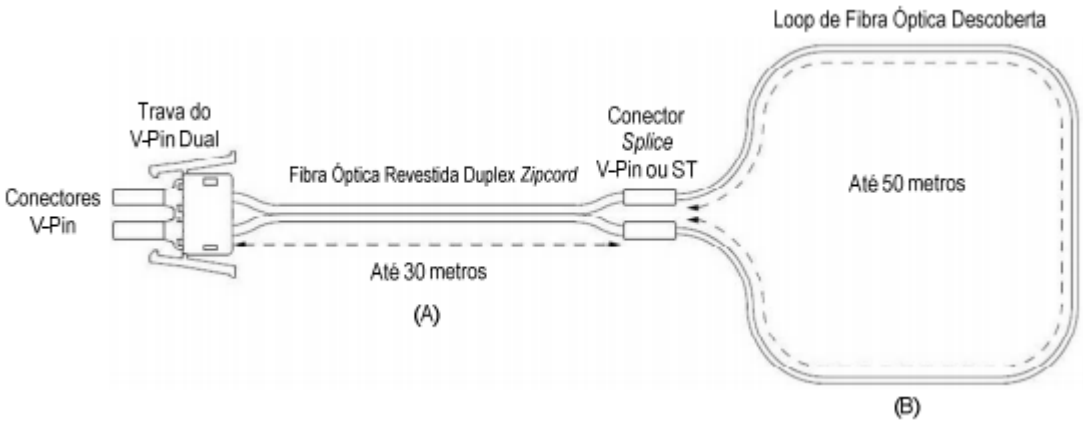


Fonte: (SEL, 2011)

2.4.2.2 Fibra Regional

A fibra óptica regional tem o mesmo princípio da fibra óptica pontual, porém a sua diferença esta no ponto de medição de luz, onde na fibra pontual é só na sua extremidade, na regional, uma parte do corpo é coberta pela mesma camada, onde não se quer a incidência de luz, e outra parte descoberta, onde se deseja monitorar a incidência de luz, conforme representa a Figura 15 (SEL, 2011).

Figura 15 — Fibra óptica regional



Fonte: (SEL, 2011)

2.5 CURTO CIRCUITO

Curtos circuitos são falhas para a terra, entre fase e terra e também somente entre fases de um sistema que se encontra inicialmente energizado, criando assim um caminho de baixa impedância da fonte para a terra ou entre as próprias fases. Estas falhas podem ser intencionais, criminais ou provocadas por uma baixa isolação de algum componente elétrico ou até mesmo por conta de alguma árvore que venha a encostar em uma rede energizada com condutores expostos.

Estas falhas normalmente são muito severas e causam um estrago tanto pessoal como patrimonial muito grande em um curto espaço de tempo, por conta disso um curto circuito deve ser cessado, por algum tipo de proteção vinculado a um disjuntor, o mais breve possível.

> As perturbações mais comuns e também as mais severas são os curtos circuitos, que ocorrem em decorrência da ruptura do isolamento entre as fases ou entre fase e terra. A magnitude da corrente de curto-circuito depende de vários fatores, tais como: tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, topologia da rede elétrica, tipo de aterramento do neutro dos equipamentos etc. (SATO, 2015, p. 82).

Os curtos-circuitos podem ser de falha trifásico, bifásico, bifásico-terra ou então fase terra. Os trifásicos, apesar de ocorrerem com menor frequência, 5% dos totais das faltas, é o que mais são analisados por ser considerado o mais severo. Porém, é possível o curto-circuito monofásico em algumas situações seja maior do que a corrente de um curto trifásico. O valor da corrente bifásica em relação a trifásica é de cerca de 87%, enquanto o monofásico fica por volta de 25% até 125%. Isto explica o porquê de alguns softwares computacionais referentes a cálculos de curto-circuito considerar somente o trifásico e monofásico. (SATO, 2015)

3 CURTO CIRCUITO

3.1 ETAPAS EM UM CURTO CIRCUITO

Um evento de falha onde ocorre um curto circuito, seja ele monofásico, bifásico ou trifásico, existe algumas etapas ao passar do tempo, se não for sanada a falta, onde ocorre alguns efeitos térmicos no local de ocorrência, podendo levar os equipamentos que estão a sua volta, a perda parcial ou total.

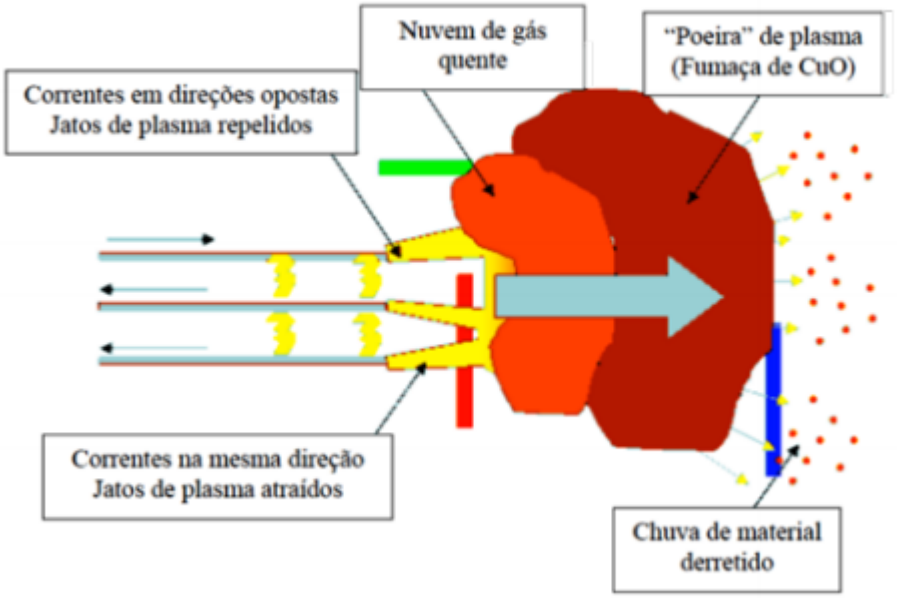
Estes eventos de curto circuito se dão pela característica de passagem da corrente elétrica por um meio não condutor, que se encontrava antes da falta, isolando as partes ativas de um elemento energizado eletricamente, seja este elemento, um barramento, um disjuntor, cabo, fios etc.

Estes tipos de falhas, quando ocorrem, acabando originando explosões por exemplo, onde por consequência destas explosões, há uma onda de pressão que podem representar risco a trabalhadores que estejam no local e equipamentos próximos.

“O comportamento de um arco em um sistema trifásico é tido como caótico, pois acaba envolvendo uma rápida e irregular mudança da geometria do arco devido a convecção, aos jatos de plasma e às forças eletromagnéticas.” (SILVA QUEIROZ & SENGER, 2012)

Na Figura 16 pode-se observar que forças magnéticas de atração e repulsão são criadas pelas três fases, onde através disto são movimentados de forma intensa os jatos de plasma, que, por sua vez, alimentam uma nuvem de plasma. (SILVA QUEIROZ & SENGER, 2012).

Figura 16 — Nuvem de plasma gerado pelo arco elétrico



Fonte: (SILVA QUEIROZ & SENGER, 2012).

O arco elétrico controlado é utilizado também como uma fonte de calor, como em fornos industriais ou máquinas de solda. As temperaturas de um arco elétrico podem ser extremamente altas, onde há relatos de temperatura de 20.000K. Um investigador relata temperatura de 34.000K e tipos especiais de arco elétrico podem alcançar a temperatura de até 50.000K. (LEE, 1982).

Como estas temperaturas são muito elevadas, não existe material conhecido na terra que possa suportar tal temperatura sem que ocorra um desprendimento e vaporização dos mesmos.

Os vapores metálicos, que se desprendem durante um arco elétrico provocado por um curto circuito, podem ser tóxicos, além da projeção de material fundido, luz extremamente intensa e significativa onda de pressão. Esta onda de pressão é originada pela alta temperatura originada pelo arco elétrico por conta da expansão do ar e dos metais existentes no trajeto do arco, o cobre por exemplo sofre uma expansão de 67.000 vezes quando da mudança de sólido para vapor. Ondas de pressão elevadas podem ocasionar o rompimento do tímpano e causar danos nos pulmões dos trabalhadores próximos ao evento ocorrido. O material sólido desprendido nesta ocasião pode chegar a velocidade de 1.200km/h, suficientemente para estas partículas penetrarem um corpo humano ou atravessarem barreiras frágeis. (SILVA QUEIROZ & SENGER, 2012).

3.2 CONSEQUÊNCIAS DE UM CURTO CIRCUITO

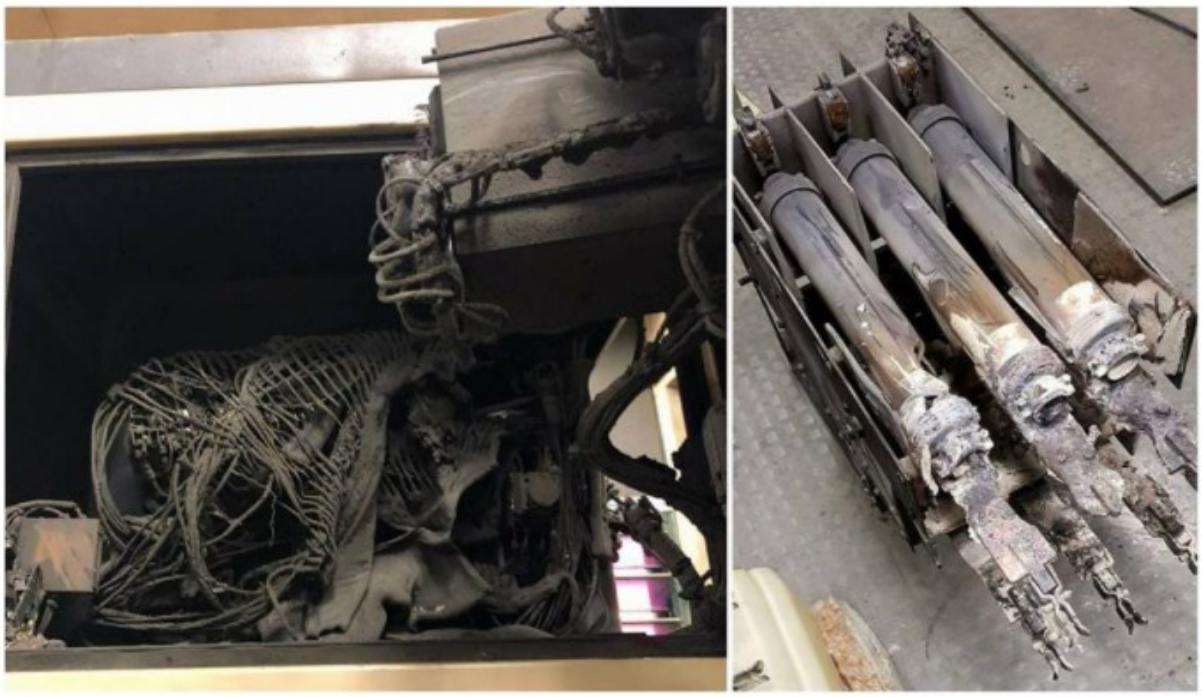
Eventos de arco elétrico em decorrência de um curto circuito, podem ser catastróficos, tanto material como pessoal. Como citado anteriormente, os efeitos térmicos, ondas de pressão e liberação de material, pode levar uma pessoa a ter danos na sua saúde física e mental, podendo, em casos mais graves, levar até a morte.

Outro tipo de prejuízo é o dano material, onde em um evento destes, pode ocorrer a perda do painel elétrico, derretimento de fios e cabos, assim como de barramentos de alimentação. Se o curto circuito ocorrer em um alimentador geral, pode implicar na perda de produção da respectiva instalação, por indisponibilizar o equipamento durante o reparo do mesmo.

Um reparo de um curto circuito pode levar algumas horas, ou até mesmo semanas, meses, dependendo da gravidade de cada situação. Então além da perda de tempo por indisponibilidade da planta ou do equipamento, ainda existe o prejuízo com material a ser reparado e a mão de obra especializada para troca e limpeza do entorno do sinistro.

Na Figura 17 pode-se observar as consequências causadas por um curto circuito.

Figura 17 — Consequência de um curto circuito



Fonte: (TRIBUNA DE JUNDIAI, 2019)

Na Figura 18 mostra como um arco elétrico pode atingir um trabalhador que esteja próximo ao evento, ou até mesmo trabalhando no local do acontecimento de um curto circuito.

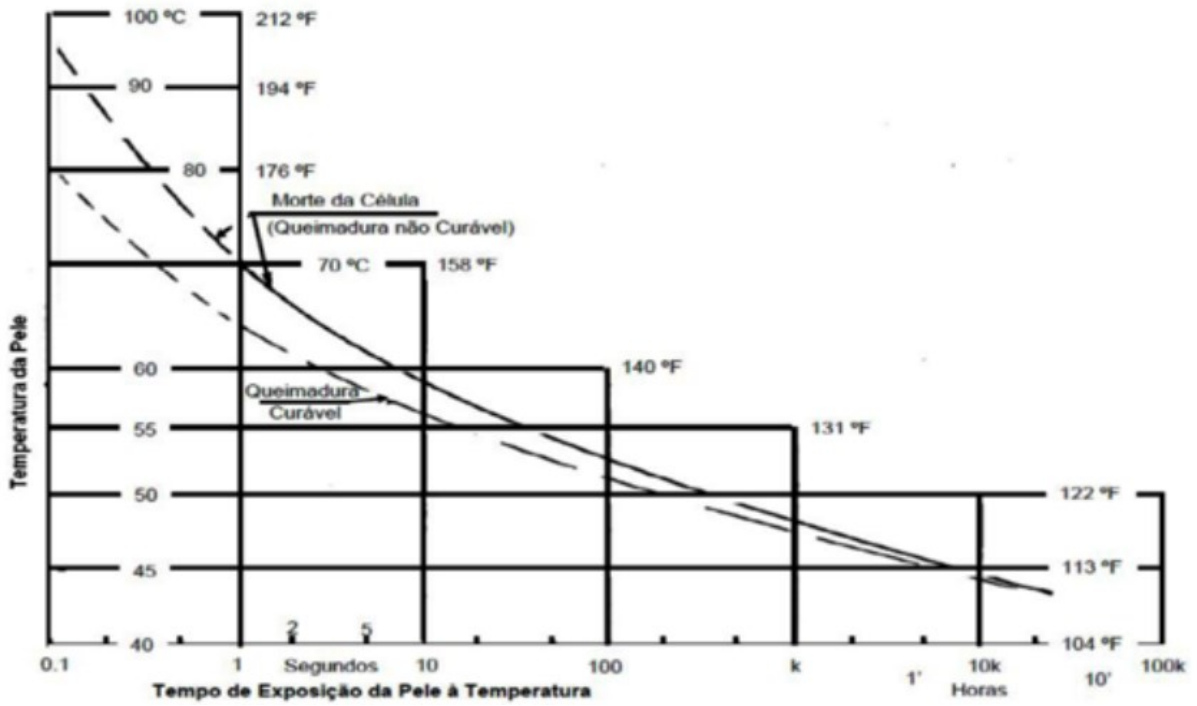
Figura 18 — Curto circuito sobre um trabalhador.

Fonte: (IDEAL WORK, 2020)

O corpo humano deve ficar apenas em uma curta faixa de temperatura, abaixo de 36,5ºC se faz uso de vestimentas para aquecimento do corpo, e ligeiramente acima disto o corpo consegue corrigir através da transpiração. Artz afirma que a temperatura corporal de 44ºC o mecanismo de equilíbrio corporal começa a se decompor em cerca de 6h, ocorrendo assim danos as células. Entre 44ºC e 51ºC a taxa de destruição das células dobra, com uma taxa de aumento de 1ºC, e acima de 51ºC a taxa de destruição é extremamente alta. Com a temperatura corporal de 70ºC, em apenas 1 segundo é capaz de haver a destruição total da célula, na Figura 19, segundo Artz, pode-se verificar a relação tempo-temperatura de uma

queimadura curável. A extrapolação dos dados disponíveis para tempo inferiores a 1 segundo indica que qualquer temperatura acima de 96ºC por mais de 0,1 segundos, causará queimaduras incuráveis. (LEE, 1982).

Figura 19 — Relação tempo temperatura que o tecido humano suporta.



Fonte: (SILVA QUEIROZ & SENGER, 2012)

3.3 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

3.3.1 Componentes Simétricas

Em um circuito de potência, na qual trabalhamos com tensões e correntes trifásicas senoidais, cuja as quais quando estão desequilibradas, para facilidade dos cálculos, se faz necessário a aplicação de uma transformação de coordenadas $[V_{A\,B\,C}]$, para um novo sistema de coordenadas $[V_{0\,1\,2}]$. Onde essas novas coordenadas são chamadas de componentes simétricas, tal operação matemática é conhecida como mudança da base de um sistema. (ZANETTA JÚNIOR, 2006).

Aplicando este método matemático, é transformado um circuito de potência desequilibrado, em três sistema equilibrados, assim, se obtém as componentes de sequência positiva (+), negativa (-) e zero (0). (SATO, 2015).

A partir desta ideologia, se obtém as equações (3), (4) e (5) através da aplicação das componentes simétricas.

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0} \quad (3)$$

$$V_B = V_{B1} + V_{B2} + V_{B0} \quad (4)$$

$$V_C = V_{C1} + V_{C2} + V_{C0} \quad (5)$$

Onde:

V_A = Tensão na fase A;

V_B = Tensão na fase B;

V_C = Tensão na fase C;

V_{A1} = Componente simétrica de sequência positiva da fase A;

V_{A2} = Componente simétrica de sequência negativa da fase A;

V_{A0} = Componente simétrica de sequência zero da fase A;

V_{B1} = Componente simétrica de sequência positiva da fase B;

V_{B2} = Componente simétrica de sequência negativa da fase B;

V_{B0} = Componente simétrica de sequência zero da fase B;

V_{C1} = Componente simétrica de sequência positiva da fase C;

V_{C2} = Componente simétrica de sequência negativa da fase C;

V_{C0} = Componente simétrica de sequência zero da fase C.

Como este sistema apresenta nove incógnitas, existe infinitas soluções. Para reduzir o número de incógnitas para três, se utiliza o operador de fase “a”, o qual é análogo ao operador de “j” dos números complexos, porém o “a” imprime uma rotação de 120º, a² por exemplo seria $1\angle 240º$, originando assim as equações (6), (7) e (8) de equivalência. (SATO, 2015).

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0} \quad (6)$$

$$V_B = a^2.V_{A1} + a.V_{A2} + V_{A0} \quad (7)$$

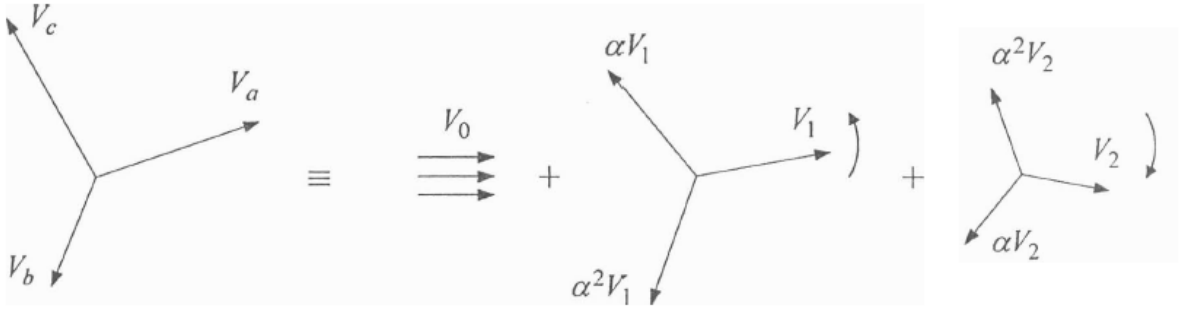
$$V_C = a.V_{A1} + a^2.V_{A2} + V_{A0} \quad (8)$$

As componentes simétricas são referidas a base A, e colocando-a na forma matricial, tem-se a equação (9):

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{A2} \\ V_{A0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Na Figura 20, é representado esta decomposição de três fases desequilibradas, em três elementos de sequência positiva, negativa e zero.

Figura 20 — Decomposição de um sistema desequilibrado.



Fonte: (ZANETTA JÚNIOR, 2006).

3.3.2 Circulação de corrente entre o transformador

Em um curto circuito, existe a contribuição de diversos sistemas, e estes sistemas comumente são ligados por transformadores, por serem de tensões diferentes. E como existe a contribuição destas partes, deve-se levar em consideração os esquemas de ligação dos transformadores, para assim, realizar o cálculo de corrente de curto circuito utilizando as componentes simétricas corretas.

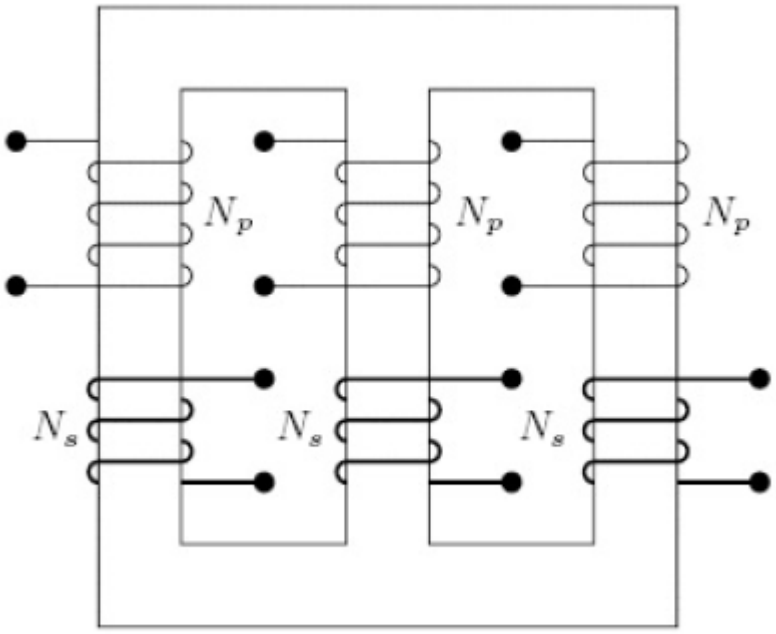
A impedância de sequência positiva e negativa de um transformador, é simplesmente a mesmas, pois pode-se energizar um transformador tanto de um lado, quanto do outro, ou seja, não há diferença se for energizado por sequência positiva ou negativa. Já a impedância de sequência zero depende de outros dois fatores, que são o esquema de ligação do transformador e o tipo de núcleo do transformador. (SATO, 2015).

3.3.2.1 Tipos de enrolamentos de transformadores

3.3.2.1.1 Núcleo Core-Type

Também chamados de núcleo envolvido, são transformadores de fabricação mais fácil e econômica, porém, de menor eficiência. Seu enrolamento se mostra na Figura 21.

Figura 21 — Enrolamento de núcleo envolvido

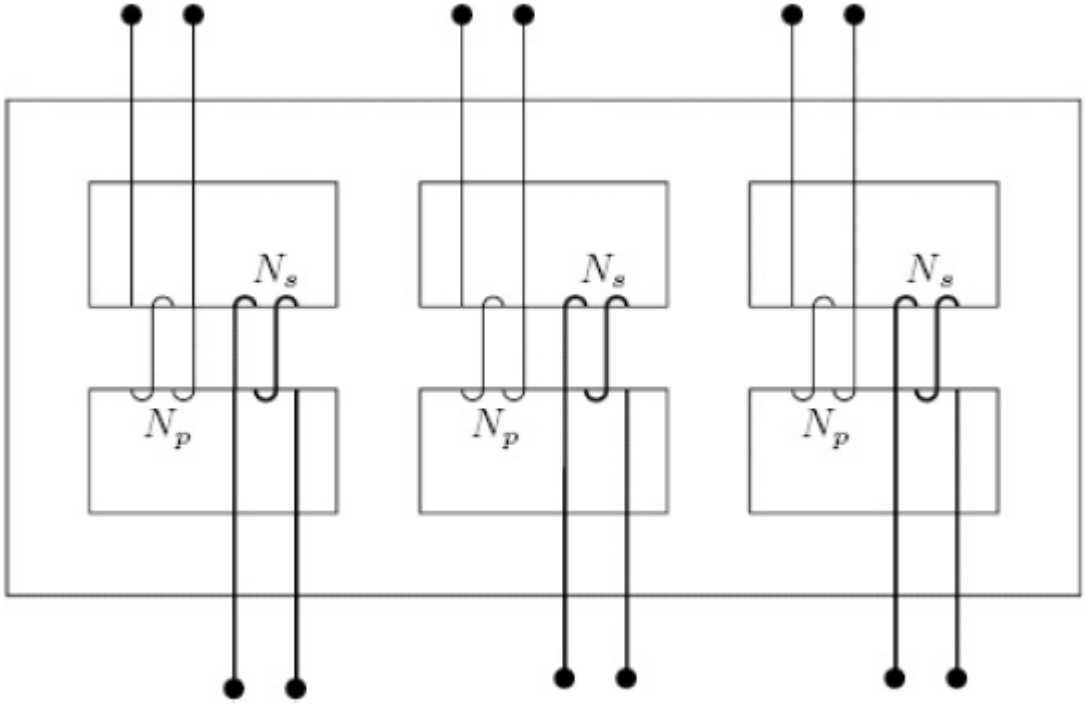


Fonte: (SATO, 2015)

3.3.2.1.2 Núcleo shlell-type

Chamados também de transformadores de núcleo envolvente, requerem uma tecnologia em sua fabricação mais avançada, com isso um custo maior em relação ao de núcleo envolvido. Por possuir uma concatenação maior entre as bobinas, ele apresenta uma reatância de dispersão menor. A representação do seu enrolamento se mostra na Figura 22.

Figura 22 — Enrolamento de núcleo envolvente



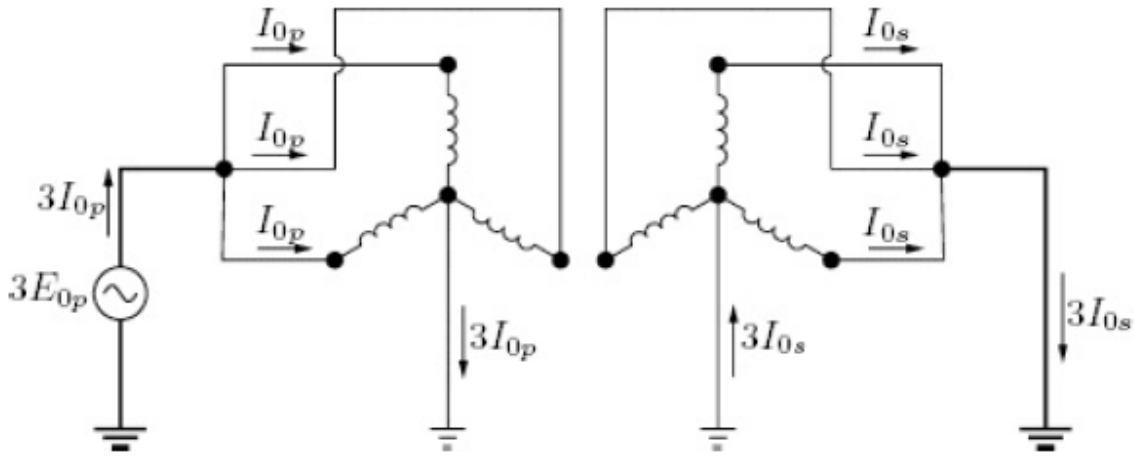
Fonte: (SATO, 2015)

3.3.2.2 Esquema de ligação dos transformadores e suas impedâncias de sequência zero

3.3.2.2.1 Transformador trifásico ligados em Y-Y com os neutros aterrados

A Figura 23, mostra como este tipo de ligação é feita, e a impedância de sequência zero se mostra na Equação (10). (SATO, 2015).

Figura 23 — Ligação Y-Y com os neutros aterrados



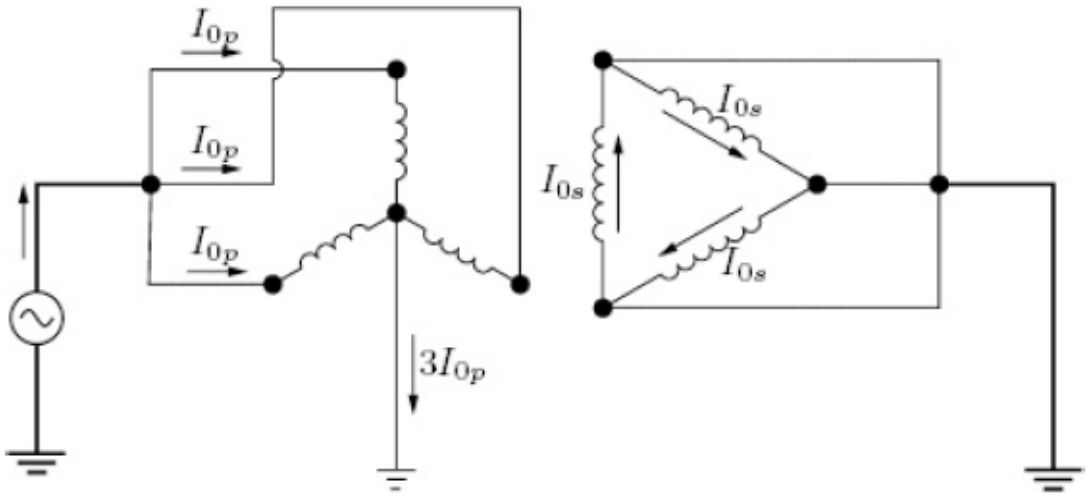
Fonte: (SATO, 2015)

$$Z_0 = \frac{E_{0p}}{I_{0p}} = Z_+ = Z_- \tag{10}$$

3.3.2.2.2 Transformador trifásico ligados em Y-Δ com o neutro aterrado

Na Figura 24, mostra-se o tipo de enrolamento Y-Δ. No caso do Δ, as correntes de sequência zero induzidas nos enrolamentos, ficam confinadas dentro do Δ. Então neste tipo de ligação, existem duas impedâncias de sequência zero, dependendo do lado em que as correntes de sequência zero estão vindo. No lado de ligação Y, a impedância de sequência zero é dado pela mesma Equação (10). (SATO, 2015)

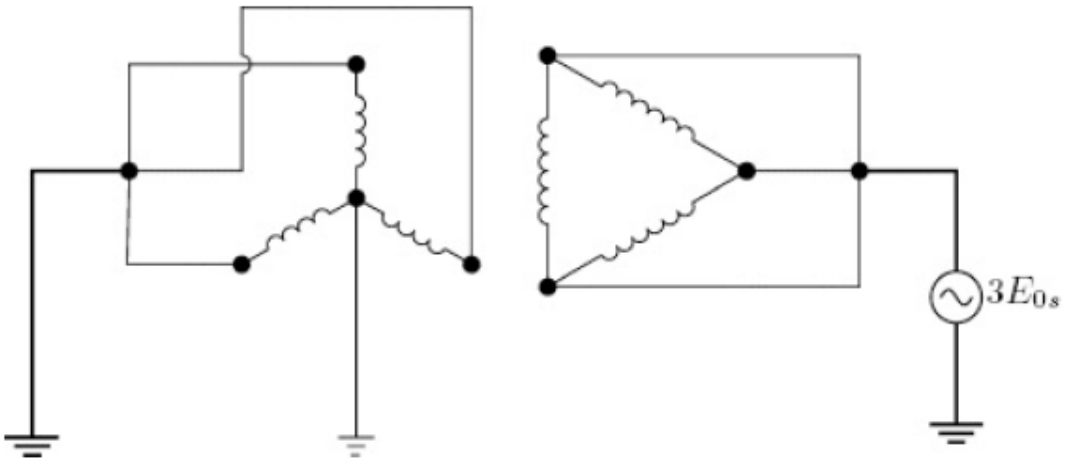
Figura 24 — Ligação Y-Δ



Fonte: (SATO, 2015)

Se aplicado a fonte no lado Δ, como representa a Figura 25, não haverá circulação de corrente. Isto equivale, que no lado Δ a impedância de sequência zero é infinita, pois não há esta circulação de corrente de sequência zero. (SATO, 2015)

Figura 25 — Fonte de tensão aplicada no lado delta.



Fonte: (SATO, 2015)

3.4 SOMA DAS IMPEDÂNCIAS PARA O CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO

Para a determinação de corrente de curto circuito trifásico, se faz uso da equação (11), onde a tensão da fonte é 100% e a impedância equivalente é a soma de todas as impedâncias de sequência positiva até a barra onde ocorre o curto circuito. (Sato, 2015)

$$i_{cc3\emptyset} = \frac{100\%}{Z_{+eq}} \tag{11}$$

Onde:

$i_{cc3\emptyset}$ = corrente de curto circuito trifásico;

Z_{+eq} = impedância de sequência positiva equivalente.

Para encontrar o valor de corrente de curto circuito monofásico, deve-se somar as impedâncias de sequência negativa, positiva e zero, como em uma ligação em série, onde a equação (12) mostra como obter este valor. (SATO, 2015)

$$i_{cc1\emptyset} = \frac{300\%}{Z_{+eq}+Z_{-eq}+Z_{0eq}+3xZ_a} \tag{12}$$

Onde:

$i_{cc3\emptyset}$ = corrente de curto circuito trifásico;

Z_{+eq} = impedância de sequência positiva equivalente.

Z_{-eq} = impedância de sequência negativa equivalente;

Z_{0eq} = impedância de sequência zero equivalente;

Z_a = impedância de aterramento do transformador.

4 ENERGIA INCIDENTE EM UM EVENTO DE CURTO CIRCUITO

Para a determinação do valor de energia incidente, será tomado como referência o guia IEEE 1584-2002, guia esta que determina os valores de energia incidente, assim como a distância segura para os trabalhadores executarem suas atividades, com relação ao nível de tensão e de corrente de curto circuito a que está exposto durante sua atividade.

Os modelos calculados pelo guia IEEE 1584-2002 foram estipulados na medição da energia incidente ocasionada por um arco elétrico sob um conjunto de testes e em trabalho teórico. As distâncias que são a base para as equações sugeridas, baseiam-se na distância de medição do instrumento até o ponto de formação do arco elétrico. Os modelos irão permitir que se calcule a máxima energia incidente estimada e o limite da distância para um arco elétrico. As exposições reais perante um arco elétrico, podem ser maiores e mais severas do que indicada neste modelo. (IEEE-1584, 2002)

O guia da IEEE-1584-2002 é baseado em testes e análises do perigo apresentado pela energia incidente. Outros efeitos como impulsos de pressão, projeção de materiais desprendido durante o evento do curto circuito, respingos de materiais derretidos e elementos tóxicos produzidos não foram considerados. (IEEE-1584, 2002)

4.1 PASSOS ANTES DE REALIZAR O CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE

Pelo método proposto, o guia aborda que são necessárias nove etapas para estimar a energia incidente e determinar os EPI’s necessários.

4.1.1 Coleta de dados da instalação e do sistema

O maior esforço em um estudo de risco de um arco elétrico é a coleta dos dados de campo, mesmo com diagramas unifilares atualizados, curvas de tempo-corrente e estudos de curto circuito em um computador, o estudo de campo irá tomar cerca de metade dos esforços.

Embora os dados necessários que se utiliza para este estudo sejam semelhantes aos coletados para um estudo de curto circuito e dispositivos de proteção e coordenação da planta, vai além disso pois todos os equipamentos de distribuição em baixa tensão, mais seus grandes alimentadores devem ser incluídos.

Começando pela revisão dos diagramas e equipamentos elétricos e seu *layout* com pessoas que estão familiarizadas com a instalação. Os diagramas podem sofrer alterações para mostrar o sistema atual e orientações antes que o estudo de arco elétrico possa começar. O diagrama unifilar deve possuir todo os alimentadores alternativos. (IEEE-1584, 2002)

4.1.2 Determinar os modos de operação do sistema

Conforme IEEE-1584, em um local com sistema de distribuição radial simples, existe apenas um modo de operação, porém em sistema mais complexos, podem existir outros modos, que podem ser:

- Um ou mais alimentadores em serviço;
- Subestação da unidade com um ou dois alimentadores primários;
- Subestação da unidade com dois transformadores com ligação secundária aberta ou fechada;
- Centro de controle de motores (CCM's) com um ou mais alimentadores, um ou os dois energizados;
- Geradores operando em paralelo com a rede elétrica ou em *standby*.

4.1.3 Determinar a corrente de curto circuito sólida

Entrar com os dados coletados em um programa computacional que calcule o nível de curto circuito. Comercialmente existem programas que permitem milhares de operação dos barramentos entre os modos de operação.

É importante incluir todos os cabos, pois errar do lado alto, não aumenta necessariamente a segurança, pode reduzi-lo. As correntes de falta mais baixas persistem por mais tempo do que correntes mais altas, conforme dispositivos de proteção.

A corrente franca de curto circuito foi calculada no capítulo 3 deste trabalho, e irá ser usada a corrente de curto circuito trifásica como exemplo, por ser de maior magnitude em relação as outras. (IEEE-1584, 2002)

4.1.4 Determinar a corrente de arco elétrico

A corrente de falha do arco elétrico no ponto de interesse e a porção dessa corrente passando pelo dispositivo a montante deve ser encontrada.

A corrente de arco elétrico também pode ser calculada. A corrente de arco elétrico será menor que a corrente de curto circuito sólida devido a impedância do arco, especialmente para aplicações com tensão abaixo de 1000V. Para média tensão a corrente de arco elétrico ainda é um pouco menor e deve ser calculada.

Conforme a IEEE 1584-2002 a equação (13), define como deve ser calculada está corrente de arco elétrico para tensões abaixo de 1000V, e a equação (14) para tensões acima de 1000V.

$$\log(I_a) = K + 0{,}662.logI_{bf} + 0{,}0966.V + 0{,}000526.V(logI_{bf}) - 0{,}00304.G(logI_{bf}) \quad (13)$$

$$\log(I_a) = 0{,}00402 + 0{,}983.logI_{bf} \quad (14)$$

Onde:

$log =$ logaritmo na base 10;

$I_a =$ Corrente do arco [kA];

$K =$ -0,153 para configurações abertas e,

-0,097 para configurações fechadas;

$I_{bf} =$ Corrente de curto circuito trifásica RMS [kA];

$V =$ Tensão do sistema [kV];

$G =$ Distância entre condutores [mm].

4.1.5 Encontrar as características de proteção do dispositivo e a duração do arco

No levantamento de campo, as curvas tempo-corrente do sistema podem ter sido encontradas. Caso contrário, é melhor criar, softwares disponíveis torna esta tarefa fácil. Alternativamente, para um simples estudo, é possível usar as características do dispositivo de proteção, que podem ser encontradas nos dados do fabricante.

Para fusíveis, as curvas tempo-corrente do fabricante podem incluir o tempo de fusão e interrupção. Se sim, use o tempo de interrupção. Se for mostrado apenas o tempo médio de

fusão, adicione a esse tempo 15%, até 0,03 segundos, e 10% acima de 0,03 segundos para determinar o tempo de interrupção. Se a corrente de falha do arco estiver acima do tempo de interrupção total na parte inferior da curva (0,01 segundos), use 0,01 segundos para o tempo.

Para disjuntores com unidade de disparo, as curvas tempo-corrente dos fabricantes incluem tempo de disparo e tempo e interrupção.

Para disjuntores operados por relé, as curvas do relé mostram apenas o tempo de operação do relé na região de atraso. Para relés operando na região instantânea possibilita operar em 16 milissegundos em sistemas de 60Hz. O tempo de abertura do disjuntor deve ser somado. A Tabela 2 mostra o tempo de abertura recomendado para disjuntores. Tempos de abertura para disjuntores específicos devem ser consultados nas literaturas dos fabricantes (IEEE-1584, 2002)

Tabela 2 — Tempo de operação do disjuntor de potência.

Classificação e tipo de disjuntor	**Tempo de abertura em 60Hz (ciclos)**	**Tempo de Abertura (segundos)**
Baixa tensão (>1000V) (caixa moldada) (unidade de disparo)	1,5	0,025
Baixa tensão (>1000V) (caixa isolada) (unidade de disparo ou relé de proteção)	3	0,05
Média tensão (1 - 35kV)	5	0,08
Alta tensão (> 35kV)	8	0,13

Fonte: IEEE – 1584-2002

4.1.6 Documentar as tensões do sistema e classes do equipamento

Para cada barramento, documentar a tensão do sistema e a classe do equipamento conforme mostrado na Tabela 3. Isso permitirá aplicação da equação com base nas normas dos equipamentos e a distância entre condutores. (IEEE-1584, 2002)

Tabela 3 — Classes de equipamentos e distâncias entre barramentos.

Classe do equipamento	**Distância típica entre barramentos [mm]**
Painel de 15kV	152

Classe do equipamento	Distância típica entre barramentos [mm]
Painel de 5kV	104
Painel de baixa tensão	32
CCM's e quadros elétricos de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

Fonte: IEEE – 1584-2002

4.1.7 Determinar as distâncias de trabalho

Conforme IEEE 1584-2002 a proteção contra arco elétrico é baseada na distância do evento até sua face ou corpo, e não até as mãos ou braços do trabalhador até o ocorrido, pois o nível de dano ocorrido em uma pessoa depende da porcentagem da pele que sofreu as queimaduras. Como o corpo e a cabeça tem a maior parte da superfície do corpo humano, as queimaduras nestas regiões são mais graves que na extremidade do corpo. A Tabela 4 apresenta distâncias típicas de trabalho de acordo com o equipamento.

Tabela 4 — Distâncias típicas de trabalho

Tipos de equipamentos	Distância típica de trabalho [mm]
Painel de 15kV	910
Painel de 5kV	910
Painel de baixa tensão	610
CCM's e quadros elétricos de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	determinar em campo

Fonte: (IEEE-1584, 2002)

4.1.8 Determinar a energia incidente para todos os equipamentos

A IEEE-1582, 2002 sugere que seja utilizado um software para determinação da energia incidente em todos os equipamentos. Para o cálculo da energia incidente, serão

abordadas duas equações, dentro dos parâmetros conforme Tabela 5, a equação (15) e (16) apresenta a energia incidente normalizada para distância de 610mm da pessoa e tempo de 0,2 segundos, já a equação (17) não tem esses limitantes, somente os limitantes da Tabela 5.

Tabela 5 — Limites de parâmetros para a Equação 15.

Parâmetro	Distância típica de trabalho [mm]
Tensão	208 até 15.000V
Frequência	50 ou 60Hz
Corrente de curto circuito	700 até 106.000A
Aterrametos	Todos os tipos e não aterrados
Equipamentos	Equipamentos de tamanhos comerciais
Distância entre fases	13 até 152mm
Falhas	Envolvendo as três fases

Fonte: (IEEE-1584, 2002)

$$\log E_n = K1 + K2 + 1{,}081.\log I_a + 0{,}0011.G \tag{15}$$

Onde:

log = logaritmo na base 10;

E_n = Energia incidente normalizada [J/cm²];

I_a = Corrente do arco [kA];

$K1$ = -0,792 para configurações abertas (não enclausuradas) e,
-0,555 para configurações fechadas (equipamentos enclausurados);

$K2$ = 0 para sistemas não aterrados ou aterrados por alta resistência e,
-0,113 para sistemas solidamente aterrados;

G = Distância entre condutores [mm].

Para a conversão do logaritmo aplica-se a equação 16

$$E_n = 10^{\log E_n} \tag{16}$$

$$E = 4{,}184.C_f.E_n.\left(\frac{t}{0{,}2}\right).\left(\frac{610^x}{D^x}\right) \tag{17}$$

Onde:

$E =$ Energia incidente [J/cm²];

$E_n =$ Energia incidente normalizada [J/cm²];

$C_f =$ Fator de cálculo,

1,0 para tensões abaixo de 1kV e,

1,5 para tensões iguais ou acima de 1kV;

$t =$ tempo de arco [s]

$D =$ Distância entre a pessoa e possível ponto do arco [mm];

$x =$ expoente da distância, conforme tabela 8.

Tabela 6 — Expoente da distância “x”.

Tensão do sistema [kV]	Tipo de Equipamento	Distâncias típicas entre condutores [mm]	Expoente da distância "x"
0,208 até 1	Ambiente aberto	14-40	2,000
	Painel de distribuição	32	1,473
	CCM's e painel	25	1,641
	Cabo	13	2,000
> 1 até 5	Ambiente aberto	102	2,000
	Painel de distribuição	13 - 102	2,000
	Cabo	13	0,973
> 5 até 15	Ambiente aberto	13 - 153	2,000
	Painel de distribuição	153	0,973
	Cabo	13	2,000

Fonte: (IEEE-1584, 2002)

Para os casos em que a tensão é acima de 15kV ou a distância entre os condutores estiver fora do range da Tabela 5, o método de Lee pode ser aplicado para o cálculo de energia incidente conforme mostra a equação (18) (IEEE-1584, 2002).

$$E = 2{,}142x10^{6}.V.I_{bf}.\left(\frac{t}{D^{2}}\right) \quad (18)$$

Onde:

$E =$ Energia incidente [J/cm²];

I_{bf} = Corrente de curto circuito trifásica RMS [kA];

V = Tensão do sistema [kV];

t = tempo de arco [s]

D = Distância entre a pessoa e possível ponto do arco [mm].

5 ESTUDO DO CASO

Neste trabalho, o estudo é no sistema auxiliar da usina termelétrica UTLC, localizada no complexo Jorge Lacerda em Capivari de Baixo, sistema esse que está representado no Anexo A. E para este estudo se faz necessário o levantamento de dados em campo e cálculos para comprovação eficaz do sistema de proteção utilizando a fibra óptica como detecção de arco elétrico.

5.1 CORRENTE DE CURTO CIRCUITO NO SISTEMA AUXILIAR

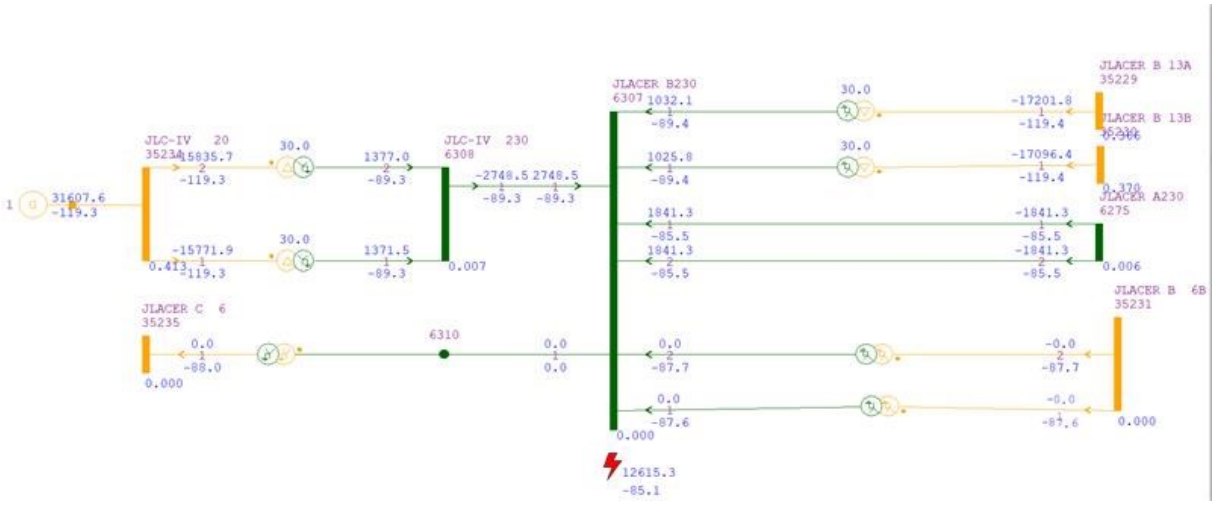
Como foi abordado o desenvolvimento necessário para o cálculo de curto circuito no capítulo 3, agora é mostrado alguns pontos para a realização do cálculo, assim como os valores que foi obtido através deste método.

Para o cálculo de corrente de curto circuito, se faz necessário o entendimento da malha onde se faz o estudo, e tudo que está conectado a ela, seja subestação, gerador, linhas de transmissão etc.

Nesta etapa, foi solicitado ao engenheiro Felipe Cardoso, as correntes de um curto circuito na subestação com todas as contribuições das conexões na subestação de Jorge Lacerda, localizada em Capivari de Baixo[1]. A Figura 26 mostra este detalhamento das correntes e conexões que a subestação tem.

[1] Engenheiro da ENGIE Brasil Energia

Figura 26 — Detalhamento de correntes em um curto circuito.



Fonte: dados da pesquisa (2020)

Na Figura acima, está representada as correntes em todos as conexões e também o ângulo de defasagem, onde a corrente está em Ampére e o ângulo em graus. Esta simulação é um curto circuito trifásico na barra principal da subestação, representada na cor vermelha.

Nesta mesma Figura, não está representada o detalhamento do serviço auxiliar da UTLC, cujo sistema onde este trabalho fará referência, somente o gerador, o qual é o item representado mais a esquerda da Figura.

Para este detalhamento do serviço auxiliar, o Anexo A mostra a barra da subestação e o serviço auxiliar da UTLC resumido.

A barra da subestação está representada em azul na parte superior no Anexo A, onde na esquerda desta mesma figura, estão representados os dois transformadores de saída do gerador, com nomenclatura de TPR1 e TPR2. No centro mostra o transformador TU, o qual é responsável pela alimentação do serviço auxiliar da UTLC, e na direita desta mesma Figura, está representado o transformador TSG, que alimenta também o serviço auxiliar da UTLC, quando o gerador está fora de operação.

Quando o gerador está em operação, ou seja, gerando energia para o sistema e serviço auxiliar, o transformador TU alimenta o serviço auxiliar, através das barras BU1 e BU2, que são motores e equipamentos necessários para a geração da energia elétrica da planta em questão, o TSG alimenta o serviço auxiliar geral, através do barramento BSG, como tomadas, iluminação e outras cargas não prioritárias. Porém, quando o gerador não está em operação, o TSG além de alimentar a barra do BSG, também alimenta os barramentos BU1 e BU2, pois o transformador TU não está com tensão.

Além destes dados, também foi feito o registro dos detalhes elétricos dos transformadores, o qual se encontra na tabela 7.

Tabela 7 — Dados dos transformadores.

Transformador	**Dados**	
TPR1	Impedância	14,5 %
	Potência	195 MVA
	Tensão no primário	20 kV
	Tensão no secundário	230 kV
	Conexão do primário	Delta
	Conexão do secundário	Estrela com neutro aterrado por resistência
TPR2	Impedância	13,51 %
	Potência	195 MVA
	Tensão no primário	20 kV
	Tensão no secundário	230 kV
	Conexão do primário	Delta
	Conexão do secundário	Estrela com neutro aterrado por resistência
TU	Impedância	11,59 %
	Potência	50 MVA
	Tensão no primário	20 kV
	Tensão no secundário	6,3 kV
	Conexão do primário	Delta
	Conexão do secundário	Estrela com neutro aterrado por resistência
TSG	Impedância	13,73 %
	Potência	33,5 MVA
	Tensão no primário	230 kV
	Tensão no secundário	6,3 kV
	Conexão do primário	Estrela
	Conexão do secundário	Estrela com neutro aterrado por resistência

Fonte: Produção do próprio autor.

Logo após estes levantamentos de dados e estudos de ligações, será abordado o cálculo de curto circuito para utilização na energia incidente de um evento de curto circuito.

Como no trabalho proposto existem duas fontes, uma proveniente do gerador acoplado a o transformador TU, e outro proveniente da subestação Jorge Lacerda, como mostra a Figura 21. Realizado a subtração da corrente do gerador na simulação do curto circuito, corrente está mostrada na Figura 20, de todas as outras correntes que contribuem para o curto circuito na subestação, estas outras correntes foram somadas, para assim, obter o valor de impedância da subestação.

Após a obtenção do valor de impedância da subestação, somado com a impedância paralela dos transformadores TPR1 e TPR2, este valor então, realizado um paralelo com o valor de impedância de sequência positiva do gerador. Então, assim, logo após, somado com a impedância do transformador TU, obtendo-se, a impedância de sequência positiva na barra BU1 e BU2.

Para este cálculo citado assim de impedância, foi desprezado os valores das impedâncias das barras, por não darem grande contribuição a este cálculo.

Após a descoberta do valor de impedância de sequência positiva, foi feito o mesmo processo para a impedância de sequência negativa, pois como o gerador está muito próximo da barra BU1 e BU2, este valor não é o mesmo que o da sequência negativa.

No caso da sequência zero, a mesma não se faz presente na barra BU1 pelo esquema de ligação do transformador TU.

Para estes cálculos, foi utilizado o método por unidade (pu), muito utilizado em sistemas de potência, pois neste tipo de sistema, onde é muito complexo e existem diversos níveis de tensão e potências diferente, o método onde se trabalha diretamente com a variável é praticamente inviável. Onde a equação (19) mostra como é utilizado este método. (SATO, 2015)

$$Valor\ por\ unidade\ [pu] = \frac{Valor\ real\ da\ grandeza}{Valor\ de\ base} \tag{19}$$

Os valores de base utilizado para os cálculos se encontram abaixo nas equações (20, 21, 22 e 23).

$$S_B = 100MVA \tag{20}$$
$$V_B = 6{,}3kV \tag{21}$$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}.V_B} = \frac{100M}{\sqrt{3}.6{,}3kV} = 9164{,}29A \quad (22)$$

$$Z_B = \frac{(V_B)^2}{S_B} = \frac{(6{,}3kV)^2}{100MVA} = 0{,}3969\Omega \quad (23)$$

A tabela 8 mostra os valores finais após as análises e cálculos realizados:

Tabela 8 — Valores encontrados na barra BU1 e BU2

	Valores em pu	Valores em Ampére
Impedância de sequência positiva	0,285787	-
Impedância de sequência negativa	0,260313	-
Impedância de sequência zero	0,24292	-
Impedância de aterramento transformador TU	22,9277	-
Corrente de curto circuito trifásica com gerador em operação	3,49911	32066,85
Corrente de curto circuito trifásica com gerador fora de operação	2,41835	22162,48
Corrente de curto circuito monofásica	0,04312	395,17

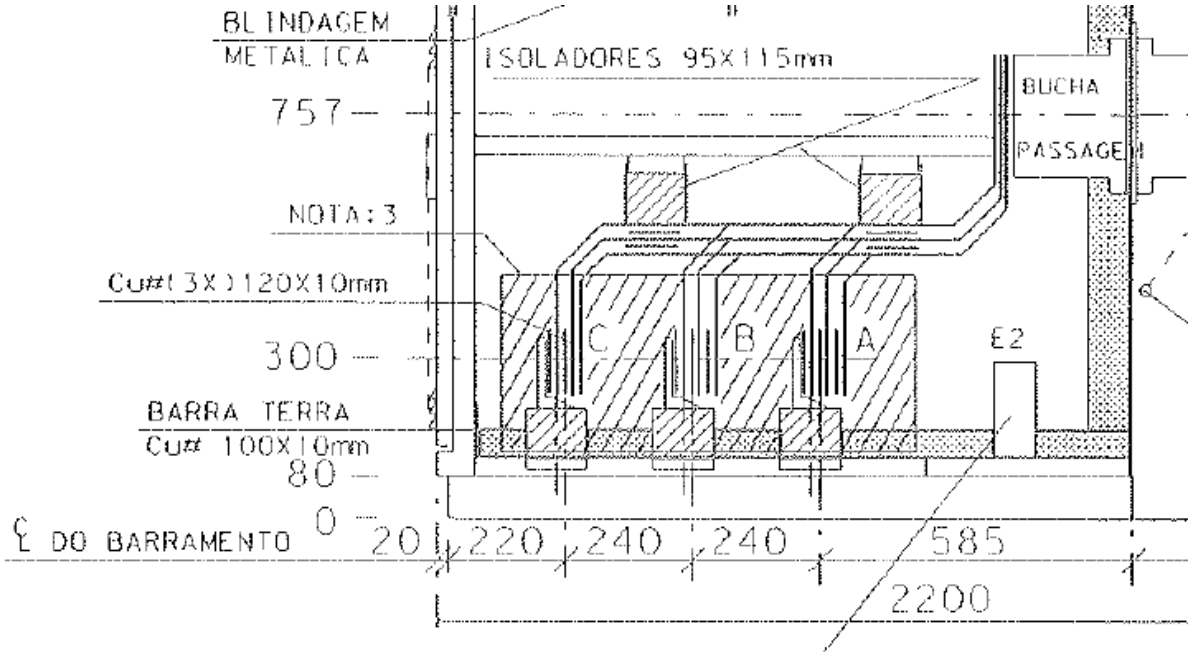
Fonte: produção do próprio autor.

5.2 ENERGIA INCIDENTE NO SERVIÇO AUXILIAR

Após a realização do cálculo de curto circuito abordado anteriormente, se faz o cálculo de energia incidente provocado pela falta. Para o cálculo da energia incidente, será considerado a maior corrente de curto circuito calculada, que é a corrente de curto circuito trifásica, quando o gerador se encontra em operação normal para o sistema, e alimentando o seu próprio serviço auxiliar.

Para o cálculo da energia incidente se utilizou a Equação 19, pelo método de Lee, pois como representado na Figura 27, o espaçamento entre os condutores é de 240mm.

Figura 27 — Detalhamento de espaçamento ente os condutores.



Fonte: Documentação técnica ENGIE

Outro fator determinante para a continuação do cálculo é o tempo de permanência do curto circuito, para este tempo, se faz necessário a soma de dois itens, o tempo de abertura do disjuntor de alimentação e o tempo de processamento da falta pelo relé até a comutação de sua saída.

O tempo de abertura do disjuntor de alimentação, como mostra no anexo B é de aproximadamente 35 milissegundos, porém considerando que o disjuntor já tenha algum desgaste ou envelhecimento, consideraremos o tempo de 40 milissegundos (ENGIE, 2018).

O tempo de sensibilização da proteção que se encontra hoje em operação, que é operado por um relé de tempo muito inverso com o ajuste de *pick-up* de corrente de 8A e TMS de 0,2. Sabendo-se que a relação do TC é de 3500-5A e utilizando a corrente de curto circuito levando em consideração o pior caso, se chega ao tempo de 571milissegundos.

Neste barramento não se tem proteção instantânea devido aos muitos sistemas que se tem a jusante a esta proteção, não tendo assim a seletividade necessária.

Somando este tempo de sensibilização da proteção, mais o tempo de abertura do disjuntor, se chega ao tempo total de interrupção da falta de 611 milissegundos. E aplicando este tempo na Equação 19, juntamente com a corrente já mencionada mais a tensão do sistema auxiliar de 6,3kV, uma pessoa a 1 metro de distância pode receber a energia incidente proveniente deste curto circuito no valor de 264,34 J/cm² ou 63,18 Cal/cm².

Um dispositivo de proteção *IED* com tecnologia compatível a utilização de fibra óptica para detecção de arco elétrico, como dos fabricantes Schneider, *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), Pextron, entre outros, pode reduzir o tempo de atuação desta proteção contra um curto circuito.

Para este cálculo será tomado como base o tempo de sensibilização do relé mais o tempo de comutação de seus contatos. E para isto, será utilizado como base o relé da SEL 751 que garante um tempo de atuação de 2 milissegundos conforme documento do site do fabricante. Este relé associa a elevação de corrente com a detecção de luz através da fibra óptica, impedindo assim uma atuação indevida.

Com esse tempo de atuação mais o tempo de abertura do disjuntor empregado na Equação 19 utilizando os mesmos dados em relação ao cálculo anterior, se chega a energia incidente no evento de curto circuito no valor de 18,17 J/cm² ou 4,34 Cal/cm².

6 UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA

No mercado existem muitas opções para a utilização da tecnologia de detecção de arco elétrico através da fibra óptica, como das marcas ABB, *Schneider Electric*, SEL. Estes exemplos utilizam a fibra para detecção da luz ocorrido por um curto circuito e podem ser colocadas de forma pontual ou da forma regional.

A fibra óptica de forma pontual, é uma fibra coberta que tem apenas um ponto onde a fibra é descoberta, neste ponto é colocado um difusor para a detecção desta luz. O sensor pontual em alguns casos são mais efetivos pois pegam um ponto específico de luz, diminuindo assim a probabilidade de algum trip indevido, normalmente são utilizados em áreas com maior chance de acontecimentos do evento de curto circuito, como nos compartimentos de extração e inserção de gavetas, compartimentos de TP's, entre outros que sejam extraíveis e inseridos, pois nestas partes existe a conexão de algum equipamento desenergizado, como um disjuntor, com a barra que está energizada, tendo assim uma maior chance de acontecimentos de curto circuito. Na Figura 28 é mostrado a ponta de uma fibra óptica pontual.

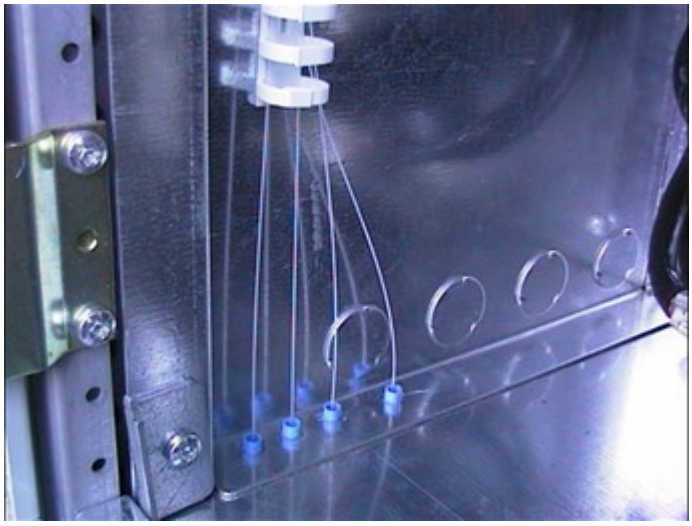
Figura 28 — Ponta de uma fibra óptica pontual

Fonte: (SEL, 2011)

A fibra regional, diferente da fibra pontual, ela é descoberta em uma grande área, sendo assim, cobre maiores regiões do que a fibra pontual, esta fibra normalmente só é coberta da parte traseira do relé até a ponto de inserção dentro do compartimento que se deseja medir a luz proveniente de um arco elétrico, é comumente utilizada nos locais onde

existe barramento principal que alimenta seus cubículos específicos de sub distribuição, ou até mesmo alguma carga como um motor ou transformador, a Figura 29 mostra um exemplo de fibra regional.

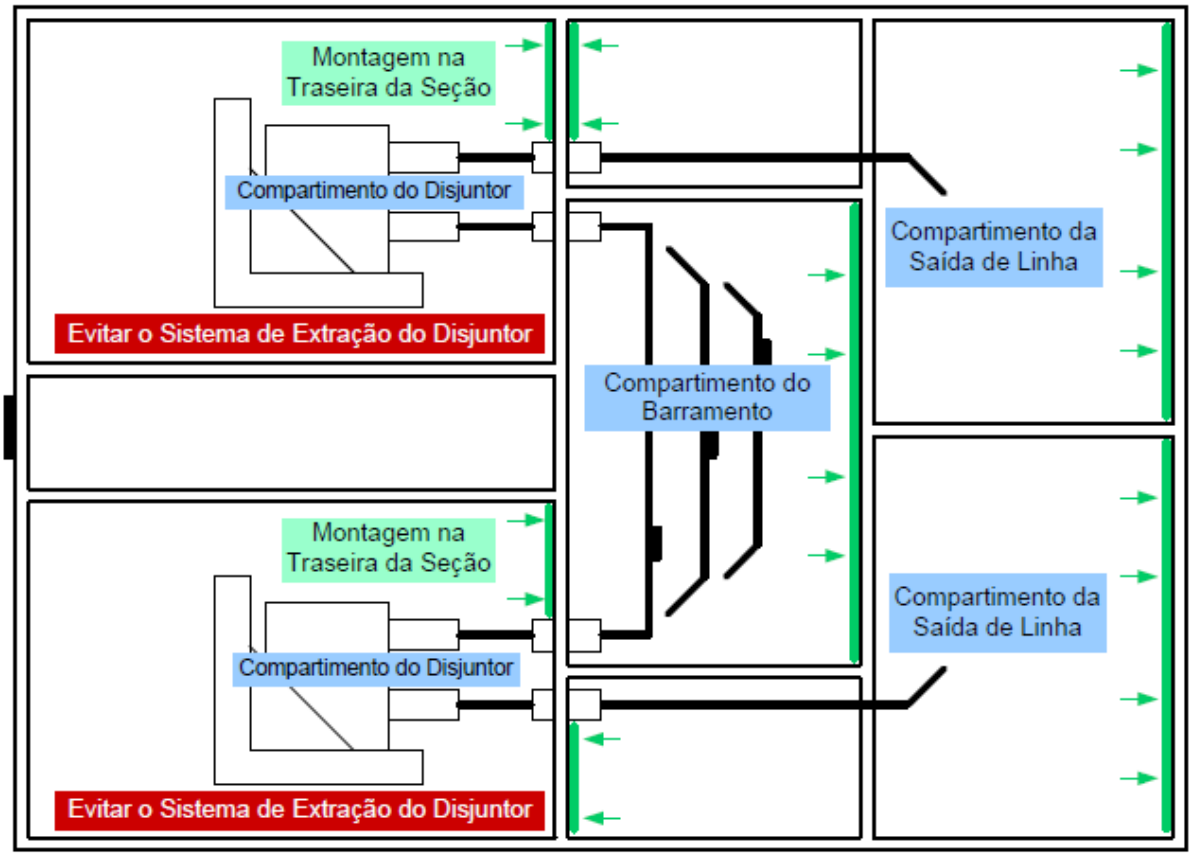
Figura 29 — Fibra ótica regional instalada



Fonte: (ABB SERVICE MEDIA TENSÃO, 2020)

Conforme guia AG2011-01 do fabricante SEL que dispõe da tecnologia da utilização de fibra óptica para detecção de arco elétrico, a fibra deve ser instalada de forma pontual e regional, a fibra pontual nos pontos específicos que tenha maior chance de um arco elétrico, e nos demais pontos com uma fibra óptica regional. A Figura 30 representa os lugares comumente utilizados para instalação da fibra, as setas representam os locais específicos.

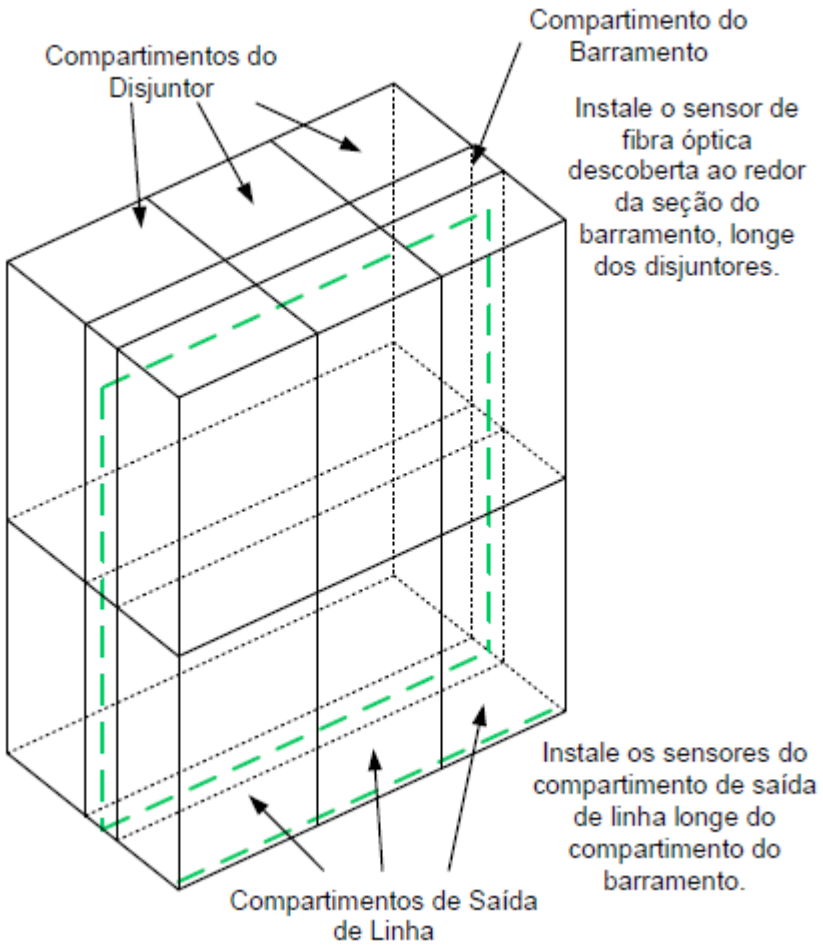
Figura 30 — Lugares de instalação da fibra representados por setas.



Fonte: (SEL, 2011)

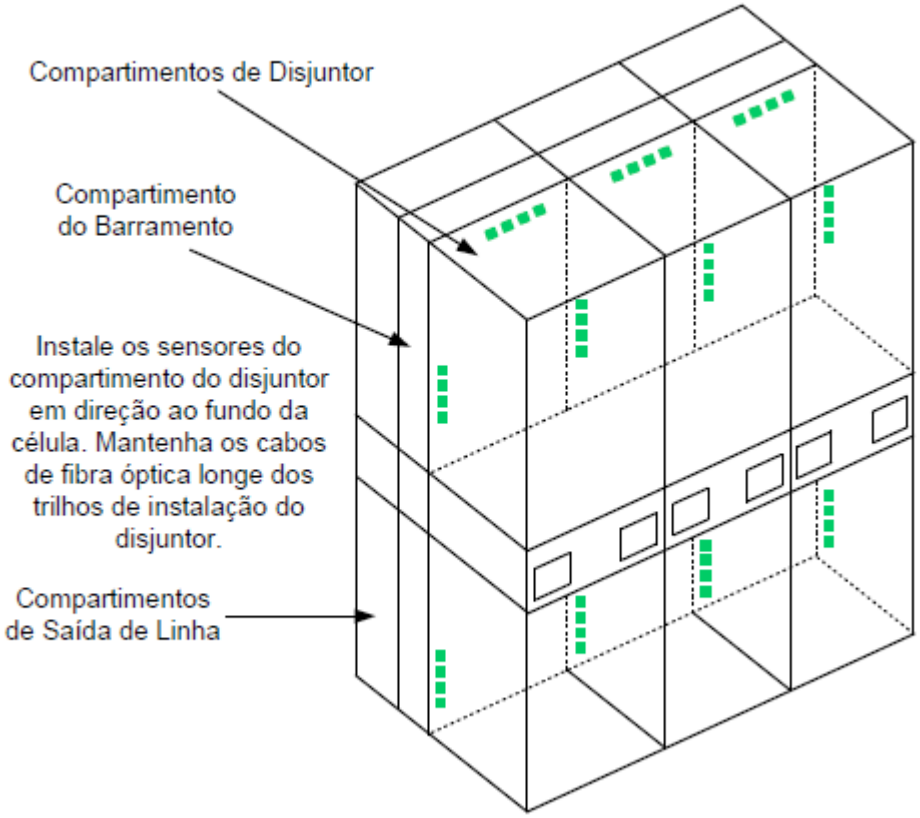
Já na Figura 31, mostra a parte traseira deste mesmo painel, envolvido por uma fibra óptica regional, e na Figura 32 apresenta pontos para colocação da fibra óptica pontual.

Figura 31 — Local de instalação da fibra óptica regional.



Fonte: (SEL, 2011)

Figura 32 — Pontos de instalação da fibra óptica pontual.



Fonte: (SEL, 2011)

7 CONCLUSÃO

Os impactos causados por um evento de curto circuito podem ser de diversas magnitudes, dependendo muito do local da ocorrência, de sua interligação com o sistema, se tem gerador acoplado em operação e até mesmo se ele for monofásico, bifásico ou trifásico.

As perdas por uma falha que origine um curto circuito podem ser perdas materiais, como cubículos que tenha que trocar, barras para substituir em decorrência do derretimento, circuito de comando que tenha que reconstituir. Também podem ser perdas temporais, como indisponibilidade de equipamentos, ou nos casos mais grave, perdas indisponibilizando uma planta inteira, seja ela uma fábrica, indústria ou de geração de energia. E a perda mais grave que pode-se chegar é da vida humana, onde na exposição de uma pessoa a um evento de curto circuito, mesmo com as devidas proteções, sérias lesões podem ser causadas, podendo ter queimaduras graves, inalação de fumaça tóxica e como citado anteriormente, pode-se levar a morte de alguma pessoa, não necessariamente a que está diretamente envolvida, pode até mesmo ser de alguém que esteja próximo ao acontecimento.

Neste trabalho foi detalhado como podem ser calculadas as correntes de curto circuito e também de energia incidente em um evento desta magnitude, onde foi abordado métodos da IEEE 1584-2002 para o cálculo da energia incidente.

Foi mostrado um exemplo de aplicação em um sistema auxiliar de uma usina termelétrica, onde foi abordado um sistema convencional de proteção somente com relé de proteção realizando função de proteção temporizada do barramento em comparação com um sistema com relé *IED* com tecnologia de detecção de arco elétrico através de uma fibra óptica, seja ela pontua ou regional. Neste trabalho, o exemplo que foi utilizado, e com os resultados que foram alcançados, a energia incidente reduziu cerca de 14,5 vezes menor que por um sistema convencional de proteção.

A redução desta energia, pode ser vital para a planta, onde em uma ocorrência de curto circuito, tal redução pode significar em menor tempo de parada da planta, menor tempo de indisponibilidade de equipamento, menor tempo de manutenção atuando em um sinistro, e claro, pode significar a redução para que uma pessoa deixe de se machucar, perder um membro, ou até mesmo a sobrevivência em um acidente deste.

O custo do emprego desta tecnologia se paga com um dia de indisponibilidade da planta onde foi realizado o estudo, então se acontecer um evento de curto circuito, e pelo emprego desta tecnologia for detectado que se reduziu em pelo menos um dia o tempo de parada da unidade, a tecnologia já terá sido paga.

Outro benefício da inserção do *IED*, é a troca de tecnologia, onde os relés atuais são eletrônicos, porém sem oscilografia, sem a precisão e toda tecnologia que uma comunicação pode oferecer, como alarmes na sala de operação da planta, e a operação remota do disjuntor onde o relé estiver instalado, não necessitando um operador estar em campo realizando a manobra, diminuindo assim a chance de algum acidente de trabalho.

REFERÊNCIAS

ABB. Service media tensão. 13 fev. 2020. **ABB**. Disponível em: http://abbservicede mediatensao.blogspot.com/2011/07/rea-sistema-de-protecao-contra-arco.html.

ABRAMAN. Disjuntores. 11 dez. 2006. **Abraman**. Disponível em: http://www.abraman .org.br/Ar quivos/32/32.pdf

ANEEL. **Relatório de desempenho das usinas termoelétrica despachadas centralizadamente**: Tipo I e IIA. Brasília: ANEEL, 2018.

BATISTA, Carolina. Usina termoelétrica. 2017. **Toda Matéria**. Disponível em: https://www.todamateria.com.br/usina-termoeletrica/. Acesso em: 30 out. 2020.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

HELERBROCK, R. Fibra óptica. 2020. **Brasil Escola - Física**. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/fisica/fibra-optica.htm. Acesso em: 25 out. 2020.

HELERBROCK, R. O que é um transformador? 2020. **Brasil Escola – O que é?** Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transforma dor.htm. Aceso em: 21 out. 2020.

IDEAL WORK. Vestimentas de proteção. [ca. 2019]. **Ideal Work**. Disponível em: https:// idealwork.com.br/vestimentas-de-protecao/. Acesso em: 25 out. 2020.

IEEE. IEEE 1584-2018: IEEE guide for performing arc-flash hazard calculations. IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002). 30 nov. 2018. **IEEE**. Disponível em: https://standards.ieee.org/standard/1584-2018.html.

JÚNIOR, Joab Silas da Silva. O que são fibras ópticas? 2020. **Brasil Escola – O que é?** Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-sao-fibras-opticas. htm. 25 out. 2020.

LEE, R. The other electrical hazard: electric arc blast burns. **IEEE Transactios on Industry Applications**, IA-18, p. 246-251, 1982.

LIMA, J. C. **Automação de subestações de transmissão e distribuição**. Belo Horizonte – MG, 15 jun. 2016.

MAMEDE, J. **Proteção de sistemas elétricos e potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARDEGAN, C. **Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais**. São Paulo: Atitude Editorial, 2012.

MARTINS, M. de C. O. Usina termoelétrica. [ca. 2019]. **Cola da Web**. Disponível em: https://www.coladaweb.com/geografia/fontes-de-energia/usina-termoeletrica. Acesso em: 21 out. 2020.

ONS. O que é o SIN. 2020. **ONS – Sobre o SIN**. Disponível em: http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin. Acesso em: 30 out. 2020.

ROCHA, G.; ZANIRATO, E.; AYELLO, F.; TANINAGA, R. ARC-flash protection for low – and medium – voltage panels. set. 2011. **IEEE Xplore – Conferences**. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6085871. Acesso em: 30 out. 2020.

SATO, F. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SEL. Sobre a SEL. 02 ago. 2011. **SEL**. Disponível em: https://selinc.com/pt/. Acesso em: 30 out. 2020.

SEL. SEL 751: relé de proteção de alimentador. 2017. SEL. Disponível em: https://selinc.com/pt/products/751/#tab-literature. Acesso em: 12 jul. 2018.

SILVA QUEIROZ, A.; SENGER, E. A natureza e os riscos do arco elétrico. **O Setor Elétrico**, p. 47-51, 2012.

SILVA, R. A. **Comportamento da função de proteção de sobrecorrente instantânea frente as distorções harmônicas nos réles de proteção numéricos**. 2008. 111f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia São Carlos, Universidade São Carlos, São Paulo, 2008.

STROSKI, P. N. Como funcionam as turbinas a vapor? 26 abr. 2018. **Eletrical e Library – Alta Velocidade – Energia – Mecânica**. Disponível em: https://www.electricaleli brary.com/2018/04/26/como-funcionam-as-turbinas-a-vapor/. Acesso em: 21 out. 2020.

TRIBUNA DE JUNDIAÍ. Curto circuito pode causar desabastecimento de água em Jundiaí nesta quinta (31). 30 jan. 2019. **Tribuna de Jundiaí**. Disponível em: https://www.tribunadejundiai.com.br/noticias/cidades/jundiai/6726-curto-circuito-pode-causar-desabastecimento-de-agua-em-jundiai-nesta-quinta-31. Acesso em: 30 out. 2020.

UMANS, S. D. **Maquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

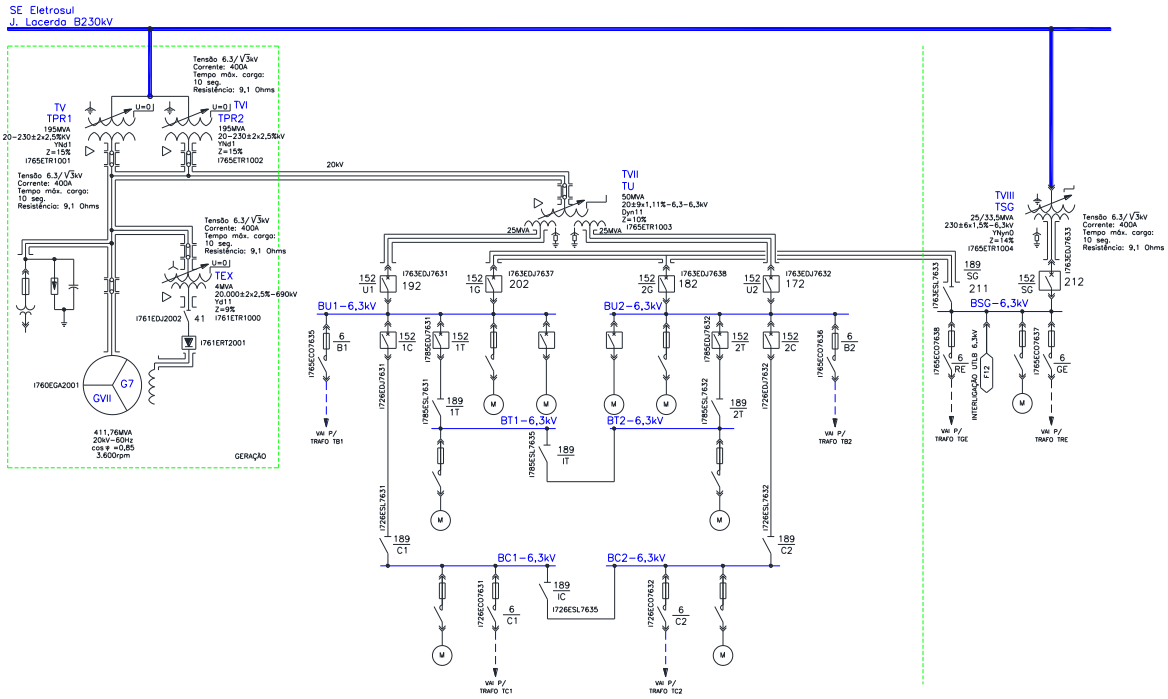
WEG. Conjunto de manobra e controle de média tensão MTW03. 2019. **WEG**. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Pain%C3%A9is-El%C3%A9 tricos/Cub%C3%ADculos-MT/Distribui%C3%A7%C3%A3o-Prim%C3%A1ria/Comjunto-de-Manobra-e-Controle-de-M%C3%A9dia-Tens%C3%A3o---Linha-MTW03/Conjunto-de-Manobra-e-Controle-de-M%C3%A9dia-Tens%C3%A3o-MTW03/p/MKT_ WDC_BRAZIL_SWICTHGEAR_MTW03. Acesso em: 20 out. 2020.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

ANEXOS

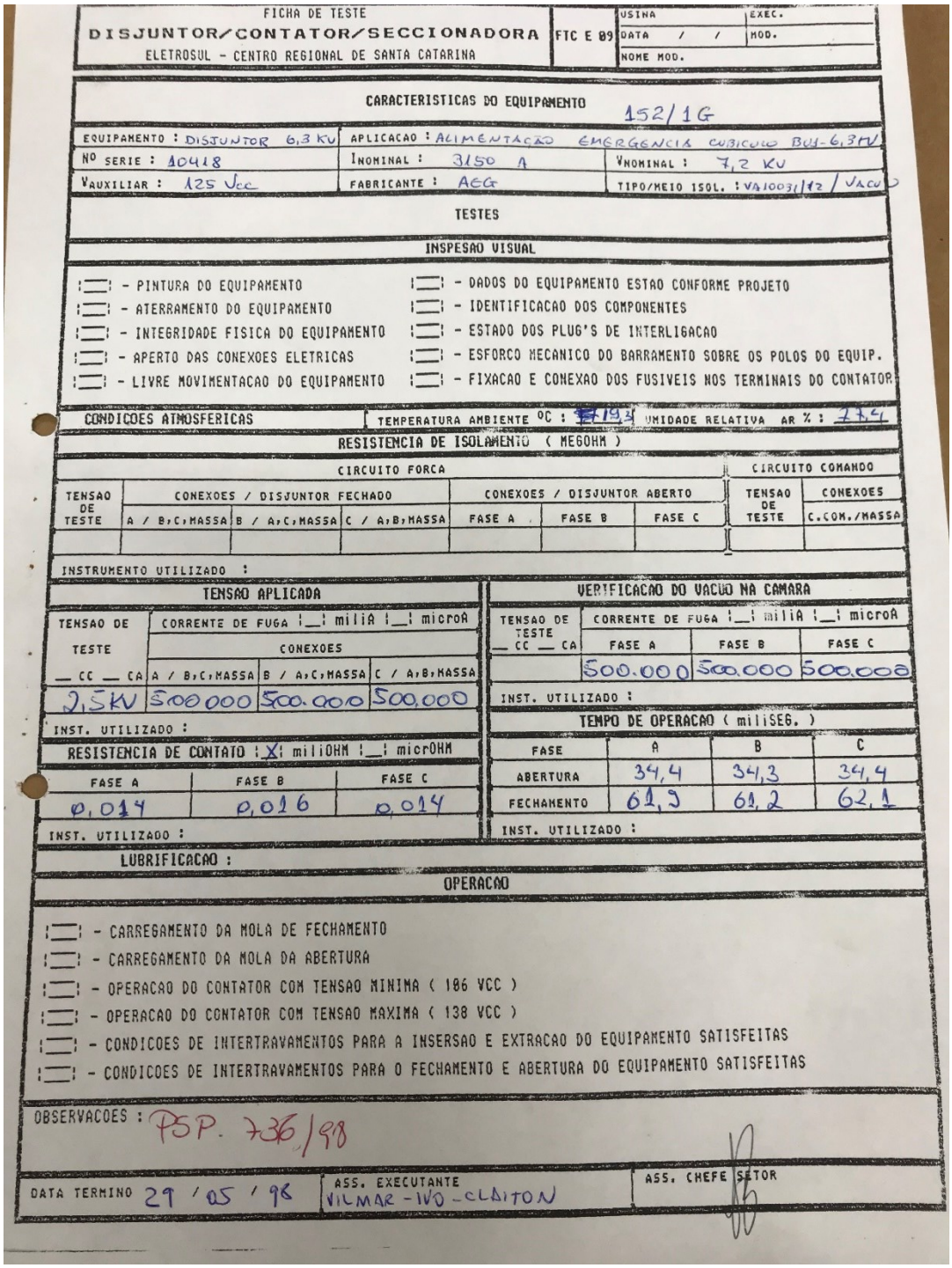
ANEXO A

Detalhamento da Unidade Geradora UTLC



ANEXO B

Ficha de Teste Disjuntor de Alimentação Barramento BU1



FICHA DE TESTE
DISJUNTOR/CONTATOR/SECCIONADORA
ELETROSUL - CENTRO REGIONAL DE SANTA CATARINA
FTC E 09
USINA | EXEC.
DATA / / | MOD.
NOME MOD.

CARACTERISTICAS DO EQUIPAMENTO 152/1G

EQUIPAMENTO : DISJUNTOR 6,3 KV	APLICACAO : ALIMENTAÇÃO EMERGENCIA CUBICULO BU1-6,3KV	
Nº SERIE : 10418	INOMINAL : 3150 A	VNOMINAL : 7,2 KV
VAUXILIAR : 125 Vcc	FABRICANTE : AEG	TIPO/MEIO ISOL. : VA1003/12 / VACUO

TESTES

INSPESAO VISUAL

- [ ] - PINTURA DO EQUIPAMENTO
- [ ] - ATERRAMENTO DO EQUIPAMENTO
- [ ] - INTEGRIDADE FISICA DO EQUIPAMENTO
- [ ] - APERTO DAS CONEXOES ELETRICAS
- [ ] - LIVRE MOVIMENTACAO DO EQUIPAMENTO
- [ ] - DADOS DO EQUIPAMENTO ESTAO CONFORME PROJETO
- [ ] - IDENTIFICACAO DOS COMPONENTES
- [ ] - ESTADO DOS PLUG'S DE INTERLIGACAO
- [ ] - ESFORCO MECANICO DO BARRAMENTO SOBRE OS POLOS DO EQUIP.
- [ ] - FIXACAO E CONEXAO DOS FUSIVEIS NOS TERMINAIS DO CONTATOR

CONDICOES ATMOSFERICAS | TEMPERATURA AMBIENTE °C : 19,3 | UMIDADE RELATIVA AR % : 17,4

RESISTENCIA DE ISOLAMENTO (MEGOHM)

CIRCUITO FORCA							CIRCUITO COMANDO	
TENSAO DE TESTE	CONEXOES / DISJUNTOR FECHADO			CONEXOES / DISJUNTOR ABERTO			TENSAO DE TESTE	CONEXOES
	A / B,C,MASSA	B / A,C,MASSA	C / A,B,MASSA	FASE A	FASE B	FASE C		C.COM./MASSA

INSTRUMENTO UTILIZADO :

TENSAO APLICADA

TENSAO DE TESTE	CORRENTE DE FUGA [_] miliA [_] microA		
	CONEXOES		
__ CC __ CA	A / B,C,MASSA	B / A,C,MASSA	C / A,B,MASSA
2,5KV	500.000	500.000	500.000

INST. UTILIZADO :

RESISTENCIA DE CONTATO [X] miliOHM [_] microOHM

FASE A	FASE B	FASE C
0,014	0,016	0,014

INST. UTILIZADO :

VERIFICACAO DO VACUO NA CAMARA

TENSAO DE TESTE __ CC __ CA	CORRENTE DE FUGA [_] miliA [_] microA		
	FASE A	FASE B	FASE C
	500.000	500.000	500.000

INST. UTILIZADO :

TEMPO DE OPERACAO (miliSEG.)

FASE	A	B	C
ABERTURA	34,4	34,3	34,4
FECHAMENTO	61,3	61,2	62,1

INST. UTILIZADO :

LUBRIFICACAO :

OPERACAO

- [ ] - CARREGAMENTO DA MOLA DE FECHAMENTO
- [ ] - CARREGAMENTO DA MOLA DA ABERTURA
- [ ] - OPERACAO DO CONTATOR COM TENSAO MINIMA (106 VCC)
- [ ] - OPERACAO DO CONTATOR COM TENSAO MAXIMA (138 VCC)
- [ ] - CONDICOES DE INTERTRAVAMENTOS PARA A INSERSAO E EXTRACAO DO EQUIPAMENTO SATISFEITAS
- [ ] - CONDICOES DE INTERTRAVAMENTOS PARA O FECHAMENTO E ABERTURA DO EQUIPAMENTO SATISFEITAS

OBSERVACOES : PSP. 736/98

DATA TERMINO 29 / 05 / 98 | ASS. EXECUTANTE VILMAR - IVO - CLAITON | ASS. CHEFE SETOR