

ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE SUBESTAÇÕES

Matheus Corrêa¹; Matheus Resende²; Matheus Oliveira³; Marcelo Lucas⁴

^{1, 2} Universidade de Uberaba

^{1, 2, 3} Universidade de Uberaba

matheuslucas7619@hotmail.com; marcelo.lucas.eng@gmail.com

Resumo

Neste trabalho tivemos o real objetivo de mostrarmos e detalharmos a elaboração de projetos de subestações de chegada, ou seja, subestações de alimentações de redes locais e de cidades, com rebaixamento de linhas de alta tensões acima de 69Kv até 138Kv, para 13.8Kv, alimentando postes com transformadores de média tensão para alimentação da baixa e tipos de ligações. Neste sentido, o projeto foi criado do início, englobando concessionárias de energia e normas em geral, sem contar com detalhes de cada uma com suas particularidades, sendo comum o uso para demais. Contudo, todo o conhecimento e informações foram embasados em cálculos e normas já existentes, visando também linhas de alta tensões como parte das subestações e parte do projeto. Na metodologia, constam diversos tipos de proteções, equipamentos, suportes, estruturas, malhas, cálculos, tanto de carga e dimensões, como unifilares e trefilares.

Palavras-chave: Tensões. Transformadores. Subestações. Alimentações. Concessionárias.

1 Introdução

Neste trabalho foi construído um manual descritivo para informar os passos para realização de um projeto de subestações que atenda comercialmente as concessionárias e as linhas de transmissão. Neste sentido toda a metodologia apresentada e estudada, foi buscada através de normas gerais como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que rege as leis sobre a parte de potência, de transmissão e de qualidade de energia. Algumas particularidades específicas, como normas de concessionárias, não foram muito levadas adiante neste trabalho, porém não foram descartadas. Com tudo, trouxemos algo que generalizaria este projeto para qualquer estado do Brasil.

Na metodologia, consta a elaboração de chegada de linhas de transmissões para pátios de subestações de chegada, para real transformação da energia, garantindo a qualidade para os terminais da cidade, ou locais de demanda. Neste sentido, no trabalho, está incluída toda a parte de criação da planta, diagramas elétricos, diagramas de proteção, diagramas fasoriais, diagramas de aterramento e malhas de proteção contra surtos,

mais conhecidos como SPDA (Sistema de proteção contra descarga atmosférica), cronogramas de proteção, sistemas de SPK, diagramas de partidas de motores para ligamento das seccionadoras, estudos de seletividade dentre outros. Na metodologia descrita, envolvemos linhas de 138kV, de acordo com a norma acima de 69kV que a considera como alta tensão, trabalhando também com linhas de 13.8kV, ou seja, linhas de média tensão, e abaixo de 1kV, linhas de baixa tensão. Com tudo, a alocação de equipamentos e estruturas também fazem parte da metodologia, implicando as distancias e alturas, partes mecânicas, tensões de passos, normas regulamentadoras de segurança e bons hábitos, NR10 e aplicações da NBR5410 de baixa, média e alta tensão.

O sucesso dessa atividade deve-se pelo prazer e pela motivação proporcionados, bem como pelo aprendizado de projetos de subestações, linhas de energia e qualidade da distribuição e proteção. (MAMEDE FILHO, 2021).

2 O que é uma subestação?

De acordo com o livro Subestações de Alta Tensão do (MAMEDE FILHO, 2021). “todo sistema de potência é constituído de três diferentes segmentos: geração, transmissão e distribuição. Para que a energia gerada no primeiro segmento chegue ao seu destino final, que é o consumidor que está ligado ao sistema de distribuição, é necessário também que exista em cada um desses segmentos uma subestação que possa elevar e reduzir a tensão em diferentes níveis.”

Com isso, as subestações são conjuntos de equipamentos para a realização de manobras de levantamento e de rebaixamento, ou para manter a qualidade de energia na linha, composta de diversos instrumentos eletromecânicos e civis. da concessionária local e fornecem uma referência útil para aquisição e substituição de equipamentos.

Além disso, elas desempenham um papel crucial na gestão de estoque e na prevenção de atrasos no projeto.

2.1 Tipos de subestações

Aqui estão alguns tipos de subestações mais utilizadas comercialmente nos dias de hoje;

- Subestação elevadora de tensão.
- Subestação Rebaixadora de tensão.
- Subestação de chegada.
- Subestação de alimentação.

2.2 Principais Funções

Para a tabela 1 temos as funções e tipos de subestações classificados pelos seus níveis de tensões de trabalho de com o livro Subestações de Alta Tensão do (MAMEDE FILHO, 2021) temos;

Tabela 1 – Classificação dos tipos de Subestações e suas capacidades de potência e Linhas de tensões.

Tipos de Subestações	Potência Final	Tensão Nominal
SE de média tensão I	< 5MVA	13,80~34,5kV
SE de média tensão II	< 70MVA	69~88kV
SE de média tensão III	< 150MVA	138kV
SE de alta tensão I	< 500MVA	230kV
SE de alta tensão II	> 500MVA	500Kv

Fonte: MAMEDE FILHO (2021)

Através da tabela apresentada, temos uma noção maior de suas aplicações e funções descritas como:

- Manter a tensão de linha, para linhas de transmissão.
- Rebaixar as tensões para determinada faixa de alimentação.
- Elevar as tensões obtidas usinas de geradores de energia, como eólicas, hidrelétricas, mecânicas e termelétricas.

2.3 Cargas De Demanda

Através dos projetos de cargas implementados e criados a partir de um início de obra da indústria ou criação, deve-se levar em conta a contratação da demanda por parte da concessionária para criação da subestação.

2.4 Estudo de Seletividade

O estudo de seletividade é uma análise técnica realizada em sistemas elétricos para garantir que os dispositivos de proteção sejam coordenados adequadamente, de forma que somente o dispositivo mais próximo da falha seja ativado em caso de curto-circuito ou sobrecarga. O objetivo principal desse estudo é assegurar que, em caso de

falha em um determinado ponto do sistema elétrico, somente o dispositivo de proteção correspondente a esse ponto seja desligado, mantendo o restante do sistema em operação normal.

Para projetos de subestações é essencial o levantamento e o estudo de seletividade, pois a partir dele sabemos se o circuito está em perfeito funcionamento e estará devidamente dimensionado com suas respectivas proteções.

2.5 Dimensionamento de Estruturas e Suportes

O dimensionamento ocorre nas primeiras fases do projeto, onde é feito o layout de aplicação dos equipamentos necessários para suprir a subestação. Neste sentido ficam evidenciados o tipo de estrutura, e o objetivo relativos ao meio ambiente para as quais a subestação estará sujeita.

2.6 Pórticos Treliçados Metálicos

Utilizados de modo geral na grande maioria dos casos, porém se limita ao uso próximo a locais onde existe alto grau de ambiente corrosivo, onde pode proporcionar desgaste em sua estrutura. Porém a sua aplicação se dá ao fato da facilidade de deslocamento e realocação para expansão com equipamentos e dentre outros.

2.7 Pórticos de Concreto

Ao contrário da estrutura de metais, a de concreto utilizadas mais em níveis menores de tensões, sua aplicação vem também para resolver o problema quando se tem a corrosão próxima do local de instalação da subestação. Tendo como principal problema a sua falta de locação e movimentação para mudanças de layout.

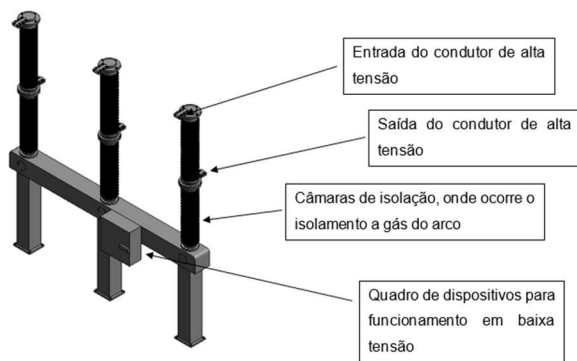
2.8 Disjuntores

Disjuntores no geral são dispositivos de proteção que foram desenvolvidos para interromper corrente elétricas de alta intensidade protegendo assim os equipamentos elétricos, os de alta tensão não são diferentes, geralmente usados em sistemas com tensão acima de 72,5kV, como linhas de transmissão e subestações, garantem a proteção do sistema e dos equipamentos elétricos. No geral possuem três compostos de destaque, sendo eles seu mecanismo de acionamento, o interruptor e seu sistema de isolamento. Sendo o mecanismo de acionamento aquele que abre e fecha o interruptor e o sistema de isolamento o que define qual será a capacidade que tem para suportar altas tensões.

Os disjuntores de alta tensão possuem diversos tipos como a vácuo, a óleo, a gás e a ar comprimido, sendo utilizados conforme a demanda e o projeto realizado.

Na figura 1 é mostrado como é a estrutura do disjuntor, explicando em que local é a entrada e saída dos cabos de alta tensão, além de onde se encontram as câmaras de isolamento e o quadro de dispositivos de baixa tensão.

Figura 1 - Exemplo de um Disjuntor p/ SE



Fonte: Os Autores

2.9 Tipos de Disjuntores

- **Disjuntor a vácuo:** É um disjuntor pouco usado contemporaneamente em suas instalações, usando o vácuo como meio isolante e extintor de arco.
- **Disjuntor a óleo:** Outro Disjuntor antigo, como poucas aplicações para o mundo de hoje, usando óleo mineral como o isolador principal dentro de suas câmaras.
- **Disjuntor a ar comprimido:** Utiliza ar comprimido como meio de extinção do arco elétrico gerado durante a interrupção da corrente elétrica. Esse tipo de disjuntor é composto por uma câmara de extinção, onde o ar comprimido é direcionado para extinguir o arco elétrico, e por um sistema de acionamento que utiliza um mecanismo de mola ou pistão para abrir e fechar os contatos do disjuntor. No entanto, é importante ressaltar que os disjuntores a ar comprimido requerem manutenção e calibração adequadas para garantir o seu correto funcionamento e prolongar sua vida útil.
- **Disjuntor SF6:** Mais usado nos projetos de hoje e instalações recentes, onde utiliza o gás lacrado de SF6 (hexafluoreto de enxofre), como meio para parar o arco elétrico gerado durante a interrupção da corrente elétrica, usando acionamento que utiliza um mecanismo de mola ou pistão para abrir e fechar os contatos do disjuntor. No entanto, o SF6 é um gás com alto potencial de aquecimento global (GWP), o que significa que sua liberação para a atmosfera contribui para o aquecimento global. Por

isso, é importante garantir que os disjuntores SF6 sejam instalados, operados e mantidos de forma adequada, a fim de minimizar as emissões de SF6 para o meio ambiente. Além disso, a substituição gradual do SF6 por gases alternativos com baixo GWP é uma tendência crescente na indústria de energia elétrica.

2.10 Dimensionamento de Disjuntores

O dimensionamento de disjuntores de alta tensão é um processo que envolve diversos fatores que precisam ser considerados, como:
 Cálculo de corrente de curto-circuito: O cálculo é feito através de levantamento de dados envolvendo os terminais da carga, impedâncias, níveis de tensão da linha, ou seja, primário do transformador, e as cargas da linha como tensão de fase e corrente nominais, conforme mostrado na forma abaixo. (MAMEDE FILHO, 2021).

$$I_n = S / \sqrt{3} \cdot V_{ff} \quad (1)$$

$$I_{cc} = I_n / Z\% \quad (2)$$

Em que:

I_n = Corrente Nominal

V_{ff} = Tensão de Linha

S = Potência Nominal

I_{cc} = Corrente Curto Circuito

$Z\%$ = Impedância percentual

- **Tipo do disjuntor a ser instalado:** Deve ser levantado o disjuntor a ser instalado, mais comum o do tipo SF6, porém isso vai de caso para caso em relação a custo.
- **Velocidade de acionamento:** A velocidade de acionamento está diretamente relacionada ao tempo necessário para que o disjuntor abra ou feche seus contatos, interrompendo ou restabelecendo a corrente elétrica no circuito. Existem diferentes métodos para calcular a velocidade de acionamento de um disjuntor de alta tensão, mas um dos mais utilizados é o *método do fluxo de energia*. Esse método envolve o cálculo da energia total armazenada no sistema elétrico antes do curto-circuito e a energia total liberada durante a interrupção da corrente de curto-circuito pelo disjuntor.

12 Dimensionamento de transformadores de corrente TC's

Os transformadores de corrente, conhecidos como TCs, são dispositivos auxiliares, que consistem em dois diferentes tipos: os TCs de proteção e os TCs de medição, onde os de proteção tem como função fornecer ao instrumento medidor

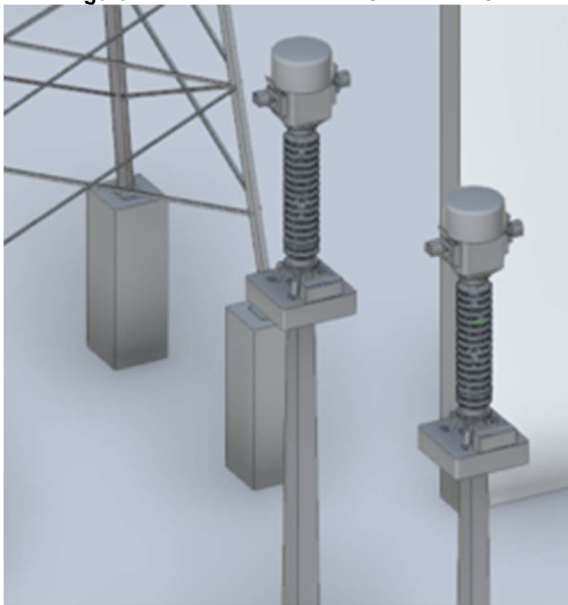
ou ao relé a corrente necessária para seu adequado funcionamento, enquanto os de medição realizam a função de medir a corrente em determinado ponto.

O processo de dimensionamento do TC é uma etapa importante para se realizar o projeto de uma subestação, onde devem ser realizados os cálculos de maneira precisa e seguir diversos passos para que se garanta a precisão na medição da corrente elétrica no circuito da subestação.

O primeiro passo é definir a relação de transformação do TC, que seria a relação entre a corrente medida no circuito primário e a corrente de saída no circuito secundário. Após isso deve-se escolher a classe de precisão do TC, que seria a margem de erro permitida na medição da corrente.

Escolher o tipo de TC e determinar sua carga nominal, como existem diferentes tipos de TC com diferentes núcleos é necessário saber qual o ideal para sua aplicação, além de saber qual a corrente máxima que pode ser medida com precisão pelo TC, para isso deve-se realizar cálculos de curto-circuito, para que seja possível determinar a corrente máxima que pode ser gerada no circuito primário e garantir que o TC seja capaz de medir com precisão essa corrente. Outro ponto importante é verificar a compatibilidade com outros instrumentos como os relés e instrumentos de medição. Na figura abaixo é apresentado um modelo de TC juntamente com o local onde deve-se instalá-lo.

Figura 2 - Transformadores de Corrente - TC's



Fonte: Os Autores

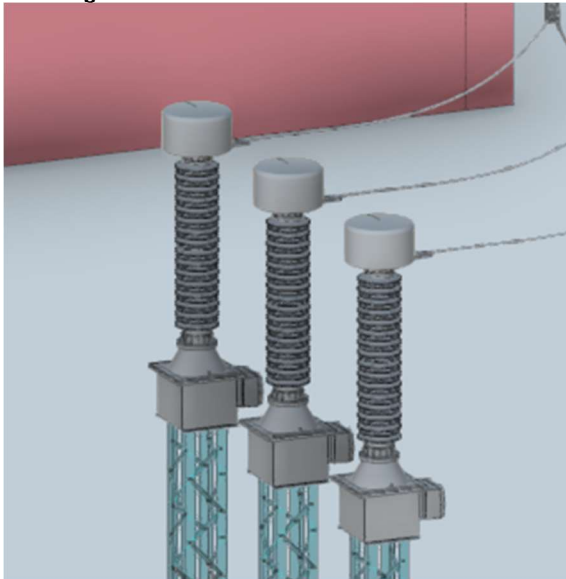
2.11 Dimensionamento de transformadores de potencial indutivo TP's

Um transformador de potencial indutivo, mostrado na figura 3, também conhecido como TP indutivo ou TPI, é um dispositivo utilizado para medir tensões em sistemas de energia elétrica. Ele é um tipo de transformador que fornece uma relação de transformação precisa entre a tensão do sistema (primária) e a tensão secundária. A principal função do TP indutivo é reduzir a tensão do sistema para níveis seguros e adequados para os instrumentos de medição. Por exemplo, em sistemas de alta tensão, o TP indutivo reduz a tensão para um nível mais baixo, normalmente em torno de algumas centenas de volts, que pode ser facilmente medido pelos instrumentos de medição.

O dimensionamento de transformadores de potencial indutivo, envolve o cálculo das características necessárias para o correto funcionamento desses dispositivos. Os transformadores de potencial indutivo são amplamente utilizados para medir tensões em sistemas de energia elétrica, fornecendo uma relação de transformação precisa entre a tensão do sistema e a tensão secundária.

Para dimensionar corretamente um TP é necessário determinar a relação de transformação com base nos requisitos de medição do sistema e na faixa de tensões que o transformador precisa abranger, determinar a classe de exatidão que determina a tolerância máxima permitida para erros de medição e geralmente é especificada de acordo com os padrões internacionais, como a norma IEC 60044-2, calcular a potência nominal utilizando a tensão do primário e a corrente máxima do secundário garantindo que o transformador seja capaz de suportar as condições de carga esperadas, determinar a classe de tensão que indica a faixa de tensões na qual ele pode operar com segurança para garantir que ele não sofra danos durante a operação.

Também é importante especificar outras características do transformador de potencial, como a frequência de operação, o tipo de isolamento, a classe de temperatura, entre outros. Na figura abaixo é apresentado um modelo de TPI juntamente com o local onde deve-se instalá-lo.

Figura 3 - Transformador de Potencial Indutivo

Fonte: Os Autores

2.12 Dimensionamento de Transformadores de Potência

Transformadores de potência mostrados na figura 4, são dispositivos eletromagnéticos que permitem a transferência eficiente de energia elétrica de um sistema para outro, através da variação da tensão e corrente elétrica. São amplamente utilizados em sistemas de transmissão de energia elétrica de alta tensão, onde a energia gerada em usinas elétricas é transportada por longas distâncias até chegar aos centros de consumo. Também são usados em subestações elétricas para alterar a tensão de corrente alternada (CA) de níveis mais altos para níveis mais baixos, facilitando a distribuição para áreas residenciais, comerciais e industriais.

Para dimensionar corretamente um transformador de potência é necessário determinar a potência nominal baseado na carga elétrica que ele irá alimentar, escolher a tensão primária e secundária com base nos requisitos do sistema elétrico que o transformador será instalado, cálculo da corrente nominal utilizando a potência e nas tensões primária e secundária, escolher a classe de isolamento corretamente para que o transformador tenha a capacidade de suportar tensões e correntes de curto-circuito sem danos, escolher o tipo de resfriamento que melhor se aplica a utilização do transformador, podendo resfriamento a óleo, resfriamento a ar natural e resfriamento a ar forçado.

Na figura 4 está um modelo de transformador de potência desenvolvido pela empresa Dimatic, onde está demonstrado o quão grande pode ser o transformador de uma subestação.

Figura 4 - Transformador de PotênciaFonte: www.dimaticperu.com

2.13 Concessionárias de Energia

As normas para projetos de subestações são regidas por órgãos que fazem a regulamentação por região, estado, cidade ou algum lugar específico.

Hoje no Brasil são cerca de mais de 20 órgãos que fazem essa gestão dentro de linhas de tensões elevadas para projetos desde criações de subestações até manutenções ou correções. Neste sentido, todo projeto de subestação deve seguir a norma local, para que esteja dentro os conformes no qual a concessionária local faça a operação e esteja dentro dos parâmetros de qualidade de energia deles.

Com isso, como dito antes cada norma tem sua peculiaridade específica, nem todas concessionárias vão seguir o mesmo modelo de proteção para transformadores como exemplo, mas em si todas vão seguir o mesmo objetivo que é proteger o transformador contra um possível curto-circuito ou extra carga em seus terminais ou extrabaixa carga ou tensão.

Abaixo temos os nomes e concessionárias com seus respectivos locais de atuação com suas respectivas normas.

Tabela 2 – Lista de Concessionárias de Energia Regulamentadas pela ANEEL.

Concessionárias
CELESC – Centrais elétricas de Santa Catarina S.A
CEMIG Distribuição S.A
CESP – Companhia energética de São Paulo
COPEL – Companhia Paranaense de energia
CPFL Paulista – Companhia paulista de força e luz
EDP São Paulo Distribuição de energia elétrica S.A
ELECTRO – Elektro eletricidade e serviços S.A
ELETROPAULO – Metropolitana eletricidade de São Paulo S.A
ENEL CE – ENEL Distribuição Ceará
EQUATORIAL ALAGOAS DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A
LIGHT – SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A

Fonte: www2.aneel.gov.br/aplicacoes

2.14 Distância de deslocamento de tensões de passos

A distância de deslocamento de tensões de passo, também conhecida como distância de isolamento, desempenha um papel crucial na salvaguarda de sistemas elétricos. Essa medida diz respeito à separação física necessária entre os elementos energizados, como cabos e equipamentos, e os pontos de referência elétrica, como aterramentos ou outras estruturas de potencial.

O propósito fundamental da distância de deslocamento de tensões de passo é assegurar a integridade dos trabalhadores e a proteção dos equipamentos. Sua determinação leva em consideração a magnitude das tensões envolvidas e a classificação do ambiente de trabalho, contemplando fatores como a voltagem nominal do sistema, a frequência, o tipo de equipamento e as normas de segurança em vigor.

Essa distância é projetada para prevenir ocorrências de arco elétrico e descargas, impedindo que pessoas ou objetos estabeleçam contato direto com partes energizadas do sistema.

Sua relevância é particularmente significativa em ambientes de alto risco, como subestações, usinas de energia e outros locais que operam com tensões elevadas.

Normas de segurança elétrica, como as diretrizes do National Electrical Safety Code (NESC) e da International Electrotechnical Commission (IEC), estabelecem critérios mínimos para a distância de deslocamento de tensões de passo. Essas normas são embasadas em estudos de engenharia elétrica e levam em consideração a capacidade de isolamento dos materiais utilizados, bem como a probabilidade de ocorrência de arcos elétricos.

2.15 Coordenogramas de Proteção

Para projetos de subestações, um dos principais itens que devem constar em um projeto são os coordenogramas de proteção ou curvas *IEC* (*International Electrotechnical Commission*). Neste tipo de item, são feitos cálculos para dimensionamento de corrente e tempo, com parâmetros relacionados ao relé e múltiplos. Através da corrente coletada pelos transformadores de corrente e das leituras de linha, são feitos ajustes nos relés para que, a partir de determinado valor, seja deferida a atuação da proteção ou "trip" nos disjuntores de alta tensão.

Isso ocorre porque, por si só, os disjuntores não atuam e necessitam da leitura de relés que sejam capazes de ter uma atuação quase que imediata na proteção da linha da subestação e no pátio como

um todo. O claro objetivo é proteger a linha de saída de um eventual curto-circuito, bem como os diversos equipamentos, como transformadores de potência, que possuem um custo elevado.

Abaixo, temos alguns dos itens que devem ser calculados para determinar o valor da corrente de atuação das proteções, tais como:

- Corrente de magnetização
- Correntes de curto-circuito
- Curva de dano dos cabos
- Curva de dano do(s) banco(s) de capacitores
- Curva de dano dos fusíveis
- Curva de dano do(s) transformadores
- Curva de proteção da função 50,51,67
- Curva de sobretensão
- Curvas de sobrecorrente IEC
- IEC inversa (c1)
- Muito inversa (c2)
- Extremamente inversa (c3)
- Curva dos disjuntores

Tem-se uma equação fundamental para Curvas IEC, para cada curva existe uma constante específica na qual deve se levar em consideração ao cálculo para definir a atuação dos relés de sobrecorrente, neste sentido temos.

Abaixo temos a fórmula geral, usada para se calcular o tempo de atuação dos relés, onde é substituído o valor das constantes. (MARDEGAN, 2010).

$$t = (a / (M^b - 1)) * c \quad (3)$$

$$M = I_{cc} / I_{rl} \quad (4)$$

Em que:

t = tempo

a = constante curva

M = Múltiplo de corrente

b = constante curva

I_{cc} = corrente Curto-Circuito

I_{rl} = corrente definida no relé

c = tempo definido

Aqui temos equações específicas de relés de sobrecorrente como;

- Normal inversa
- Muito inversa
- Extremamente inversa

Abaixo temos a fórmula da curva "Normal inversa", que tem como objetivo proporcionar uma resposta rápida e eficaz para proteção contra curtos-circuitos em sistemas elétricos, minimizando

danos e garantindo a segurança do sistema e dos equipamentos. (MARDEGAN, 2010).

$$t = (0.14 / (M^{0.02} - 1)) * c \quad (5)$$

$$M = I_{cc} / I_{rl} \quad (6)$$

Em que:

t = tempo

M = Múltiplo de corrente

I_{cc} = corrente Curto-Circuito

I_{rl} = corrente definida no relé

c = tempo definido

Quanto a curva “Muito inversa”, é uma curva de proteção altamente sensível e rápida, utilizada em sistemas elétricos nos quais é necessária uma resposta extremamente rápida para proteção de equipamentos sensíveis ou em situações em que a tolerância a curtos-circuitos é muito baixa. Ela é capaz de atuar prontamente em correntes anormais, reduzindo o tempo de exposição a falhas elétricas, mas requer cuidado para evitar falsos disparos. Abaixo está sua fórmula após serem substituídos os valores. (MARDEGAN, 2010).

$$t = (13.5 / (M - 1)) * c \quad (7)$$

$$M = I_{cc} / I_{rl} \quad (8)$$

Em que:

t = tempo

M = Múltiplo de corrente

I_{cc} = corrente Curto-Circuito

I_{rl} = corrente definida no relé

c = tempo definido

Por fim temos a fórmula da curva “extremamente inversa”, que assim como nas curvas anteriores, é importante ressaltar que a curva Extremamente Inversa pode ser propensa a falsos disparos em situações de variações normais de corrente ou em momentos de picos momentâneos de corrente. Portanto, é necessário realizar uma configuração adequada e uma coordenação precisa com outros dispositivos de proteção para evitar atuações indesejadas. (MARDEGAN, 2010).

$$t = (80 / (M^2 - 1)) * c \quad (9)$$

$$M = I_{cc} / I_{rl} \quad (10)$$

Em que:

t = tempo

M = Múltiplo de corrente

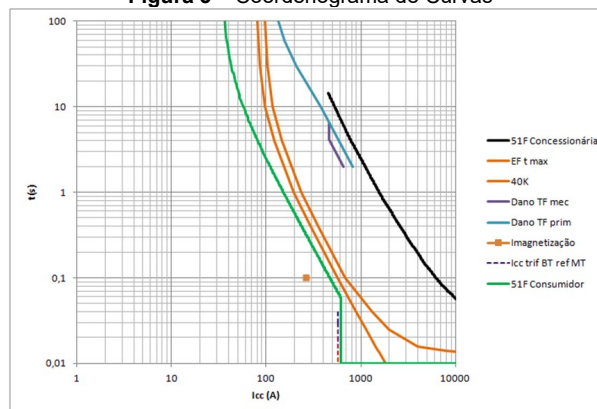
I_{cc} = corrente Curto-Circuito

I_{rl} = corrente definida no relé

c = tempo definido

Abaixo temos uma foto de um diagrama dimensionado pela ProEngeCursos com valores quaisquer, para demonstração de leitura e demonstrações das curvas.

Figura 5 – Coordenograma de Curvas



Fonte: www.proengecursos.com.br

Outrossim, para as outras curvas correspondentes aos itens citados, as fabricantes dos cabos, ou até mesmo dos transformadores devem ter os respectivos valores de curto-circuito de partida e de proteção para que seja demonstrado no coordenograma como um todo.

2.16 Diagramas Unifilares

Um dos itens mais importantes para o projeto de uma subestação são os diagramas como unifilares e multifilares, pois indicam a arquitetura do circuito e tudo que está contido no mesmo, como transformadores, cabos, estruturas, proteções, etc.













No diagrama consta simbologias que a norma ANSI (American National Standards Institute), traz as simbologias padrões para os projetos, deixando tudo de forma que qualquer concessionária entenda o que o projetista responsável ou engenheiro dimensionou ou desenhou no diagrama.

Neste sentido, no diagrama consta muitas simbologias, dentre elas as mais comuns:

- Transformadores de corrente
- Transformadores de potencial indutivo
- Transformadores de potência
- Disjuntores
- Cabos
- Funções de proteção
- Seccionadoras
- Rede elétrica
- Relé
- Fusível
- Barramentos
- Para-raios

A seguir deixo um exemplo de um quadro de legenda de trifilar ou unifilar que necessita ter em um projeto para que possa ser feita a leitura dele. Com isso, a concessionária ou operador da empresa onde estará a subestação tem como objetivo olhar os diagramas para operação dela, neste sentido e notório que o diagrama esteja plenamente correto e dentro dos parâmetros e também dimensionado corretamente com o que constar em campo na subestação.

Figura 6 - Exemplo de Legenda de Diagrama

LEGENDA		
①		REDE ELETRICA
②		FIÇÃO
③		PARA RAO
④		CHAVE SECCIONADORA COM FUSIVEL
⑤		DISJUNTOR COMPACTO SF6
⑥		TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA
⑦		TRANSFORMADOR DE CORRENTE
⑧		FUSIVEL CONTRA SOBRETENSÃO E SOBRE CARGA
⑨		ATERRAMENTO
⑩		LIGAÇÃO DELTA
⑪		LIGAÇÃO ESTRELA
⑫		TRANSFORMADOR REBAIXADOR

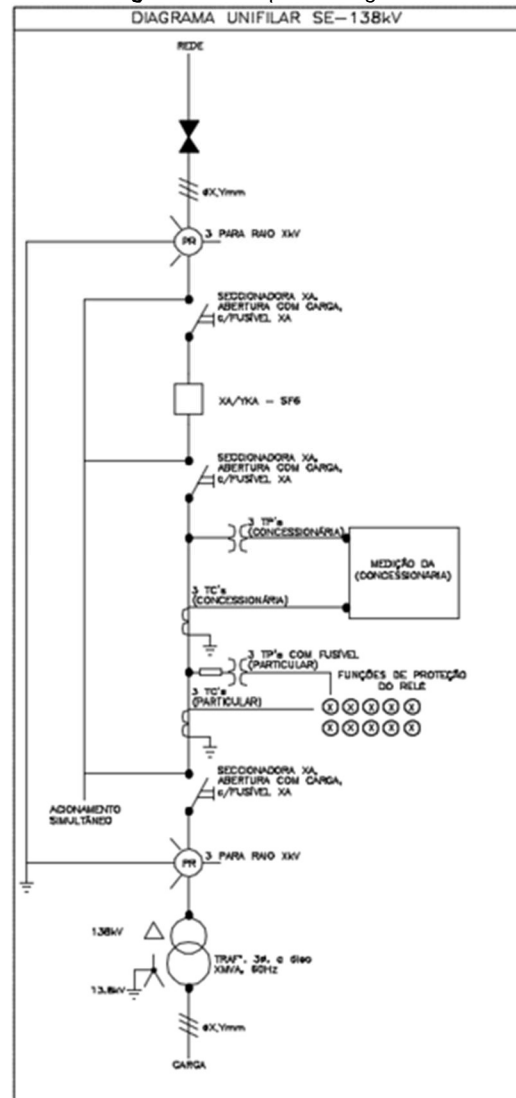
Fonte: Os Autores

É interessante constar lista de normas de concessionárias de energia locais e as normas gerais da ANEEL, localadas no projeto para que de

fato quando a concessionária local ou contratante precisar localizar alguma informação legal do projeto já diretamente no desenho.

Na próxima imagem demonstraremos um exemplo de diagrama unifilar destacando a forma como está interligado os equipamentos e cabeamento da estrutura de forma que de para entender todo o funcionamento do sistema. É importante ressaltar que este diagrama foi criado pelo grupo e não tem existência do mesmo em nenhum projeto criado, portanto como uso para seguimento de exemplo para criação de o foco do produto com um diagrama de uma subestação comercial.

Figura 7 - Exemplo de Diagrama

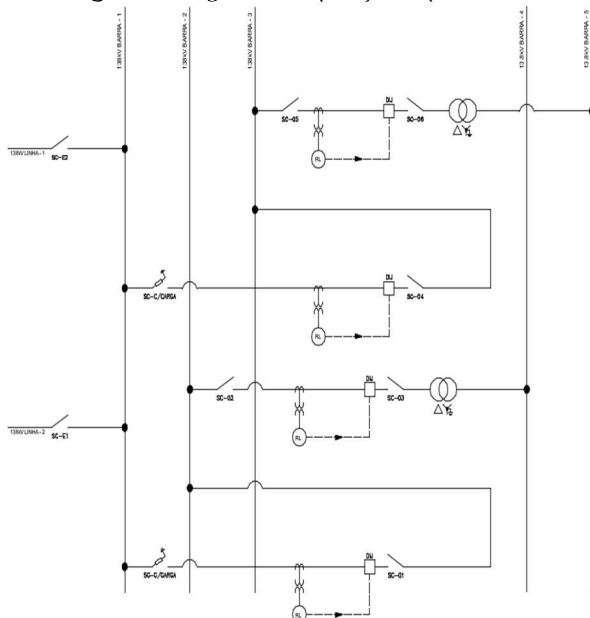


Fonte: Os Autores

Abaixo deixo um exemplo de diagrama de comando da subestação, neste exemplo é como se usássemos ela como um supervisor para

operação a distância por exemplo. Neste tipo de diagrama é constatado apenas os equipamentos essenciais por onde atuara a corrente como os disjuntores, seccionadoras, transformadores e barramentos.

Figura 8 - Diagrama de Operação Supervisório



Fonte: Os Autores

Infere-se, portanto, que os diagramas, como mencionado anteriormente, têm um duplo propósito: servem como referência para a concessionária aprovar o projeto e como guia para aqueles que irão operar a usina ou indústria como um todo, incluindo o engenheiro local da empresa. Além disso, eles desempenham um papel importante na identificação de equipamentos e na detecção de possíveis problemas.

É fundamental destacar as diferenças entre os diagramas, pois temos o diagrama de projeto e o diagrama de operação. A principal distinção entre eles reside no fato de que um é específico para o projeto, enquanto o outro é voltado para a operação do sistema e da subestação como um todo. O diagrama de projeto é essencialmente uma representação visual do sistema planejado, fornecendo informações detalhadas sobre a disposição dos componentes e suas conexões. Já o diagrama de operação atua como um supervisor, permitindo o monitoramento e controle das cargas por meio de dispositivos de chaveamento.

Esses diagramas desempenham um papel crucial no planejamento, construção e operação de instalações elétricas, facilitando a compreensão da estrutura do sistema e garantindo um

funcionamento seguro e eficiente. Eles também são valiosos recursos de documentação, permitindo a fácil localização de equipamentos e a rápida identificação de eventuais problemas durante a operação diária.

Em suma, os diagramas de projeto e de operação são ferramentas essenciais para a aprovação, construção e operação de sistemas elétricos.

Eles servem como referência para a concessionária, guia para os operadores e auxiliam na identificação de equipamentos e solução de problemas. É importante compreender suas diferenças e reconhecer sua importância na gestão eficaz de subestações e instalações industriais.

2.17 Lista de Materiais

No dimensionamento de estruturas civis, como pórticos e outras estruturas que abrigam transformadores, é crucial incluir uma lista de materiais como parte da responsabilidade da engenharia. Essa lista deve abranger as cotações de marcas específicas de relés, levando em consideração que a concessionária local pode exigir funções específicas que apenas determinadas marcas de relés podem fornecer.

As listas de materiais são de extrema importância para o projeto como um todo. Além de enumerarem todos os itens necessários para a subestação, elas também nos fornecem uma referência caso haja falta de algum item. Dessa forma, podemos consultar e buscar a substituição do equipamento ou componente, seja para mantê-lo como reserva ou para realizar a substituição necessária.

Essas listas de materiais desempenham um papel fundamental na garantia do suprimento adequado de equipamentos e na prevenção de atrasos ou interrupções no projeto. Elas fornecem um inventário completo dos componentes necessários, permitindo uma gestão eficiente de estoque e facilitando a tomada de decisões caso ocorram imprevistos ou problemas durante a construção ou operação da subestação.

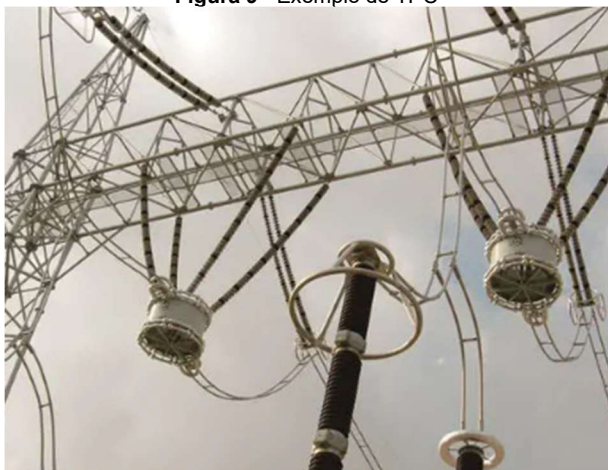
Em resumo, a inclusão de listas de materiais específicos, como cotações de marcas de relés, é essencial para o dimensionamento de estruturas civis em projetos de subestações. Essas listas garantem a conformidade com as exigências da concessionária local e fornecem uma referência útil para aquisição e substituição de equipamentos.

Além disso, elas desempenham um papel crucial na gestão de estoque e na prevenção de atrasos no projeto.

2.18 Filtros de Onda de Frequência ou Bobina de Bloqueio – TPC (Transformador de Potencial Capacitivo)

As estruturas dimensionadas para evitar a mistura de frequências e garantir a integridade das tensões de operação são de extrema importância em subestações que trabalham com diferentes frequências. Seu objetivo principal é assegurar que não ocorram modificações indesejadas nos valores de tensão e frequência, preservando a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico. Essas estruturas são especialmente relevantes quando há transformadores de TAP ou equipamentos que requerem níveis específicos de frequência ou tensão. Ao prevenir interferências entre frequências, elas contribuem para o funcionamento adequado do sistema e evitam problemas operacionais. Na figura 9, encontra-se um exemplo de modelo de um TPC conectado à rede de uma subestação.

Figura 9 - Exemplo de TPC



Fonte: www.directindustry.com

2.19 Dimensionamento de Para-Raios

O para-raios em subestações deve ser dimensionado para a proteção de um circuito elétrico através de uma descarga atmosférica em um determinado local utiliza-se os para-raios para que não seja danificado nenhum equipamento no local.

Ele consiste em um dispositivo destinado a proteger o sistema elétrico contra sobretensões transitórias elevadas e a limitar a duração e a intensidade da corrente subsequente.

O dimensionamento adequado dos para-raios é fundamental para garantir a proteção dos equipamentos e otimizar o custo-benefício de sua aquisição. Para selecionar e aplicar os para-raios corretamente em subestações, é necessário seguir alguns passos específicos.

Em primeiro lugar, é importante escolher as características de operação e proteção dos para-raios com base nas características dos sistemas em questão. Isso envolve considerar a tensão nominal e a máxima tensão contínua de operação, levando em conta a máxima tensão do sistema e as possíveis sobretensões temporárias que podem ocorrer no ponto de aplicação dos para-raios.

Além disso, é necessário determinar a corrente de descarga nominal dos para-raios e sua capacidade de absorção de energia. Essa capacidade de absorção deve ser calculada levando em consideração as energias que os para-raios precisarão absorver durante a ocorrência de sobretensões atmosféricas e manobras.

No caso de subestações conectadas a linhas blindadas a amplitude da corrente de descarga do para-raios pode ser estimada por: (RICHARD,2011)

$$I_{max} = I_c = (2,4 * U_{cfo} - V_r) / Z_o \quad (11)$$

Em que:

I_{max} = Corrente de descarga

I_c = Corrente de coordenação

U_{cfo} = Tensão disruptiva

V_r = Tensão residual dos para-raios

Z_o = Impedância de surto da linha

Também é fundamental considerar as características de proteção para sobretensões atmosféricas e de manobra, assim como os requisitos de alívio de sobre pressão ou corrente suportável de falta.

Por fim, é necessário levar em conta as condições ambientais de serviço durante a seleção e aplicação dos para-raios.

Portanto, ao seguir esses passos, é possível realizar a seleção adequada dos para-raios, levando em consideração o nível de proteção desejado e a capacidade de absorção de energia necessária.

2.20 Banco de capacitores

É importante tomar algumas medidas em relação ao baixo fator de potência indicado pela multa na fatura de energia. O primeiro passo é determinar o fator de potência atual, que está abaixo do valor mínimo aceitável de 0,92. Isso pode ser feito através da utilização de um Analisador de redes Elétricas ST9600R, que permite medir e gerar um relatório de Falta de KVAR, indicando a quantidade de capacitores necessários.

Caso não seja possível contar com essa ferramenta, é possível fazer o cálculo

manualmente. Na fatura, estão disponíveis os valores de consumo ativo (KWh) e reativo (KVAh). Através da equação $KVAh = \sqrt{(KWh^2 + KVARh^2)}$, é possível calcular o consumo aparente (KVAh). Em seguida, dividindo KWh por KVAh, obtém-se o fator de potência.

Com o conhecimento do problema e do fator de potência inadequado, é necessário determinar o valor de capacitores necessário. Esse valor é obtido através da Falta de KVA, que pode ser calculada pelo Analisador de Redes Elétricas ou, alternativamente, verificando a potência ativa média e multiplicando o valor de KW pela tabela apropriada para determinar a quantidade de KVA necessários. Na tabela 3, está demonstrado a relação entre os fatores de potência anual e desejado, juntamente com o valor ao qual potência ativa deve ser multiplicada. (SULTECH, 2022)

Tabela 3 – Tabela de consulta para Fator de potência

		FATOR DE POTÊNCIA DESEJADO									
		0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	
FATOR DE POTÊNCIA ANUAL	0,50	1,306	1,337	1,369	1,403	1,440	1,481	1,529	1,590	1,732	
	0,51	1,261	1,291	1,324	1,358	1,395	1,436	1,484	1,544	1,687	
	0,52	1,217	1,247	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500	1,643	
	0,53	1,174	1,205	1,237	1,271	1,308	1,349	1,397	1,458	1,600	
	0,54	1,133	1,163	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416	1,559	
	0,55	1,092	1,123	1,156	1,190	1,227	1,268	1,315	1,376	1,518	
	0,56	1,053	1,084	1,116	1,151	1,188	1,229	1,276	1,337	1,479	
	0,57	1,015	1,046	1,079	1,113	1,150	1,191	1,238	1,299	1,441	
	0,58	0,979	1,009	1,042	1,076	1,113	1,154	1,201	1,262	1,405	
	0,59	0,942	0,973	1,006	1,040	1,077	1,118	1,165	1,226	1,368	
	0,60	0,907	0,938	0,970	1,005	1,042	1,083	1,130	1,191	1,333	
	0,61	0,873	0,904	0,936	0,970	1,007	1,048	1,096	1,157	1,299	
	0,62	0,839	0,870	0,903	0,937	0,974	1,015	1,062	1,123	1,265	

Vamos considerar um exemplo: se meu fator de potência atual é 0,60 e desejo aumentá-lo para 0,96, posso multiplicar minha potência ativa (KW) por 1,042.

Para obter esses valores da tabela, normalmente usamos trigonometria, mas, por enquanto, vamos deixar isso de lado e ser mais práticos.

Agora tenho uma ideia aproximada de quanto capacitores em KVA são necessários. Essa estimativa não é precisa, pois fizemos algumas simplificações, mas é a melhor aproximação possível sem usar um equipamento de medição. Além disso, serão necessários contadores, fusíveis e um controlador, pois aprendemos em outros artigos que o controle automático melhora a eficiência da compensação de potência reativa.

Para calcular a corrente dos contadores, podemos utilizar a norma IEC831-1, que estabelece que a sobrecarga pode ser de 30%, ou seja, o capacitor pode absorver uma corrente 1,3 vezes a nominal. Considerando a tolerância média dos

capacitores de 10%, temos outro fator multiplicador de 1,1.

De acordo com Mamede (2021) a corrente nominal do contato deve ser multiplicada por 1,43 para suportar a sobrecarga. Por exemplo, se a corrente do barramento é de 100 Amperes, então o contato mínimo deve suportar pelo menos 143 Amperes. O fusível deve suportar uma corrente 1,65 vezes maior que a corrente nominal. No exemplo acima, o fusível teria que ser maior que 165 A.

Agora, vamos falar sobre o controlador; precisamos definir o número de estágios. Embora não haja uma norma específica, o bom senso indica que quanto mais estágios utilizarmos, mais preciso será o ajuste, pois os valores dos capacitores em cada estágio serão menores.

Podemos montar os estágios iguais, com valores crescentes ou decrescentes. Novamente, não há uma regra fixa. Se a correção necessária for significativa, pode ser razoável ter estágios diferentes, pois haverá estágios maiores que realizarão o ajuste geral e capacitores menores que realizarão o ajuste fino. Se os estágios são crescentes ou decrescentes, não importa, desde que o controlador seja de uma marca confiável, pois ele sempre fará a conexão ideal, independentemente da posição do capacitor na sequência.

Se o valor a ser compensado for pequeno, o uso de estágios iguais pode facilitar a rotação dos bancos de capacitores e aumentar sua vida útil.

2.21 Seccionadoras

As seccionadoras são dispositivos utilizados para energizar e desenergizar circuitos elétricos de potência, tanto sem carga quanto com carga na linha. Atualmente, essas seccionadoras seguem as normas regulamentadoras (NR) estabelecidas pelas concessionárias locais. Essas normas regulam aspectos como nomenclatura, tipo de fechamento, isolamento e instalação das seccionadoras.

As seccionadoras são projetadas para operar dentro de níveis aceitáveis de corrente e tensão, dependendo do tipo de operação a que são submetidas. É essencial que sejam adequadamente isoladas e aterradas, pois elas representam os pontos iniciais de descarga na malha do circuito.

A nomenclatura das seccionadoras, incluindo siglas e números, é estabelecida pelas concessionárias, seguindo critérios específicos para a nomeação de diagramas de operação e projetos. Essa nomenclatura indica o tipo de seccionadora, como fechamento vertical ou

horizontal, bem como a função que ela desempenhará. É importante ressaltar que as seccionadoras são operadas pela concessionária local, uma vez que a rede está interligada à subestação privada ou de propriedade da concessionária.

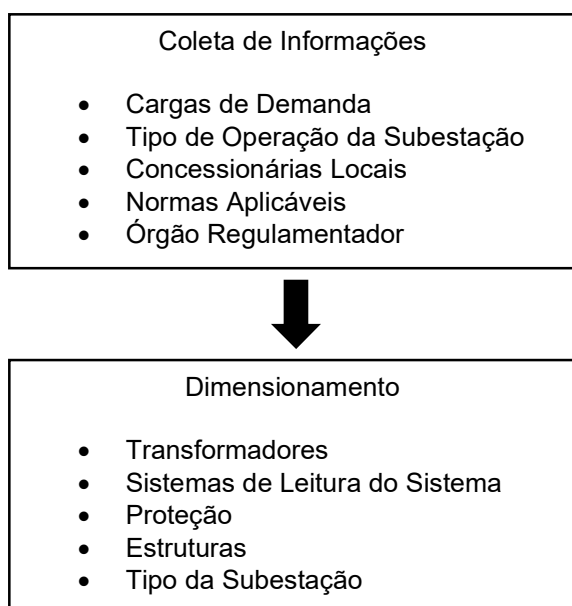
3 Metodologia Descrita

Para se desenvolver um projeto de subestação deve-se conhecer exatamente qual o passo a passo para que se possa ter maior exatidão e facilidade durante o processo.

Utilizando todo o referencial teórico mostrado anteriormente, é possível seguir por todo o caminho de desenvolvimento, consultando os principais tópicos necessários para a solução de dúvidas e de possíveis problemas durante a criação de sua subestação.

Na figura 12, mostra qual é o passo a passo que deve ser seguido para que seja possível ter o início e a conclusão do projeto sem grandes problemas.

Figura 12 – Fluxograma de Desenvolvimento do Projeto



Fonte: Os Autores

O primeiro passo para o desenvolvimento de um projeto de subestação é conhecer as necessidades do cliente e os recursos disponíveis para a construção, para isso o primeiro passo é coletar informações, como por exemplo um dos principais pontos necessários, a carga de demanda, a partir da tabela 1 do referencial teórico, é possível visualizar algumas informações úteis para que se entenda onde buscar e como interpretar esses dados, deve-se também saber qual o tipo de

operação da subestação como explicado no tópico 2.1 e qual concessionária deve-se consultar para obter as normas a serem seguidas, na tabela 2 do referencial teórico são apresentados diversos exemplos de concessionárias espalhadas pelo país.

Após a obtenção dos dados básicos do projeto, deve-se dimensionar os equipamentos que serão usados na subestação, sendo eles os transformadores, disjuntos, estruturas ou outros tipos de itens que contemplados em diversos tópicos do trabalho, como no 2.5, 2.10, 2.11, 2.12, 2.18 e 2.19, nos quais são explicados quais os pontos que devem ser consultados para a realização correta do dimensionamento, juntos com fórmulas e imagens ilustrativas.

2.22 Resultados

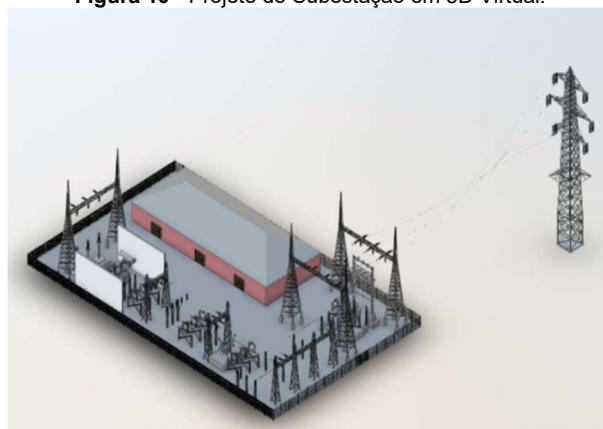
Os resultados que obtivemos com o levantamento e sistematização dos dados permitiram que nós, do grupo, desenvolvêssemos um projeto modelo de subestação tanto no formato *BIM* quanto no formato comercial. Esse projeto inclui unifilares e dimensionamentos de equipamentos.

O projeto que criamos é apenas simbólico, servindo como uma representação do projeto real que seria realizado na plataforma *BIM* disponível gratuitamente para uso e estudo interno em nossa faculdade.

Sendo assim, abaixo disponibilizamos uma imagem ao projeto BIM para observação e análise detalhada.

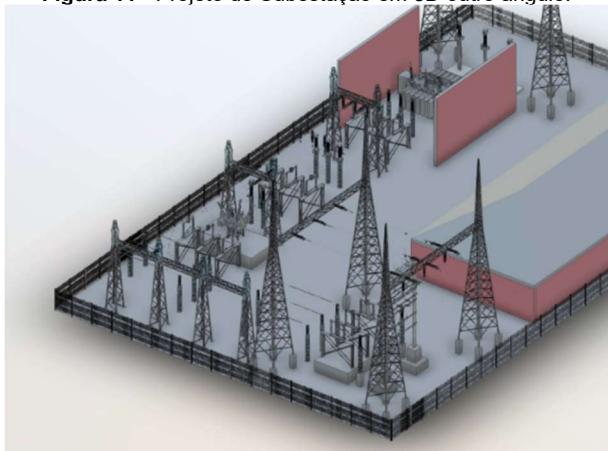
Nas figuras 9 e 10 abaixo, encontram-se imagens retiradas no nosso projeto, no qual foi produzido utilizando toda a teoria e passo a passo descrito neste trabalho.

Figura 10 - Projeto de Subestação em 3D Virtual.



Fonte: Os Autores

Figura 11 - Projeto de Subestação em 3D outro ângulo.



Fonte: Os Autores

2.23 Software para dimensionamento e Cálculo de Projetos

No universo da engenharia, existem alguns softwares que possam facilitar a criação do projeto, tanto parte de cálculo quanto detalhamento de estrutura e dimensionamento, alguns desses softwares são;

- **Autodesk REVIT**; Software também usado para detalhamento 3D, porém com mais vantagens de trabalho pois é de uma nova tecnologia chamada *BIM* (Building Information Model), ou seja, são softwares que trabalham com uma forma mais sintetizada e mais produtiva, tendo um detalhamento 3D mais preciso.

4 Discussão

Para a realização deste trabalho, enfrentamos inúmeros desafios, desde a concepção da ideia até a compilação dos documentos necessários para sua execução.

Nesse sentido, nós, do grupo, nos empenhamos em desenvolver esta metodologia, buscando agregar todo o conhecimento oferecido pela universidade e a experiência prática adquirida em estágios e projetos. Sintetizamos esse conhecimento de forma a criar um guia passo a passo para a elaboração de projetos semelhantes. Como resultado, alcançamos objetivos além das nossas expectativas, conseguindo condensar a ideia de maneira concisa e garantir um conhecimento aprofundado sobre o tema que abordamos.

5 Conclusão

Infere-se, portanto, diante dos desafios enfrentados e do empenho do grupo, foi possível obter resultados significativos no desenvolvimento deste trabalho. Através do levantamento e

sistematização dos dados, conseguimos criar um projeto modelo de subestação nos formatos BIM e comercial, englobando unifilares e dimensionamentos de equipamentos. Embora seja uma representação simbólica, o projeto serviu como uma demonstração do potencial da plataforma BIM e foi disponibilizado gratuitamente para uso e estudo interno em nossa faculdade.

Essa conquista foi alcançada graças à metodologia desenvolvida, que incorporou o conhecimento adquirido na universidade e a experiência prática obtida em estágios e projetos anteriores. A síntese desse conhecimento resultou em um guia detalhado e passo a passo para a elaboração de projetos semelhantes.

Nossos objetivos foram superados, pois conseguimos apresentar a ideia de forma concisa, garantindo um profundo entendimento do tema abordado. Ao final deste trabalho, temos a satisfação de compartilhar o acesso ao projeto BIM para observação e análise detalhada, acreditando que nossa contribuição possa estimular novas pesquisas e avanços na área.

Referências

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-Circuito**. v2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

MAMEDE, João. **Subestações de Alta Tensão**, v1, ed. Rio de Janeiro, 2021.

MAMEDE, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**, v5, ed. Rio de Janeiro, 2022.

MARDEGAN, Cláudio. **Dispositivos de proteção – Parte 1**: parte 1. Itajubá: -, 2010. 37 p. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/05/Ed50_marco_protecao_s_eletividade_capIII.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.

DIMATIC PERÙ (Perú). **TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA TRIFÁSICOS**: transformadores eléctrico. Pasaje El Sol 220 Callao: 2021. 1p. Disponível em: <https://www.dimaticperu.com/fabricantes-transformadores-elevador-de-potencia-electricos-trifasicos-monofasico-5-15-25-37-5-50-60-75-125-150-225-250-315-450-500-630-700-750-800-1500-2000-kva-en-aceite-normalizadas-pedestal-tipos/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PROENGE (Pr). -. **O que é um Coordenogramas de Sobrecorrente?**: o que é um coordenograma?. Londrina:1p. Disponível em: <https://www.proengecursos.com.br/noticia/o-que-e-um-coordenogramas-de-sobrecorrente/>. Acesso em: 15 mar. 2023.

Cunha, Leandro Veloso. 2010. Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura a meio de vão. Belo Horizonte : Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Dissertação de Mestrado, 2010.

SULTECH. **Calculo simplificado de um banco de capacitores**: ,2022. Disponível em: <https://sultech.com.br/calculo-simplificado-de-um-banco-de-capacitores/>. Acesso em: 25 jun. 2023.

BALESTRO (2010). **Pararraios Poliméricos para Linhas de Transmissão (TLA)**. Disponível em: <http://balestro.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Para-raios-Polim-Linhas-Transm-TLA-PBPE-LT.pdf/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

COLEON, Richard. **Para-raios para aplicação em Subestações**: 2011. 1p. Disponível em: www.richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/cap3adtulo-5.pdf/. Acesso em: 02 jul. 2023.