

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS DA COSTA NEUHAUS

**PROJETO DE UMA PLANTA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE
ALTA POTÊNCIA CONECTADA EM TENSÃO PRIMÁRIA DE
DISTRIBUIÇÃO**

UBERLÂNDIA - MG

2021

MATHEUS DA COSTA NEUHAUS

**PROJETO DE UMA PLANTA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE
ALTA POTÊNCIA CONECTADA EM TENSÃO PRIMÁRIA DE
DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia como parte das
exigências para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende

UBERLÂNDIA - MG

2021

MATHEUS DA COSTA NEUHAUS

**PROJETO DE UMA PLANTA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE
ALTA POTÊNCIA CONECTADA EM TENSÃO PRIMÁRIA DE
DISTRIBUIÇÃO**

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Paulo Henrique Oliveira Rezende – PhD (UFU)

Prof. Isaque Nogueira Gondim – PhD (UFU)

Eng. Vinícius Henrique Farias Brito – MsC (UFU)

UBERLÂNDIA – MG

2021

Dedico este trabalho ao Deus de Abraão, de Isaque e de Jacó que é o Deus de Israel, que veio a terra em forma de homem: o nosso Senhor Jesus Cristo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus de Abraão, de Isaque e de Jacó, que veio a terra: o nosso Senhor Jesus Cristo, pelas inúmeras bênçãos ao longo de minha trajetória acadêmica, e durante todo este período que se materializa neste trabalho. Por permitir a conclusão deste curso, e de me permitir realizar um sonho pessoal, mesmo diante de todas as adversidades que permearam estes últimos anos. Ao longo de minha graduação, recebi incondicionalmente o importante apoio, de toda a minha família: meu pai Carlos Guiar Neuhaus, minha mãe Lissandra Mara da Costa Neuhaus e meu irmão Henrique da Costa Neuhaus juntamente com meu avô Ari da Costa e minha avó Clair Teresinha da Costa, os quais eu agradeço imensamente.

“Porque para mim o viver é Cristo, e o morrer é lucro.”

Filipenses 1:21

RESUMO

O objetivo deste trabalho é reunir em um documento, os métodos e técnicas práticas de construção de uma subestação conectada em tensão primária de distribuição amparada pelas normas técnicas vigentes, com foco no desenvolvimento completo de uma planta de geração fotovoltaica de 1 MVA com demanda inicial de 525 kVA. O trabalho contempla a obtenção dos dados de curto-circuito no ponto de entrega, a estratificação do solo, o dimensionamento da malha de aterramento, o levantamento técnico, a planta de localização, o projeto do diagrama unifilar da planta de geração, a especificação das funções de proteção e seus valores, o projeto e dimensionamento do sistema de proteção, apresentação do coordenograma de proteção para as funções 50/51, 50N/51N e para a 67/67N, a planta baixa, o projeto mecânico e o projeto eletromecânico de todos os componentes que fazem parte da planta de geração fotovoltaica.

A motivação para compor o presente, se encontra na crescente inserção das plantas de geração fotovoltaica na matriz energética brasileira estimulada pela alta rentabilidade do investimento e pela busca de fontes de energia renováveis que criam uma alta demanda técnica quanto a sua viabilização. A concessionária, no que lhe concerne, encara esta mudança como um grande desafio de engenharia por transformar seu sistema elétrico de distribuição, anteriormente radial, agora, em anel. Esta mudança acarreta um maior preparo da equipe de engenharia, gerando até mesmo revisões nas normas técnicas das concessionárias

Palavras-chave: Minigeração Fotovoltaica. Normas Técnicas. Geração Distribuída. Proteção e Seletividade. Aterramentos Elétricos. Eletromecânico.

ABSTRACT

The objective of this work is to bring together in only one document, all the methods and practical techniques for the construction of a substation connected to primary voltage distribution supported by current technical standards, focusing on the complete development of a 1 MVA photovoltaic generation plant with initial demand for 525 kVA. This work includes obtaining the short-circuit data at the point of delivery, the soil stratification, the dimensioning of the grounding mesh, the technical survey, the location plan, the design of the single-line diagram of the generation plant, the specification of the protection functions and their values, the design and dimensioning of the protection system, presentation of the protection coordination for the functions 50/51, 50N/51N and for the 67/67N, the floor plan, the mechanical design and the electromechanical design of all the components that are part of the photovoltaic generation plant.

This paper was motivated by the growing insertion of photovoltaic generation plants in the Brazilian energy matrix, stimulated by the high return on investment and by the search for renewable energy sources, creates a high technical demand in terms of their feasibility. On the political horizon, government decisions prove to be decisive for the project's success, which generally generates insecurity in Brazil. The electric utility faces all this change as a major engineering challenge for transforming its electrical distribution system, previously radial, now, in a ring. All this change leads to greater preparation of the engineering team, even generating changes in the technical standards of the electric utility. The objective of this work is to bring together in one document, the methods and practical techniques for the construction of a substation connected to a primary distribution voltage supported by all the the technical standards available.

Keywords: Photovoltaic mini-generation. Technical Standards. Distributed generation. Protection and Selectivity. Electrical Grounding. Electromechanical.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes Básicos da planta de geração	23
Figura 2 - Propriedade Química de Semicondutores.....	25
Figura 3 - Dopagem do silício	26
Figura 4 - O efeito fotoelétrico	27
Figura 5 - Estrutura comum em módulos fotovoltaicos	27
Figura 6 - A junção pn.....	28
Figura 7 - A curva I-V e seu ponto de máxima transferência de potência	29
Figura 8 - A influência da temperatura em uma célula fotovoltaica de silício cristalino.....	30
Figura 9 - Barramento Simples.....	35
Figura 10 - Ponto de Entrega COPEL.	37
Figura 11 - Lote da planta de situação.....	38
Figura 12 – Foto Aérea.....	38
Figura 13 - Desenho CAD da subestação com entrada em ramal aéreo.....	39
Figura 14 - Planta baixa da subestação em Alvenaria.....	41
Figura 15 - Lançamento Dos Equipamentos De Segurança	42
Figura 16 - Estratificação do Solo	47
Figura 17 - Potencial de Toque.....	51
Figura 18 - Potencial de Passo.....	52
Figura 19 - Malha de Aterramento Inicial.	53
Figura 20 - Detalhe da malha de aterramento.....	53
Figura 21 - Diagrama Unifilar da Planta.	69
Figura 22 - Detalhe da Interface Cliente-Concessionária.....	70
Figura 23 - Detalhe cubículos de medição e proteção.....	70
Figura 24 - Detalhe subestação skid	71
Figura 25 - Detalhe subestação de serviços auxiliares	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados contidos na etiqueta de um módulo.....	31
Tabela 2 - Dados técnicos de módulos.	31
Tabela 3- Arranjos das Subestações	34
Tabela 4 - Proteção Contra Sobretensões.	35
Tabela 5 - Ensaio de recebimento.....	36
Tabela 6 - Resistência do solo.	42
Tabela 7 - Resistividade do Solo	43
Tabela 8 - Estudo de Curto-Circuito no Ponto de Entrega\.....	48
Tabela 9 - Parametrização da Proteção nos Alimentadores.	48
Tabela 10 - Capacidade de Condução do Condutor de Aterramento	50
Tabela 11 - Especificações Disjuntor	55
Tabela 12 - Especificação Chave Seccionadora	56
Tabela 13 - Especificação do Transformador de Potencial	56
Tabela 14 - Especificação Transformador de Corrente	57
Tabela 15 - Capacidade de Condução de Barramentos	57
Tabela 16 - Capacidade de Condução de Barras Chatas em Cobre.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
UFV	Central Geradora Fotovoltaica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	20
1.1	Disjuntores.....	20
1.2	Para-raios	21
1.3	Chaves Seccionadoras	22
1.4	Resistores e Reatores de Aterramento	22
1.5	Transformadores de Aterramento	22
1.6	A Planta De Geração Fotovoltaica	23
2	PRINCIPAIS COMPONENTES DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	25
2.1	Módulos fotovoltaicos	25
2.1.1	A dopagem de materiais semicondutores	26
2.1.2	Efeito Fotoelétrico	26
2.1.3	A célula fotovoltaica.....	27
2.1.4	Análise de células fotovoltaicas.....	28
2.1.5	Temperatura e Eficiência	29
2.1.6	Módulo Fotovoltaico	30
2.2	Conversores de frequência.....	31
3	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS SUBESTAÇÕES	33
3.1	Conceitos gerais	33
3.2	Diferentes tipos de arranjos de barramentos.....	34
3.3	Sistema de proteção contra sobretensões	35
4	LEVANTAMENTO TÉCNICO DA SUBESTAÇÃO	37
4.1	Escolha do tipo da Subestação.....	39
4.2	Segurança e manutenção.....	39
4.3	Projeto executivo da subestação	41
5	PROJETO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO	42
5.1	Sondagem Elétrica Vertical e Modelagem Geométrica do Solo	42
5.2	Informações sobre o nível de curto-circuito e parametrização do sistema de proteção para falta a terra.....	48
5.3	Dimensionamento da malha de aterramento	49
6	PROJETO ELETROMECAÂNICO	55
7	SISTEMA DE PROTEÇÃO E SUAS FUNÇÕES	59
7.1	Função de proteção de acordo com a nomenclatura ANSI.....	60

7.1.1	Função 67 – Relé Direcional de Corrente.....	60
7.1.2	Função 67N – Relé Direcional de Corrente de Neutro.....	61
7.1.3	Função 51 – Relé de Sobrecorrente Temporizada de Fase.....	62
7.1.4	Função 50 – Relé de Sobrecorrente Instantânea de Fase.....	62
7.1.5	Função 51N – Relé de Sobrecorrente Temporizada de Neutro	62
7.1.6	Função 50N – Relé de Sobrecorrente Instantânea de Neutro	63
7.1.7	Função 51V – Sobrecorrente com Restrição de Tensão	63
7.1.8	Função 27 – Subtensão	63
7.1.9	Função 59 – Sobretensão	63
7.1.10	Função 59N – Sobretensão de neutro	64
7.1.11	Função 81O/U – Sobrefrequência e Subfrequência.....	64
7.1.12	Função 46 – Relé de Desbalanceamento de Corrente	64
7.1.13	Função 47 – Relé de Desbalanceamento de Tensão.....	65
7.1.14	Função 98 – Oscilografias	65
7.1.15	Função 25 – Sincronismo e Anti-ilhamento	65
7.2	Transformadores para proteção	65
7.2.1	Transformadores de corrente	65
7.2.2	Transformadores de potencial.....	67
7.3	Coordenograma de proteção com os ajustes realizados.....	67
8	DIAGRAMA UNIFILAR COMPLETO	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR	74
	ANEXO B – COORDENOGRAMA DE FASE	75
	ANEXO C – COORDENOGRAMA DE NEUTRO	76

1 INTRODUÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

As subestações possuem em seu pátio diversos equipamentos que realizam o monitoramento, controle, seccionamento e proteção que garantem o correto funcionamento do sistema. Os equipamentos primários da subestação são aqueles que operam no maior nível de tensão da subestação, sendo que existem 5 destes níveis que são:

Ultra alta tensão: Quando a tensão de linha do sistema é maior que 765kV.

Extra alta tensão: Quando a tensão de linha do sistema é maior que 300kV e menor que 765kV.

Alta tensão: Quando a tensão de linha do sistema é maior que 52kV e menor que 300kV.

Média tensão: Quando a tensão de linha do sistema é maior que 1kV, mas menor que 52kV.

Baixa tensão: Quando a tensão de linha do sistema é menor que 1kV.

Os equipamentos que fazem parte das subestações são construídos com materiais que suportam, sem que haja a quebra de sua rigidez dielétrica, os níveis de tensão especificados anteriormente, de acordo com a sua classe de tensão. Nas próximas seções haverá o detalhamento de aspectos construtivos e operacionais de cada um deles, mostrando como cada dispositivo opera na prática.

1.1 Disjuntores

Os disjuntores são dispositivos que têm por função interromper um circuito sob condições de sobrecarga ou durante um defeito, suportando as solicitações elétricas provenientes da alta corrente de um curto-circuito e extinguindo possíveis arcos elétricos que podem ser gerados durante o seccionamento. Todo disjuntor é acompanhado de um relé de proteção, responsável por enviar o TRIP ao disjuntor para que este abra o circuito. Os disjuntores possuem vários métodos de isolamento, sendo eles: a óleo, ar comprimido, a vácuo e a hexafluoreto de enxofre.

Os disjuntores a vácuo são utilizados por conta da alta rigidez dielétrica que o vácuo oferece, para que haja a extinção de arcos elétricos. O arco se forma por conta da ionização dos materiais metálicos que compõem os contatos de abertura do disjuntor. Quando a onda senoidal de corrente se aproxima de zero, há uma condensação destes vapores metálicos, de modo que o arco decresce proporcionalmente ao decréscimo de corrente. Deste modo, na ausência destes materiais metálicos, o arco é então extinto pela grande suportabilidade dielétrica oferecida pelo vácuo.

Os disjuntores a óleo utilizam-se do aumento da densidade de corrente na região de abertura dos contatos, para provocar o aquecimento do óleo e a ionização do meio isolante, de forma que haja a vaporização do mesmo. A reação é endotérmica e a mistura de gases resultantes desta vaporização possui efeito de absorver calor, realizando o refrigeração e a devida extinção do arco. As câmaras de interrupção são as responsáveis por extinguir os arcos elétricos, que podem ser do tipo câmara de sopro transversal ou câmara de sopro axial. Nas de sopro transversal, há aberturas na estrutura da câmara que conduzem os gases gerados na vaporização do óleo de modo a forçar o arco gerado contra as paredes refrigeradas da câmara, realizando um alongamento do arco e gerando sua extinção. A câmara de sopro axial utiliza o fluxo de óleo, gerado pela pressão decorrente dos gases gerados pelo arco, para realizar a remoção dos gases que foram ionizados nos pólos, através de aberturas, gerando um contínuo fluxo ao longo de toda a circunferência da câmara. Há ainda disjuntores a óleo chamados de PVO (pouco volume de óleo) e os chamados GVO (grande volume de óleo), que se diferencia na sua capacidade de extinção de arcos e de trabalhar com correntes de curto-circuito maiores.

Os disjuntores a hexafluoreto de enxofre (SF_6) utilizam o gás para realizar a extinção do arco, quando os contatos se abrem do disjuntor. Neste local, durante a formação do arco, há uma quantidade de massa de gás, que não conduz de baixa temperatura o que gera uma rápida resposta do gás na recomposição dele mesmo no ponto de abertura. Isto faz com que a rigidez dielétrica do local seja aumentada gradativamente até a completa extinção do arco e impedindo que sobretensões momentâneas o restabeleça.

Os disjuntores de ar comprimido usam o fluxo de ar concentrado na região dos contatos que estão a abrir do disjuntor para resfriar a região que começará a formar o arco, ao mesmo tempo que há a expulsão do gás ionizado naquele local. Este fluxo é gerado pelas câmaras pressurizadas, e que extinguem o arco no momento em que a corrente passa pelo seu zero. Este ar pressurizado é fornecido por um compressor que é conectado ao disjuntor para fornecer o ar comprimido.

1.2 Para-raios

Os para-raios são dispositivos capazes de eliminar sobretensões de alta severidade que percorrem as redes de distribuição ou transmissão. As sobretensões provocam surtos de tensão que geram solicitações elétricas nos diferentes dispositivos ao longo de um sistema elétrico. O dispositivo é visto como um circuito aberto, conectado ao terra. De modo que no momento em que há uma sobretensão, o pára-raio fecha o circuito para o terra, desviando parte da onda de sobretensão e reduzindo a crista da mesma. Isto gera um grampeamento da onda, de forma a

limitar este valor para o valor máximo de suportabilidade dielétricas dos equipamentos internos das instalações elétricas.

1.3 Chaves Seccionadoras

As chaves seccionadoras são dispositivos responsáveis por realizar a abertura, fechamento e aterrar um circuito por meio de uma chave mecânica. Comercialmente, todas as chaves seccionadoras podem ser operadas sob carga. A chave é intertravada mecanicamente ou eletromecanicamente ao disjuntor, que realiza a abertura do circuito a partir do sinal de trip do relé para uma dada corrente de pick-up.

Entre os tipos de chaves de seccionamento existe a de aterramento, operação sob carga, de abertura vertical, de abertura lateral e as que realizam abertura sob carga e realizam o aterramento em seguida. A chave de aterramento ou a chave posicionada na posição ATERRAR, realiza o fechamento do circuito em que ela realizou a abertura para o terra do sistema. Deste modo, seguindo as exigências da NR10, é possível realizar a manutenção ou inspeção do circuito ou do dispositivo. Esse tipo de chave é também chamado de lâmina de aterramento, para as chaves seccionadoras que já possuem a chave de aterramento integrada.

Estas chaves possuem diferentes meios de manobra, podendo ser manual ou automática. Para as chaves manuais, há a necessidade do operador realizar a abertura e fechamento da chave, através de uma alavanca conectada a cada um dos pólos, realizando o seccionamento dos três pólos de uma vez.

1.4 Resistores e Reatores de Aterramento

Os resistores e os reatores de aterramento têm como função limitar a corrente de defeito de uma falta e são aplicados entre o neutro e o terra do sistema. Em geradores síncronos e em instalações fotovoltaicas é muito comum o uso destes dispositivos. O neutro em plantas de geração é comumente solidamente aterrado, em baixa tensão. No entanto, quando em média tensão – com correntes de curto-circuito maiores – há o uso do resistor de aterramento com limitações quanto a sensibilidade do relé para faltas à terra.

1.5 Transformadores de Aterramento

Os transformadores de aterramento são utilizados para que haja a sensibilização do relé para uma falta monofásica, quando a alimentação do circuito é feita por um sistema de distribuição ou transmissão em delta. Isto porquê em uma falta à terra, como o sistema que o alimenta está em delta, não há um caminho de retorno pelo terra ao alimentador. O transformador é sempre ligado em Estrela Aterrada-Delta, sendo que o secundário opera à vazio, garantindo alta impedância para a sequência zero em operação normal, e baixa impedância para a sequência zero em caso de defeito monofásico.

O dispositivo opera de maneira que, ao se conectar o primário nas três fases do alimentador em delta, a sua alta impedância garante que haja apenas a corrente de magnetização em seu primário. No momento de uma falta monofásica, a corrente pode retornar ao neutro da Estrela Aterrada e sabendo-se que esta corrente que flui pelo neutro é de sequência zero, esta será injetada no alimentador. Sabemos ainda que a ligação delta fornece um caminho fechado para a circulação de corrente de sequência zero, deste modo irá aparecer no secundário do transformador de aterramento (ligado em delta) a mesma corrente, e que permitirá a sua leitura.

1.6 A Planta De Geração Fotovoltaica

Os componentes básicos da planta de geração fotovoltaica que este trabalho se dedicará a desenvolver são mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Componentes Básicos da planta de geração



Fonte: Adriano Della Costa , 2021

A planta de geração é segmentada em: subestação de entrada, transformador de potência, a subestação skid e a unidade de geração fotovoltaica. A subestação de entrada é do tipo compacta e blindada que realiza a função de proteção e medição, enquanto é propriamente a interface de conexão entre o acessante e a concessionária. Esta pode ser vista na Figura 1, nas imagens no canto superior e inferior à direita. Na parte central, há o transformador de potência que é responsável por transformar a tensão de 800V em 13,8kV e fazer a devida conexão da planta de geração fotovoltaica ao barramento da concessionária. No canto superior e inferior esquerdo da Figura 1, há uma típica subestação Skid, na qual há um barramento de cobre pintado que conecta todos os inversores ao relé de proteção e ao barramento de baixa tensão do transformador.

No anexo A há o diagrama unifilar da planta de geração fotovoltaica que mostra com detalhes cada segmento da planta de geração. Nele são encontrados a unidade de geração que é

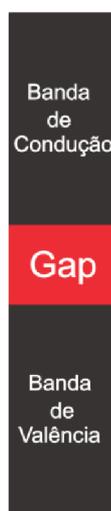
composta por módulos e inversores. Os módulos são da marca HANWHA Q CELLS e o modelo é o Q.PEAK DUO XL-G11.3 com potência nominal de 590 Wp. Os inversores são da marca KSTAR e modelo KSG-250 com potência nominal de 250 kW e tensão de saída de 800V. Os módulos possuem em sua saída uma caixa de proteção CC, que os conecta até o inversor. Os inversores são conectados em um barramento que é conectado no secundário do transformador de potência. Há neste ponto a subestação skid que possui um relé de proteção que faz o monitoramento no barramento de alta tensão do transformador. Neste barramento há uma subestação aérea que alimenta os serviços auxiliares de toda a planta de geração. Há ainda um gerador de emergência que é conectado no barramento de baixa tensão do transformador da subestação aérea responsável por alimentar as cargas especificadas no unifilar. Este gerador possui um intertravamento eletromecânico em conjunto com o disjuntor da subestação de entrada, evitando o ilhamento do mesmo. A subestação de entrada possui dois cubículos: o de medição e o de proteção. No cubículo de medição toda a especificação dos componentes é feita pela concessionária, enquanto o cubículo de proteção é de responsabilidade do acessante. Nele há um relé de proteção monitorando o barramento, há chaves seccionadoras, disjuntor de média tensão, TC e TP de proteção e demais componentes mostrados no Anexo A (diagrama unifilar).

2 PRINCIPAIS COMPONENTES DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

2.1 Módulos fotovoltaicos

Na natureza são encontrados três tipos principais de materiais elétricos: os condutores, isolantes e semicondutores. A diferença fundamental entre eles está na sua característica química na qual define suas propriedades elétricas. Em módulos fotovoltaicos utiliza-se materiais semicondutores dopados, que serão explicados mais a frente, conferindo a estes propriedades condutivas mais interessantes. O semicondutor possui uma banda proibida (GAP) que se trata de uma energia mínima que deve ser dada a este cristal para que o mesmo conduza corrente elétrica, como pode ser vista com detalhes na Figura 2.

Figura 2 - Propriedade Química de Semicondutores



Fonte: O autor.

A condução de corrente elétrica se dá quando elétrons presentes na Banda de Valência, vencem esta barreira (GAP) e passam para a banda de condução. Neste momento, define-se quanto condutor é um material, mensurando a energia necessária para que ocorra o surgimento de corrente. Isolantes possuem uma banda proibida (GAP) na faixa de 6 eV, demandando esta energia mínima para sua condução. Já os semicondutores apresentam uma faixa proibida média de 1 eV, demandando menos energia para a efetiva condução.

Uma característica herdada pelos semicondutores devido a suas bandas de energia é o aumento da condutividade, quando em temperaturas mais altas. Isto acontece por que os elétrons da banda de valência são excitados com a energia térmica incidida, de modo a vencer a barreira energética da banda proibida (GAP).

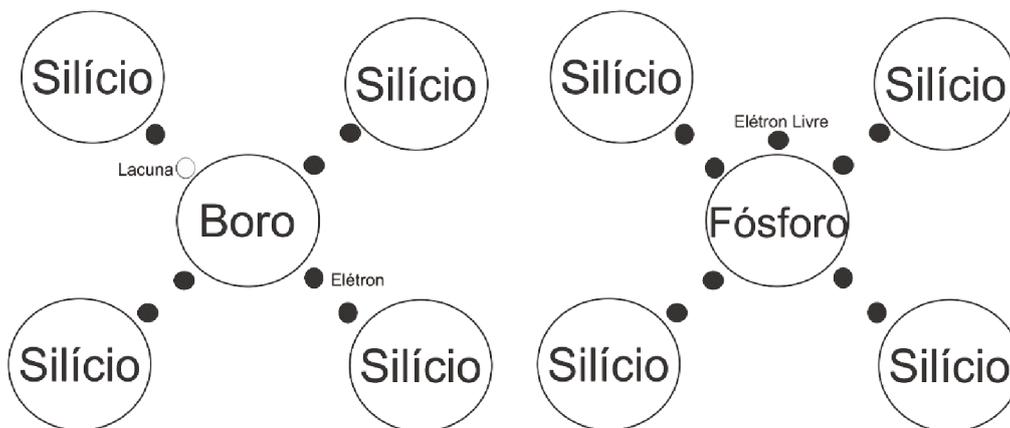
2.1.1 A dopagem de materiais semicondutores

Em painéis fotovoltaicos, o semicondutor utilizado é o silício devido a suas características químicas. Possuindo quatro elétrons na sua camada de valência (a última camada do átomo), estes elétrons se ligam facilmente a outros átomos de diferentes configurações eletrônicas. Um exemplo é o fósforo, que por possuir cinco elétrons, facilmente se liga ao silício de modo a manter um elétron fracamente ligado em sua banda de valência. Por estar doando um elétron, denomina-se o fósforo como um dopante N, caracterizando o silício dopado como semicondutor tipo N.

Contudo, caso o silício fosse dopado com uma substância que tenha apenas três elétrons em sua banda de valência, a exemplo do Boro, chama-se este semicondutor de tipo P. De modo a faltar um elétron para que satisfaça as ligações com a rede de átomos de silício adjacente.

Após a ligação, forma-se neste momento uma rede cristalina de átomos de silício, em volta de átomos de uma substância dopante, independente do seu tipo. A Figura 3 ilustra o mencionado.

Figura 3 - Dopagem do silício



Fonte: O autor

2.1.2 Efeito Fotoelétrico

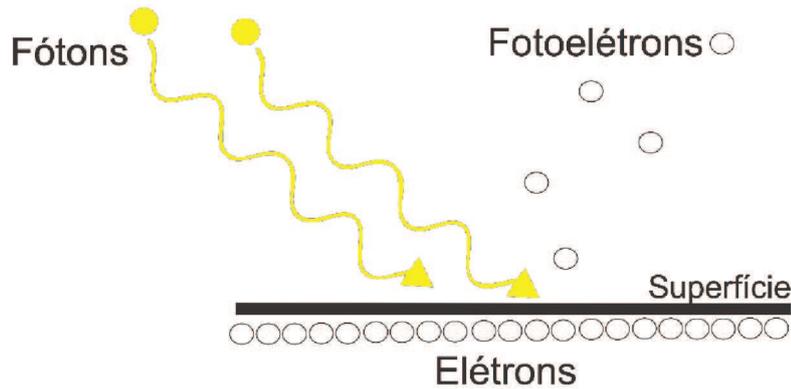
O efeito fotoelétrico é um fenômeno quântico, consistindo na emissão de elétrons por uma superfície, quando esta é exposta a radiações eletromagnéticas com frequências específicas. Por sua vez, os elétrons que são emitidos por esta superfície são chamados de fotoelétrons. O fenômeno ocorre quando fótons, pequenos pacotes de luz, transferem sua energia para os elétrons na superfície do material. Se a energia transferida for maior que a energia necessária para vencer a banda proibida, então, há o surgimento de uma corrente de

fotoelétrons. A energia de cada fóton é dada pelo produto da frequência da onda eletromagnética (f) pela constante de Planck (h).

$$E = h * f \quad [1]$$

A Figura 4 abaixo ilustra o processo de emissão de fotoelétrons, através dos fótons que atingem a superfície.

Figura 4 - O efeito fotoelétrico

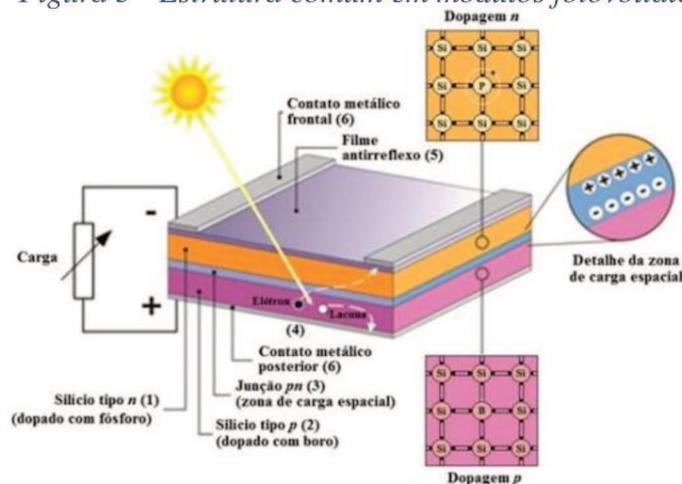


Fonte: O autor

2.1.3 A célula fotovoltaica

Finalmente, após sucessivas dopagens e estudos físicos e químicos, tem-se o módulo fotovoltaico. Sua estrutura é construída de modo a maximizar o efeito fotoelétrico, e garantir a maior eficiência possível. A primeira camada interna do painel solar é constituído de um filme antirreflexivo para que a luz incidente do sol não seja propagada para direções desconhecidas. A camada inferior, consiste em um material semiconductor tipo N tratado junto a um material tipo P. A região intermediária a estas duas placas é a junção PN. As duas camadas externas do painel, trata-se de um contato metálico, utilizado para fechar o circuito com a carga, gerando a corrente elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico, mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Estrutura comum em módulos fotovoltaicos

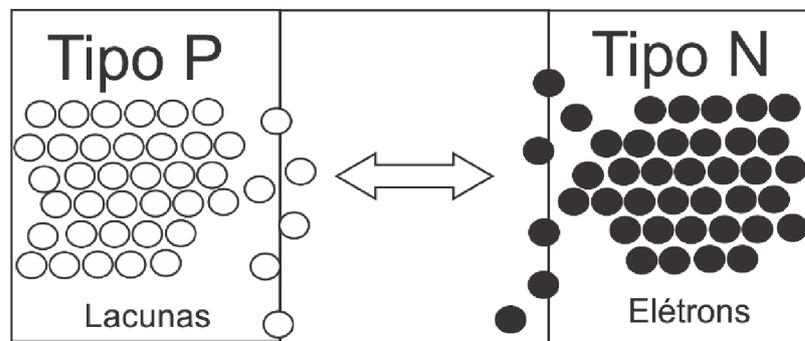


Fonte: Adaptado de (MOEHLECKE e ZANESCO, 2005).

Para se produzir uma junção pn, faz-se necessário uma lâmina de silício já devidamente dopada, de forma a produzir esta junção. Esta dopagem consiste em introduzir átomos do tipo N, em uma placa contendo átomos do tipo P. Na prática, a maior parte das indústrias se utiliza de um forno que opera a alta temperatura, contendo, em seu interior, fósforo em forma gasosa. Esta prática é a mais comum em indústrias, contudo não há problema nenhum em utilizar uma lâmina do tipo N e posteriormente adicionar átomos do tipo P.

Na junção, haverá uma migração dos elétrons presentes no semiconductor tipo N para o semiconductor tipo P. Esta migração ocorre para que se aconteça o preenchimento das lacunas, resultando assim em um equilíbrio de cargas. A Figura 6 ilustra o processo.

Figura 6 - A junção pn.



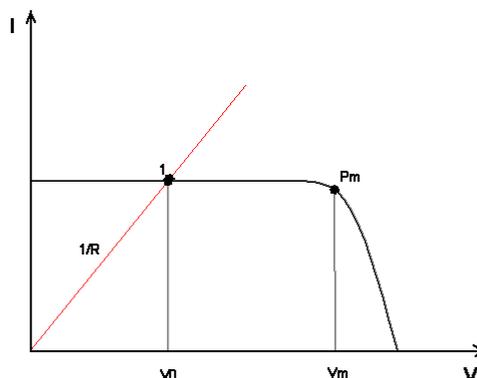
Fonte: O autor.

Este comportamento se finda assim que surge um campo elétrico na área da junção, impedindo assim que os elétrons continuem a fluir. É neste momento que o material recebe energia advinda dos fótons, incidentes na placa, resultando na energização dos elétrons. Quando ambos os semicondutores estão eletricamente conectados, a energia incidente é aproveitada pelos elétrons para vencer o campo elétrico. Sendo assim, uma corrente surge, fluindo do semiconductor tipo N para o semiconductor tipo P. Esta corrente resultante do movimento eletrônico pode ser aproveitada para alimentar uma carga.

2.1.4 Análise de células fotovoltaicas

Os módulos fotovoltaicos se comportam de acordo com a curva I-V mostrada na Figura 7. É a partir da análise desta curva que o DSP (Processador Digital de Sinal) obtém o ponto máximo de transferência de potência, e ajusta os valores de tensão e corrente (através de um conversor estático) para que haja a máxima eficiência do conjunto.

Figura 7 - A curva I-V e seu ponto de máxima transferência de potência



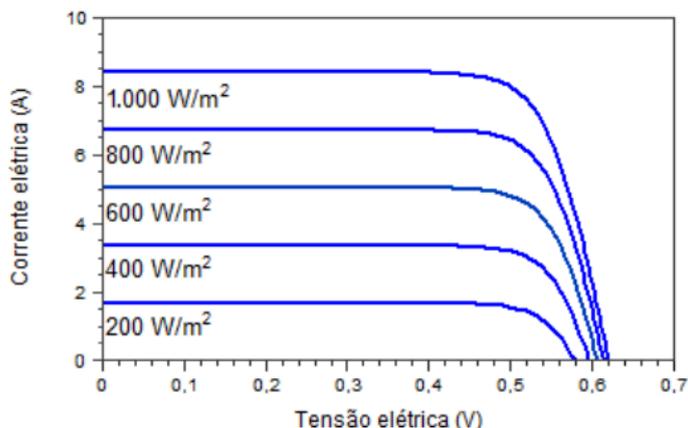
Fonte: Adaptado de (MOEHLECKE e ZANESCO, 2005).

Cada painel fotovoltaico tem sua própria curva I-V, e seu próprio ponto de máxima transferência de potência. As coordenadas cartesianas deste ponto são os valores ideais de tensão e corrente no qual o painel deve trabalhar. O produto destas coordenadas garante o maior valor de potência entre todas as outras combinações existentes da curva. Este ponto é de fundamental importância pois a distância que este está do ponto de operação do painel, dita a eficiência geral de seu sistema. Para obtê-lo, mede-se a tensão de circuito aberto do painel, que é a tensão entre os terminais quando nenhuma carga é conectada ao mesmo. A corrente de curto-circuito também deve ser medida, que é a corrente que circula pelo seus terminais quando a tensão entre estes é zero. Em um sistema fotovoltaico, o inversor, assume também o papel de rastrear este ponto de máxima potência, e em alguns, há múltiplas entradas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT).

2.1.5 Temperatura e Eficiência

A irradiância incidente e a temperatura de operação da célula influencia o desempenho geral da célula fotovoltaica. Isto porque o módulo fotovoltaico é um semicondutor que, como todos os outros, quando exposto a altas temperaturas sofre uma diminuição de sua eficiência. No Gráfico 1, há a representação das curvas típicas de uma célula fotovoltaica que, quando exposta a uma mesma temperatura, apresenta diferentes curvas I-V de acordo com a irradiância solar incidente assim como os diferentes pontos de máxima transferência de potência adquiridos.

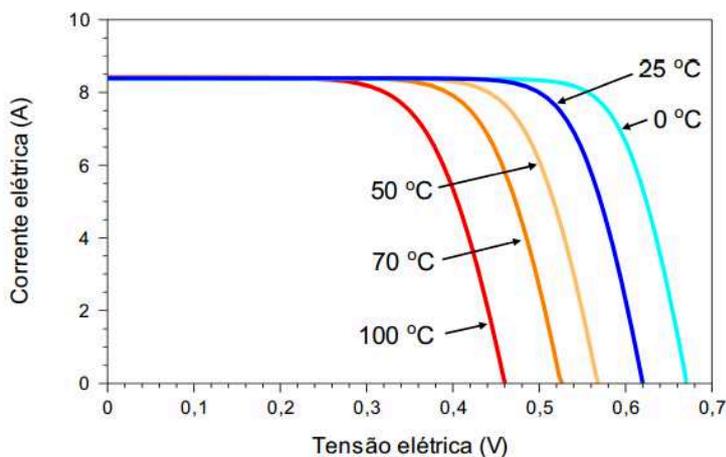
Gráfico 1- Irradiância solar em uma célula de silício em temperatura ambiente



Fonte: Adaptado de (PINHO, GALDINO, 2014).

O aumento da temperatura ambiente é também um fator decisivo para o desempenho da célula. O fato é que com o aumento da temperatura, a tensão da célula diminui muito e a corrente sofre uma pequena elevação, quase desprezível. A exemplo podemos citar a célula de silício cristalino, que dado um aumento de 100°C, haverá variação de 30% em sua tensão de circuito aberto e de 0,2% na sua corrente de curto-circuito. (PINHO, GALDINO, 2014).

Gráfico 2 - A influência da temperatura em uma célula fotovoltaica de silício cristalino.



Fonte: Adaptado de (PINHO, GALDINO, 2014).

2.1.6 Módulo Fotovoltaico

As células fotovoltaicas, como outrora mencionado, não conseguem sozinhas produzir níveis de tensão e corrente suficientes para uma aplicação prática. Por isso são construídos módulos fotovoltaicos, que através de inúmeras associações série-paralelo das células, conseguem adquirir qualquer nível pretendido. As tensões e correntes máximas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados contidos na etiqueta de um módulo

Informação	Significado ou importância da informação
Nome do fabricante	Identificação do responsável pela qualidade do módulo
Identificação do modelo	Pelo modelo pode-se identificar a folha de dados técnicos com informações sobre tecnologia, potência e tolerância
Número de série	O número de série é obrigatório para registro, qualificação, rastreabilidade e garantia do produto
Tensão máxima do sistema	Indica o maior valor de tensão de circuito aberto de um arranjo onde o módulo pode ser instalado
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	Multiplicando-se V_{OC} de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se V_{OC} do arranjo (ver item 4.1.2)
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	Multiplicando-se I_{SC} de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se I_{SC} do arranjo (ver item 4.1.2)
Tensão de máxima potência (V_{MP})	Multiplicando-se V_{MP} de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se V_{MP} nominal do arranjo (ver item 4.1.2)
Corrente de máxima potência (I_{MP})	Multiplicando-se I_{MP} de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se I_{MP} nominal do arranjo (ver item 4.1.2)
Potência nas condições-padrão de ensaio (STC)	Potência máxima nominal do módulo nas condições de irradiância de 1.000 W/m^2 , espectro AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C
Temperatura nominal da célula nas condições de operação (NOCT)	Temperatura das células do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C e velocidade de vento de 1 m/s

Fonte: Adaptado de (PINHO, GALDINO, 2014).

Todo módulo possui sua própria tabela de dados, que geralmente está impressa em sua folha de dados. Todas as informações técnicas contidas neste, devem ser analisadas com cuidado na hora de escolher o melhor módulo para uma dada aplicação, analisando a Tabela 2.

Tabela 2 - Dados técnicos de módulos.

Informação	Significado ou importância da informação
Potência nas condições de operação (P_{MP})	Potência máxima do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m^2 , e temperatura de célula NOCT
Tensão de máxima potência nas condições de operação (V_{MP})	Tensão do ponto de máxima potência do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m^2 e temperatura NOCT
Corrente de máxima potência nas condições de operação (I_{MP})	Corrente no ponto de máxima potência do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m^2 e temperatura NOCT
Coefficiente de temperatura para tensão	Coefficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura (β), em volts por grau Celsius
Coefficiente de temperatura para corrente	Coefficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura (α), em amperes por grau Celsius
Coefficiente de temperatura para potência	Coefficiente de variação da potência máxima do módulo com a temperatura (γ), em watts por grau Celsius
Dimensões externas	Dimensões de largura, comprimento e espessura do módulo, incluindo a moldura
Número de células	Número de células associadas no módulo
Tecnologia das células	Tipo de célula fotovoltaica e materiais envolvidos
Desenho indicando furações	Desenho com localização das perfurações da moldura, para instalação dos módulos em painéis

Fonte: Adaptado de (PINHO, GALDINO, 2014).

2.2 Conversores de frequência

Os conversores de frequência são componentes essenciais a um sistema fotovoltaico, pois é ele que converte a tensão contínua vinda dos módulos, em corrente alternada para

ser usada pelas cargas. A tensão alternada resultante necessita de uma parametrização ideal de sua amplitude, frequência e do conteúdo harmônico para atender as cargas por ela alimentada. Para a sua devida conexão à rede de distribuição é necessário também fazer a sincronização desta onda à tensão existente na rede.

É através das especificações do inversor, é que definiremos o número de Strings do sistema fotovoltaico. Uma string é um conjunto de módulos ligados em paralelo e/ou em série de modo a entregar a um inversor uma dada potência de acordo com os limites de tensão e corrente do mesmo. Para se calcular uma string, devemos primeiramente ter em mãos as especificações de entrada do inversor que consta em sua folha de dados.

O número máximo de módulos em série é igual ao máximo de tensão que o inversor suporta em sua entrada, dividido pela tensão de circuito aberto do módulo.

$$STG_{série} = \frac{V_{máx\ inversor}}{V_{OC\ Módulo}} * K \quad [2]$$

É comum ainda ter uma constante K que define uma margem de segurança elaborada pelo próprio projetista do sistema para que essa tensão não atinja o pico na entrada do módulo. Esta constante K não é um valor informado nos módulos, é apenas um valor que o próprio projetista define, de acordo com sua experiência. O valor excelente da constante é $K = 0,9$ pois permite uma margem de variação da tensão de 10% e não subdimensiona o módulo.

Para a quantidade de strings em paralelo, a fim de usar a máxima potência disponível em cada entrada do módulo, o procedimento é exatamente o mesmo. Mas, ao invés de se usar a tensão, é usada a corrente pois esta é a grandeza que não é constante na associação em paralelo.

Para tanto, a razão da corrente máxima de entrada do inversor pela corrente de curto circuito do módulo, multiplicada pela mesma constante $K = 0,9$ define a quantidade máxima de módulos conectados em paralelo.

$$STG_{paralelo} = \frac{I_{máx\ inversor}}{I_{CC\ Módulo}} * K \quad [3]$$

Feito o dimensionamento das Strings, podemos então fazer a escolha correta do inversor. Cada módulo fotovoltaico possui uma potência de pico dada em W_p em sua folha de dados. O produto deste valor com a quantidade de módulos fotovoltaicos do sistema fornece o valor da potência nominal de entrada do inversor.

3 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS SUBESTAÇÕES

3.1 Conceitos gerais

Para a seleção da melhor configuração dos arranjos, é necessário que haja o planejamento estratégico de como aquela subestação irá operar, e quais são as necessidades de sua operação. Deste modo, define-se algumas métricas de especificação que levam em conta a continuidade do serviço, custo, proteção, operação e futuras expansões. A continuidade do serviço se refere em momentos em que há faltas ou ainda sob condições de manutenção, na qual se deve analisar se o tempo de indisponibilidade do serviço durante estes momentos, trazem maiores prejuízos ao sistema gerador do que o custo para a seleção de um arranjo mais dinâmico e confiável. Deve se levar em conta ainda, a atmosfera em que a subestação está submetida, de modo que esta possa necessitar de mais manutenção do que outras. O custo por sua vez, é mandatório na maioria dos projetos que não são impedidos legalmente de operar, de modo que a otimização do custo junto a equipe de projetos é condição inegociável para a sua concretização. A operação e proteção consiste em saber se a subestação irá requerer uma cabine de transferência, de modo a dividir a subestação em condições de máxima demanda do sistema em que está alimentando. Ainda questões mais específicas como o isolamento de cargas não-lineares, ou ainda, a obtenção de maneira menos complexa o estudo de proteção devem ser avaliadas em sua especificação. Não obstante, a consideração de futuras expansões da subestação devem ser alinhadas juntamente com o cliente, de modo a garantir que o investimento realizado no momento do projeto não irá na contramão das expectativas de crescimento da planta.

As subestações fazem a interface entre a rede de distribuição de tensão primária da concessionária, com o cliente atendido. Muitas vezes, o ponto de conexão permite entrada por via aérea, em outras há necessidade de entrada subterrânea que irá trazer o ramal de entrada até os primeiros equipamentos das subestações: Transformadores de potência, Equipamentos de Proteção, Controle e Monitoramento, Dispositivo de Manobra (Switchgear), Barramentos, Baias, Compensadores de Energia Reativa, Filtros Harmônicos, Malha de Aterramento e o Sistema de Proteção contra Sobreensões de Origem Atmosféricas. As subestações podem ainda ser divididas na forma de isolamento: isoladas a ar, ou, isoladas a gás de acordo com o espaço físico disponível para sua construção e seu nível de tensão de operação. Podemos dividir a subestação em três grandes sistemas: o primário, secundário e o auxiliar. O primário se refere aos equipamentos que estão em operação com a tensão nominal do sistema de conexão. O secundário se refere aos equipamentos de supervisão, proteção, controle e monitoramento dos equipamentos do sistema primário. O sistema auxiliar é o responsável por alimentar todos os

equipamentos de corrente contínua ou alternada do sistema secundário: sistema de distribuição, isolamento e proteção de corrente contínua; baterias; retificador e o sistema de distribuição, isolamento e proteção em corrente alternada que é o responsável por alimentar os ventiladores dos transformadores, motores de troca de TAP e os motores dos mecanismos de seccionamento.

3.2 Diferentes tipos de arranjos de barramentos

O arranjo do barramento da subestação é a parte fundamental de seu projeto. Podemos classificar seus arranjos, de forma simples, pelas características apresentadas anteriormente: operação e custo, de acordo com as solicitações que o cliente necessita durante o seu funcionamento, tal como mostrado na Tabela 3.

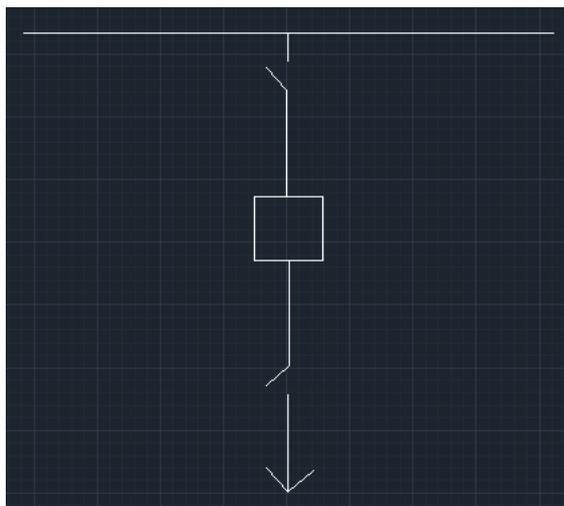
Tabela 3- Arranjos das Subestações

ARRANJO	CUSTO	CONFIABILIDADE
BARRA SIMPLES	BAIXO	BAIXO
BARRA PRINCIPAL E TRANSFERÊNCIA	MÉDIO	BAIXO
BARRA DUPLA – DISJUNTOR SIMPLES	MÉDIO	MÉDIO
BARRA DUPLA – DISJUNTOR DUPLO	ALTO	ALTO
BARRA DUPLA – DISJUNTOR E MEIO	MÉDIO	ALTO
BARRA EM ANEL	MÉDIO	ALTO

Fonte: Adaptado de (MAMEDE, 2017).

A topologia mais adequada para a atual planta de geração fotovoltaica, é a barra simples, pois oferece baixíssimo custo de implantação, e por se tratar de uma geração de energia, a sua confiabilidade também pode ser baixa por não haver nenhum tipo de carga crítica conectada a mesma.

Figura 8 - Barramento Simples.



Fonte: O Autor.

O barramento simples possui baixa confiabilidade, como mostra a Figura 10, quanto a continuidade do serviço, mas oferece o mais baixo custo. Para cada manutenção, é necessário o completo desligamento da planta de geração, e em caso de faltas ou anomalias na rede, toda a planta será desligada e não injetará potência no sistema elétrico da concessionária.

3.3 Sistema de proteção contra sobretensões

O sistema de proteção contra sobretensões de origem atmosférica é regulamentado pela concessionária na qual será instalada a subestação, a Tabela 4 mostra as especificações.

Tabela 4 - Proteção Contra Sobretensões.

TENSÃO NOMINAL (kV)		15	27
MÁXIMA TENSÃO DE OPERAÇÃO CONTÍNUA (kV)		13 ± 1	23 ± 1,5
INVÓLUCRO	TENSÃO SUPOSTÁVEL A 60 Hz (kV eficaz) DURANTE 1 MINUTO - mínimo	34	60
	TENSÃO SUPOSTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO, VALOR DE CRISTA (kV) mínimo	110	170
	DISTÂNCIA DE ESCOAMENTO MÍNIMA ENTRE OS TERMINAIS DE LINHA E ATERRAMENTO (mm)	300	600
	TENSÃO SUPOSTÁVEL A 60 Hz (Kv eficaz) SOB CHUVA DURANTE 1 MINUTO - mínimo	18	33
BRAÇADEIRA DE FIXAÇÃO	TENSÃO SUPOSTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO, VALOR DE CRISTA (kV) mínimo	110	170
	DISTÂNCIA DE ESCOAMENTO MÍNIMA ENTRE FUIROS DE FIXAÇÃO (mm)	130	200
CORRENTE DE DESCARGA NOMINAL (ONDA 8x20 µs), VALOR DE CRISTA (valor mínimo) (kA)		5 - para os PRs de 5 kA 10 - para os PRs de 10 kA	
TENSÃO RESIDUAL MÁXIMA (kV)	SOB CORRENTE DE DESCARGA NOMINAL	54	97
	SOB CORRENTE DE DESCARGA COM FRENTE ÍNGREME (ONDA 1 X 20 µs)	60	108
CORRENTE SUPOSTÁVEL DE DESCARGA	BAIXA INTENSIDADE E LONGA DURAÇÃO, VALOR DE CRISTA (A)	75 - só para o PR de 5 kA	
	ALTA INTENSIDADE E CURTA DURAÇÃO, PARA O ENSAIO DE CICLO DE OPERAÇÃO, ONDA (4 a 6) / (10 a 15) µs, VALOR DE CRISTA (A)	65.000 - para os PRs de 5 kA 100.000 - para os PRs de 10 kA	
RADIOINTERFERÊNCIA	TENSÃO MÁXIMA DE RADIOINTERFERÊNCIA TRI (µV, MEDIDA EM 1000 kHz E REFERIDA A 300Ω)	250	
	TENSÃO APLICADA NO ENSAIO (kV)	8,8	21,9

Fonte: NTC811261, 2005.

A COPEL possui a NTC811261, que estabelece condições mínimas que devem ser especificadas para o conjunto deste tipo de proteção, para garantir o efetivo cumprimento de sua função no sistema. Após a verificação completa da referida norma, é possível estabelecer as características que serão adotadas neste projeto, como mostrado na tabela acima.

O sistema de proteção, deve ser dotado de um desligador automático, do tipo detonador que deverá estar acoplado externamente ou ainda internamente ao invólucro do para-raio, de maneira a garantir o desligamento rápido e automático do terminal aterrado, garantindo a continuidade do serviço em caso de defeito no dispositivo.

As características elétricas devem atender no mínimo, as características mostradas na tabela, sendo que a curva característica de tempo x corrente de atuação do desligador automático, deve ser especificado de modo a garantir a seletividade entre o sistema de proteção, e o elo fusível. Devendo ainda, o projetista se responsabilizar pela compra de um material de excelente qualidade, e sua inspeção, através de ensaios específicos, como visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio de recebimento

Ensaio	- Verificação visual e dimensional - Verificação do torque de instalação dos terminais e braçadeira				- Tensão residual - Medição da tensão de referência - Medição de descargas parciais - Estanqueidade				- Espessura da camada de zinco - Espessura da camada de estanho		
Nível de amostragem	II Dupla				S4 Dupla				S3 Simples		
NQA	4%				2,50%				4%		
Tamanho do lote	AMOSTRA		Ac	Re	AMOSTRA		Ac	Re	AMOSTRA	Ac	Re
	Seq.	Quant.			Seq.	Quant.					
Até 90	-	3	0	1	-	5	0	1	3	0	1
91 a 150	1ª	8	0	2	-	5	0	1	3	0	1
	2ª	8	1	2							
151 a 280	1ª	8	0	2	1ª	13	0	2	13	1	2
	2ª	8	1	2	2ª	13	1	2			
281 a 500	1ª	13	0	3	1ª	13	0	2	13	1	2
	2ª	13	3	4	2ª	13	1	2			
501 a 1200	1ª	20	1	4	1ª	13	0	2	13	1	2
	2ª	20	4	5	2ª	13	1	2			
1201 a 3200	1ª	32	2	5	1ª	20	0	3	13	1	2
	2ª	32	6	7	2ª	20	3	4			
3201 a 10000	1ª	50	3	7	1ª	20	0	3	20	2	3
	2ª	50	8	9	2ª	20	3	4			
10001 a 35000	1ª	80	5	9	1ª	32	1	4	20	2	3
	2ª	80	12	13	2ª	32	4	5			

- Regime normal;
- Ac - Número de para-raios defeituosos que ainda permite aceitar o lote;
Re - Número de para-raios defeituosos que implica na rejeição do lote;
- Se a amostra requerida for igual ou maior que o número de unidades do produto constituintes do lote, efetuar inspeção cem por cento das unidades;
- Para amostragem dupla o procedimento é o seguinte: é ensaiado um número inicial de unidades igual ao da primeira amostra obtida na Tabela. Se o número de unidades defeituosas encontrado estiver compreendido entre Ac e Re (excluindo estes valores), deve ser ensaiada a segunda amostra. O total de unidade defeituosas, após ensaiadas as duas amostras, deve ser igual ou inferior ao maior Ac especificado.

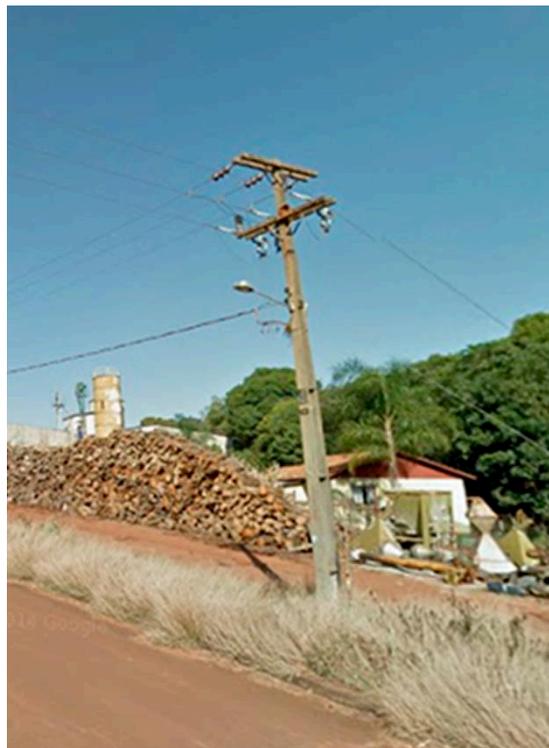
Fonte: NTC811261, 2005.

4 LEVANTAMENTO TÉCNICO DA SUBESTAÇÃO

O levantamento técnico do local de instalação da subestação de entrada da usina fotovoltaica foi realizada segundo normas da COPEL, e que serão descritas ao longo desta seção. O lote em que a subestação e a usina serão instaladas devem ser devidamente demarcadas fisicamente, com cercas ou muros, garantindo limite a sua propriedade. O lote, deve ser devidamente especificado, constando em seu HABITE-SE junto a prefeitura local: número, lote, quadra, bairro, cidade e estado. Todos os documentos aqui discriminados serão anexados junto ao documento.

O ponto de entrega da rede da concessionária é uma parte fundamental para a alocação da subestação de entrada, e sua justificativa junto a COPEL. No referido local, o ponto de entrega da COPEL se situa no lado oposto da via, de modo que é necessário utilizar um poste dentro da propriedade do cliente para que se realize uma travessia aérea da rede de distribuição.

Figura 9 - Ponto de Entrega COPEL.



Fonte: O Autor.

O lote especificado na planta de situação, encontra-se mostrado na imagem que segue.

Figura 10 - Lote da planta de situação.



Fonte: O Autor.

Para tanto, necessita-se identificar no diagrama unifilar a utilização do poste de ancoragem da rede de distribuição, e sua mufla de isolamento, sendo de total responsabilidade do cliente a sua manutenção e conservação. A subestação terá um pé direito de 6 metros, devido a facilidade de entrada do ramal aéreo na propriedade.

Figura 11 – Foto Aérea



Fonte: Google Earth..

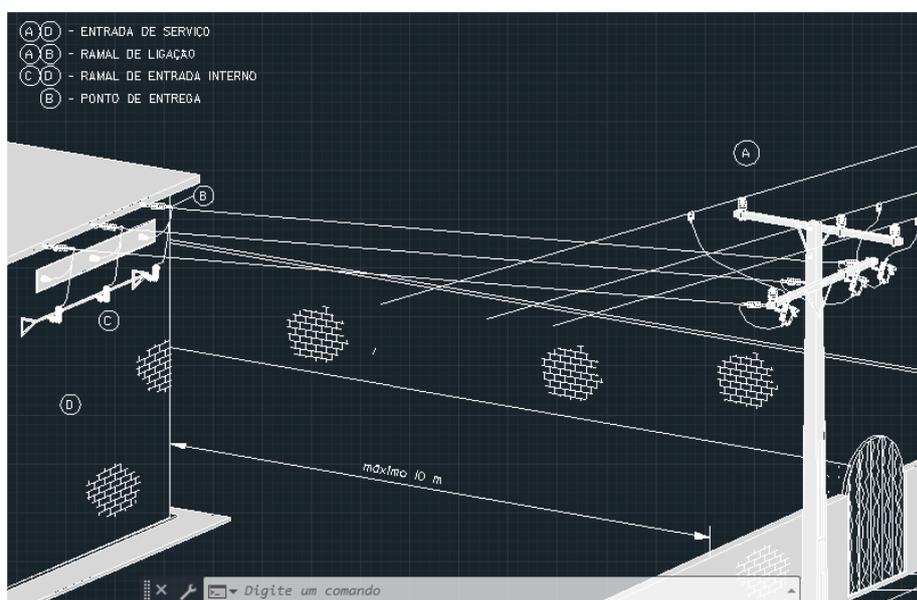
A divisa com a via pública é uma cerca que deverá ser utilizada como demarcação para o lote, a proteção da subestação deverá ser realizada com uma divisa feita de alvenaria, reforçando a segurança da mesma.

4.1 Escolha do tipo da Subestação

A subestação utilizada no presente projeto é do tipo abrigada, com pé direito de 6 metros, tal como especificado na seção anterior, e com ramal de entrada aéreo, com ancoragem em poste na propriedade do cliente.

A subestação será cercada com um muro de alvenaria, na qual a distância entre o muro de conteção e o muro da subestação não pode ser superior a 10 metros. O ramal de entrada aéreo da subestação será ancorado por poste de distribuição feito em concreto. A desenho da estrutura externa da subestação pode ser visto na imagem abaixo

Figura 12 - Desenho CAD da subestação com entrada em ramal aéreo



Fonte: NTC811261, 2005.

Será realizada na edificação já existente um levantamento de cargas, na qual será especificado para a COPEL a potência instalada. Com o projeto da usina fotovoltaica, toda a potência injetada na rede primária de distribuição da COPEL será faturada pelo medidor do Mercado Livre de Energia, na qual em anexo a documentação será enviada os dados do cliente, número da unidade consumidora, procuração de amplos poderes junto a COPEL.

4.2 Segurança e manutenção

A subestação respeita a norma ABNT NBR 14039 que rege a segurança e manutenção de subestações elétricas.

Como medidas de manutenção o projeto contempla a extrema confiabilidade dos componentes utilizados que são previamente comissionados e homologados pela COPEL, garante locais de armazenagem de EPI's, diagramas unifilares e relatório de procedimento de

energização e deserenergização da subestação, além de procedimento padrão de manutenção de todos os equipamentos: chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntor à vácuo e muflas.

O projeto também contempla a iluminação natural ampla da subestação, porta ampla para passagem de transformador para manutenção e equipamentos.

A segurança da subestação é garantida uma vez que todos os equipamentos dispostos no ITEM 5 da NBR 14039, que realizam as seguintes proteções:

- Proteção contra contatos diretos
- Proteção contra efeitos térmicos
- Proteção contra sobrecorrentes
- Proteção contra sobretensões
- Proteção contra mínima e máxima tensão de fase
- Proteção contra inversão de fase
- Proteção das pessoas que trabalham nas instalações
- Proteção contra fuga de líquidos isolantes
- Proteção contra perigo resultante de arco elétrico

A malha de aterramento contempla toda a área da subestação de entrada, garantindo níveis de toque e de passo dentro do tolerável. A proteção por isolamento das partes vivas foi realizada nos equipamentos ainda em fábrica com seu respectivo teste de isolamento e de isolamento por impulso atmosférico. O acesso aos barramentos e a todas as partes vivas da subestação ficará protegido contra violações, que pode ser aberto quando se faz o uso de uma ferramenta específica para o seu destravamento, ou por meio de liberação de bloqueio. O grau de proteção mínimo do interior será de IP3X, enquanto as superfícies superiores será de no mínimo IP4X.

A proteção de pessoas e componentes devido ao efeito térmico ou da radiação térmica produzida pelos equipamentos elétricos será garantida no compartimento de EPI's dentro da subestação sem que haja acidentes com risco de queimadura, prejuízo no funcionamento de equipamentos ou ainda a combustão dos EPI's.

Os EPI's que constam no compartimento são: rádios comunicadores, capacetes, óculos de segurança, luvas, bastão de média tensão, detector de tensão eletrônico, botas, tapete isolante e balaclava.

A proteção contra incêndio será assegurada dentro da subestação pelo fácil acesso ao extintores de incêndio, aos materiais que suportam elevadas temperaturas, aos equipamentos que são afastados da alvenaria para que permita seu arrefecimento e dissipação total da energia calorífica absorvida.

Toda parte viva da subestação terá anteparos adicionais como forma de prevenir contatos acidentais, respeitando a rigidez dielétrica de cada material utilizado.

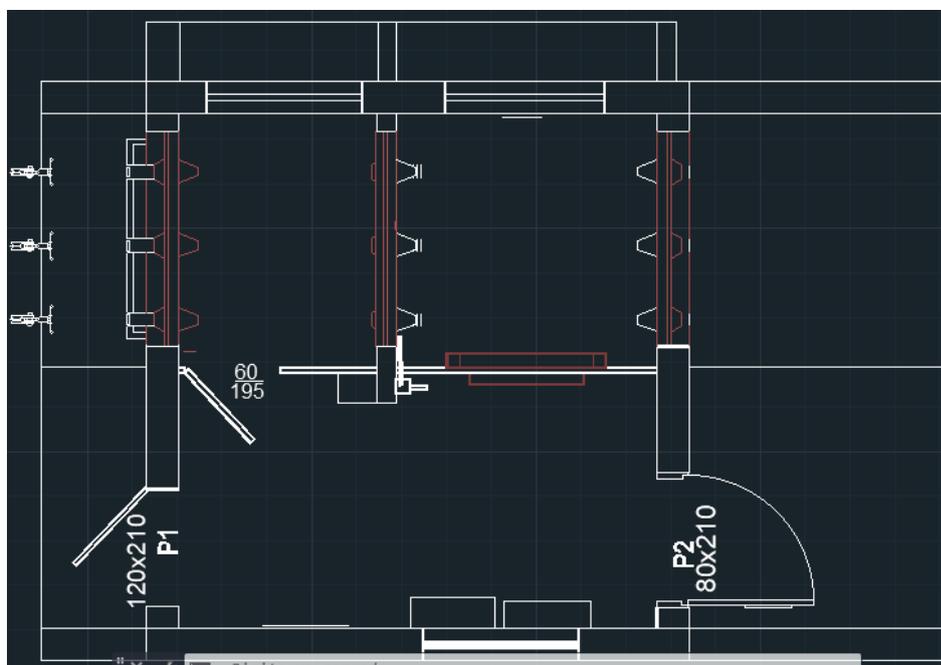
A contenção do líquido isolante de todos aqueles equipamentos que o utilizam será feito com um tanque de contenção de líquidos isolantes com 2.000 litros de capacidade, utilizando uma bacia de alvenaria com impermeabilização total.

Indicado em planta baixa, o projetista mostra as saídas de emergência da subestação.

4.3 Projeto executivo da subestação

Através do levantamento técnico realizado pela visita técnica, foi possível prever aspectos construtivos da subestação que será lançada no lote. Para tanto, a aprovação da planta baixa fica a cargo da COPEL da referida subestação, na qual segue recomendações supracitadas na seção anterior e que é mostrada seu projeto na Figura 14.

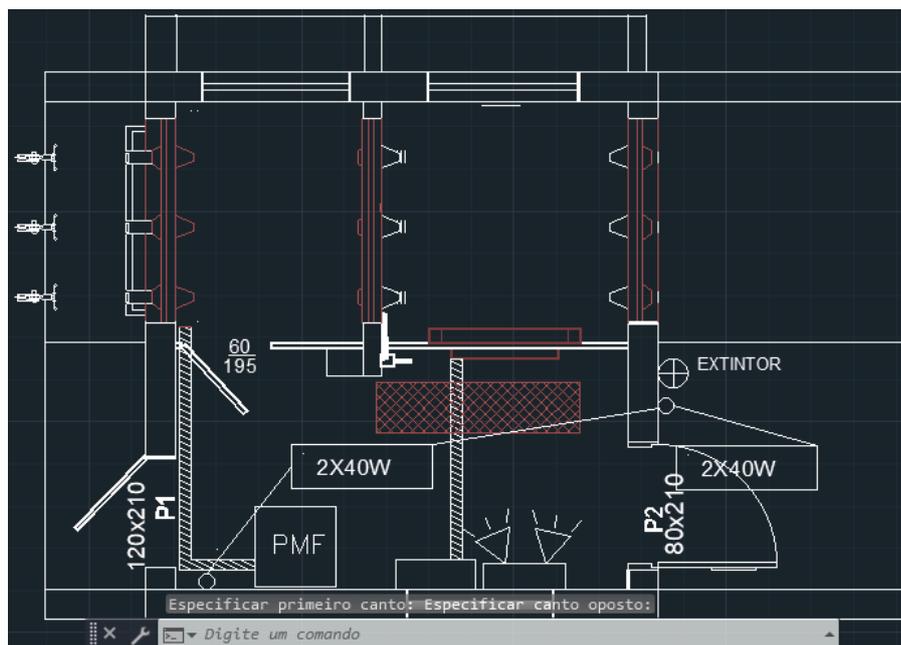
Figura 13 - Planta baixa da subestação em Alvenaria



Fonte: NTC811261, 2005.

Deste modo, haverá o lançamento dos dispositivos de segurança da subestação, que inclui: compartimentos de EPI's e equipamentos, alarmes, monitoramento, extintor, tapetes de isolamento e iluminação artificial realizada por um par de lâmpadas de led do tipo tubular de 1,2m de comprimento e ainda o painel de medição para o consumidor livre fixado na parede, mas ainda sem nenhum equipamento.

Figura 14 - Lançamento Dos Equipamentos De Segurança



Fonte: NTC811261, 2005.

5 PROJETO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

5.1 Sondagem Elétrica Vertical e Modelagem Geométrica do Solo

A Sondagem Elétrica Vertical do solo foi realizada pelo método de Werner, utilizando um terrômetro no qual foram feitas as medições para o levantamento da curva de resistividade aparente do solo. As medições foram obtidas com o resistivímetro, realizando o cravamento da haste em 5 pontos distintos (A,B,C,D e E), e alterando-se a distância das hastes (1,2,4,8 e 10 metros) a cada nova medição.

A medição foi realizada com o auxílio de 4 hastes de 0,25 m de comprimento cada, que injetaram no primeiro ponto fixado pela primeira haste uma corrente I e que foi colhida pela última haste. As distâncias das hastes variaram de acordo com a tabela que mostra os valores colhidos nas medições realizadas no local, mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência do solo.

Espaçamento	Resistência (Ω)				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
1	196,3	470	192,2	204	494
2	114,7	261	81,5	195	241
4	46,3	56	41	144	106
8	12,7	21,7	21,2	14,6	19,1
10	11	15	25	12,4	14,6

Fonte: O Autor.

Para o cálculo da resistividade do solo foi utilizada a fórmula que aparece abaixo.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m] \quad [4]$$

Sendo que:

a = Espaçamento entre hastes

p = Profundidade de penetração das hastes (0,25 m)

R = Valor mostrado no display

Chegando-se na tabela de resistividade total do solo, mostrada na Tabela 7.

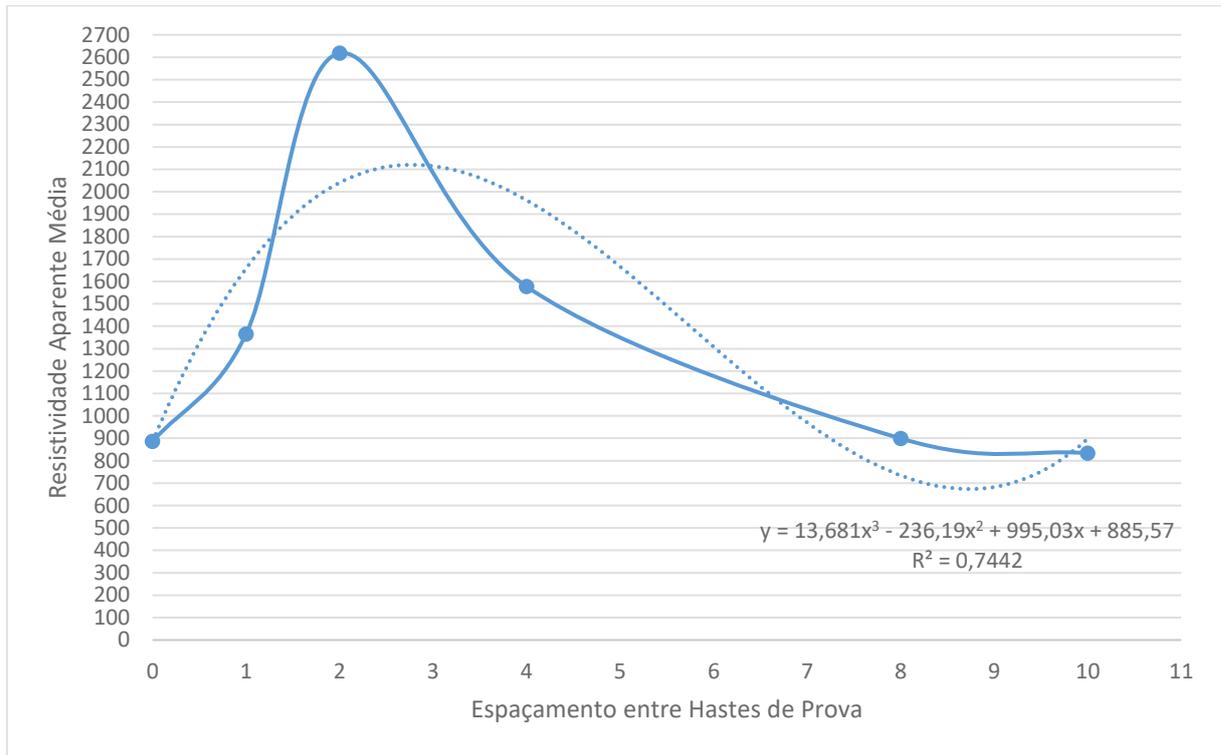
Tabela 7 - Resistividade do Solo

Espaçamento(m)	RESISITIVIDADE TOTAL				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
1	1356,332785	3247,460055	1328,003878	1409,535854	3413,287803
2	1479,833099	3367,362152	1051,494312	2515,845286	3109,326738
4	1171,552035	1416,995982	1037,443487	3643,703954	2682,170966
8	639,460923	1092,622207	1067,44658	735,1283052	961,7089472
10	691,9055879	943,5076199	1572,5127	779,9662991	918,3474167

Fonte: O Autor.

Desta forma, após realizar uma filtragem dos dados obtidos, de forma a eliminar os dados que apresentam um desvio parcial maior que 50%, em relação à média aritmética, podemos compor o gráfico que se segue.

Gráfico 3 - Resistividade x Espaçamento com Curva Polinomial de Tendência



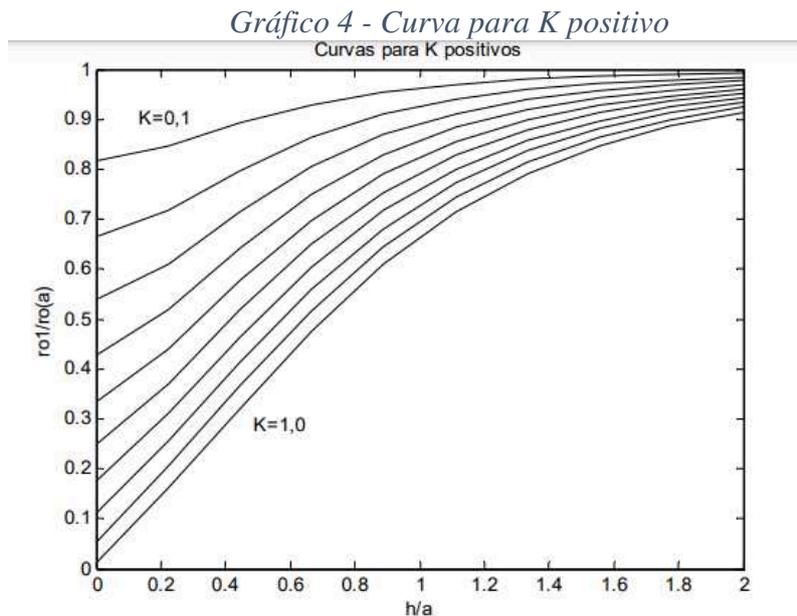
Fonte: O Autor.

Através de uma interpolação polinomial com polinômio de ordem 3, podemos chegar na fórmula que define a curva: $y = 13,681x^3 - 236,19x^2 + 995,03x + 885,57$, e ainda, com: $R^2 = 0,7442$, da forma representada pelo Gráfico 3.

Podemos notar que, o comportamento do gráfico, mostra que o solo pode ser dividido em apenas 2 camadas, por não apresentar mais que uma ondulação em sua forma. Podemos ainda definir o valor do coeficiente de reflexão, que é expresso na fórmula abaixo.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad [5]$$

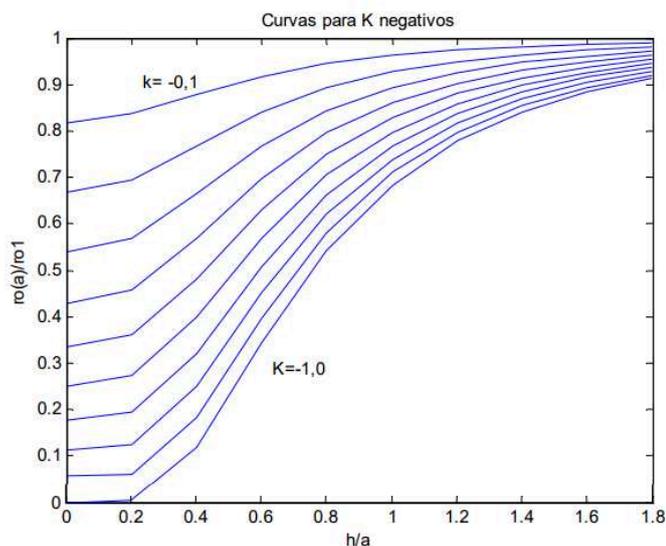
Desta forma, podemos traçar uma série de curvas de $\rho(a)/\rho_1$ em função unicamente de h/a , para uma extensa série de valores de K negativos e também positivos. Com base na família de curvas teóricas das para os valores de K positivos, mostrados no Gráfico 4.



Fonte: Adaptado de (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1995)

E também na família de curvas para K negativos, que é mostrada no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Curva para K negativo



Fonte: Adaptado de (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1995)

Podemos estabelecer um método específico que faça a relação entre a curva $p(a) \times a$, medida por Wenner, já mostrada, com uma curva particular. Esta curva particular é caracterizada pelos respectivos valores de p_1 , K e h .

Para que se realize este processo, é necessário traçar a curva $p(a) \times a$, que foi obtida pelo método de Wenner, que foi apresentada no início deste trabalho. Prolonga-se a curva $p(a) \times a$

até que esta corte o eixo das ordenadas. Neste exato ponto, é obtido diretamente o valor de p_1 , que é a própria resistividade da primeira camada estratificada do solo.

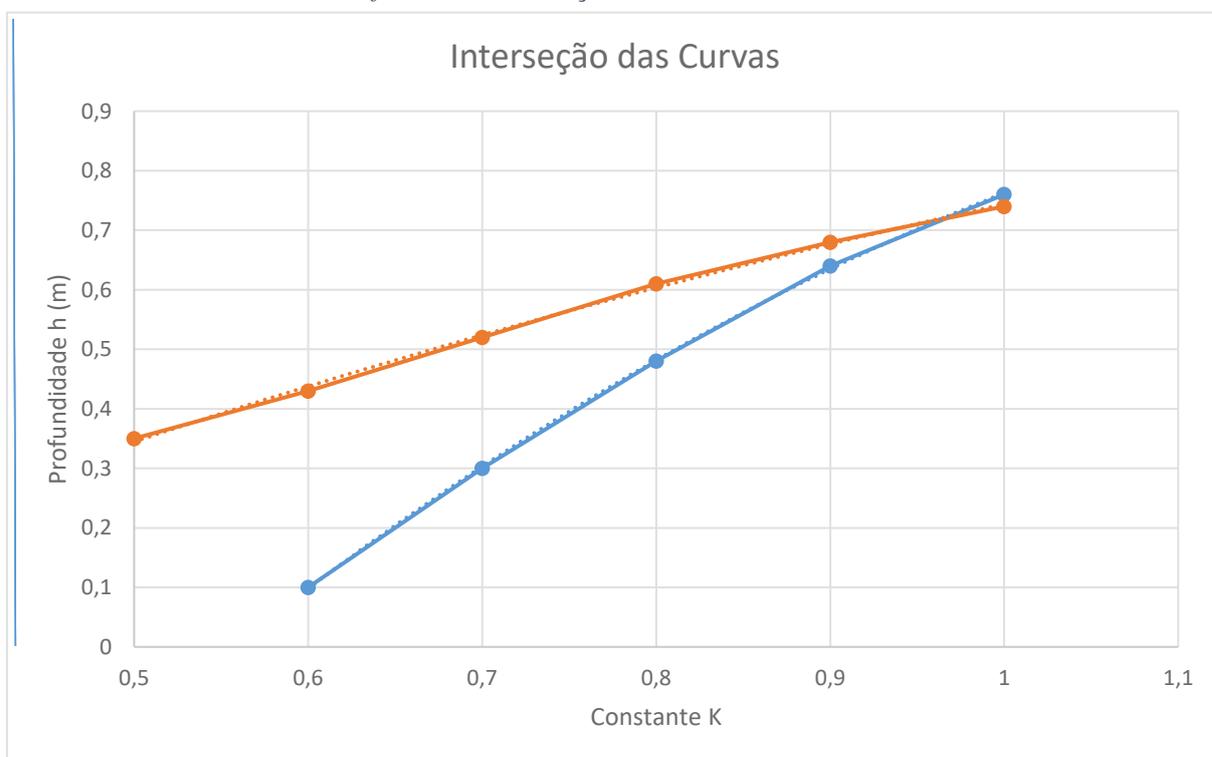
Para maior confiabilidade, recomenda-se medir várias vezes pelo método de Werner, e para pequenos espaçamentos de comprimento, uma vez que a injeção de corrente se dá prioritariamente pela primeira camada do solo, o que motiva maior precisão das medições.

Um valor de a_1 é escolhido aleatoriamente e levado até a curva para se obter a correspondente valor de $p(a_1)$. Pelo comportamento da curva $p(a) \times a$, determina-se o sinal de K , de modo que se a curva for descendente o sinal de K será negativo e calcula-se para $p(a_1)/p_1$. Para uma curva descendente o sinal de K é positivo e realiza-se o cálculo de $p_1/p(a_1)$.

Obtido o valor de $p(a_1)p_1$ ou ainda de $p_1/p(a_1)$, obtido anteriormente, é realizado a consulta das curvas teóricas de seus respectivos valores de K , traçando-se uma linha paralela ao eixo das abscissas. Estas retas, ao cortarem as distintas curvas de K , estabelecem os valores de h/a correspondentes. Multiplicando os valores de h/a encontrado pelo valor de a_1 , gera-se uma tabela com os valores de K , h/a e h .

Após realizado este tratamento, realiza-se a plotagem das curvas $K \times h$, através dos valores obtidos na tabela gerada anteriormente, e mostrados no Gráfico 6.

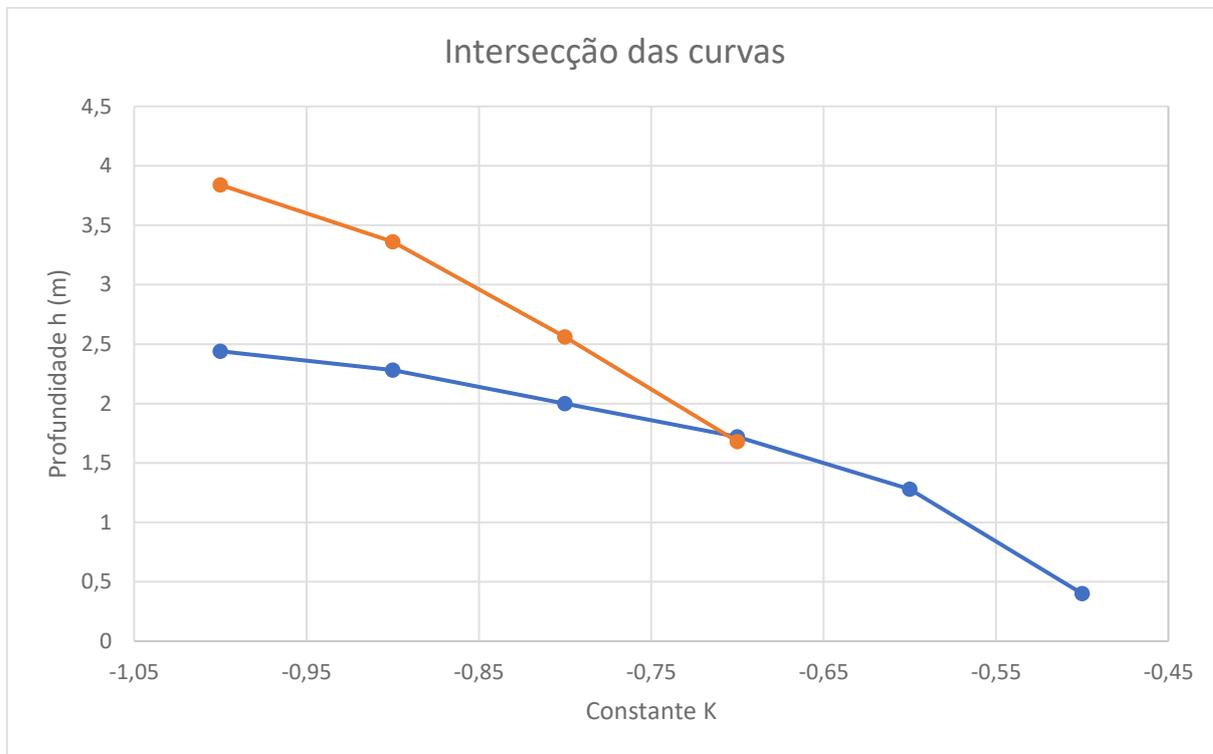
Gráfico 6 - Intersecção da Primeira Camada



Fonte: O Autor.

Podemos ainda, de acordo com a tabela gerada com os valores de K, h/a e h para a segunda camada, podemos obter o Gráfico 7.

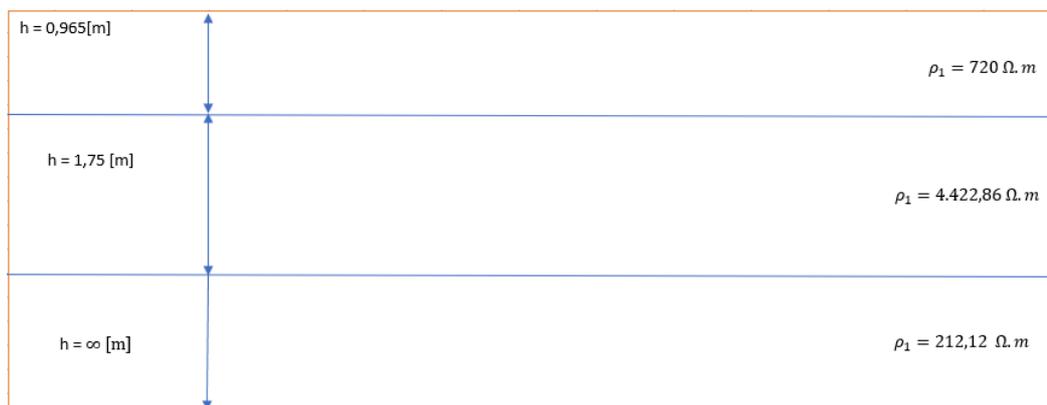
Gráfico 7 - Intersecção da Segunda Camada



Fonte: O Autor.

Desta forma, podemos estratificar o solo em duas camadas distintas, com valores de resistividade constantes durante toda a sua extensão, tal como é mostrado na Figura 16.

Figura 15 - Estratificação do Solo



Fonte: O Autor.

5.2 Informações sobre o nível de curto-circuito e parametrização do sistema de proteção para falta a terra

Para o projeto da malha de aterramento e da proteção da subestação, é necessário solicitar juntamente a concessionária local, os dados do estudo de curto-circuito no ponto de entrega. Para tanto, a consulta obteve os dados mostrados na Tabela 8 e na Tabela 9.

Tabela 8 - Estudo de Curto-Circuito no Ponto de Entrega\

Circuito: VA07		Nó de defeito: 120414 FP-3813
Zcc(+): (1,259379+j0,871997)		
Zcc(0): (1,532430+j3,285012)		
DEFEITO	POTÊNCIA (MVA)	CORRENTE (kA)
TRIFÁSICO	65,2826	2,7312
DUPLA FASE	56,5364	2,3653
FASE TERRA	46,4555	1,9436

Fonte: O Autor.

Tabela 9 - Parametrização da Proteção nos Alimentadores.

Alimentadores - 13,8kV - VA03, VA05 e VA07 da SEVA							
Ajuste de Fase				Ajuste de Neutro			
Fabricante: SEL 751				Fabricante: SEL 751			
RTC: 500/5				RTC: 500/5			
Tap: 5,00				Tap: 0,8			
Dial: 0,13				Dial: 0,60			
Curva: IEC-NI				Curva: IEC-MI			
NÃO SE APLICA				Mínimo Tempo Resp. (51N1MR): 0,46s			
DI	VA03	VA05	VA07	DI	VA03	VA05	VA07
	18A	60A	9A		11A	50A	6A
Pontos para Aferição				Pontos para Aferição			
Múltiplo do pickup	A (sec)	Tempo		Múltiplo do pickup	A (sec)	Tempo	
		Seg.	Ciclos			Seg.	Ciclos
2,0	10,0	1,3	78,0	2,0	1,6	8,1	486,0
3,0	15,0	0,82	49,2	5,0	4,0	2,03	121,8
5,0	25,0	0,56	33,6	15,0	12,0	0,58	34,8
Função 79 - Habilitada - Religamento Automático							
VA05: 1º Religamento em 2,5s. Atenção: 2º, 3º e 4º Religamentos Boqueados. Rearme: 60s.							
VA03:1º Religamento2,5s.2º Religamento15s.Atenção:3º e4ºReligamentosBoqueados.Rearme: 60s.							
VA07:1º Religamento2,5s.2º Religamento15s.Atenção:3º e4ºReligamentosBoqueados.Rearme: 60s.							

Fonte: O Autor.

A subestação indicada é a “VA”, sendo o circuito “VA07”, enquanto a chave é a FP-3813, que será a responsável pela conexão da planta de geração com a concessionária, com tensão primária de distribuição de 13,8 kV.

5.3 Dimensionamento da malha de aterramento

Para dimensionar o condutor da malha de terra é necessário se conhecer a corrente de curto-circuito no ponto, o que já foi obtido como mostrado na seção anterior. O condutor, deve suportar esforços mecânicos de compressão e cisalhamento que ficará sujeito no momento da execução da malha. Deste modo, além dos efeitos da integral de joule, ocasionadas pela corrente de defeito, há grande preocupação das solicitações mecânicas ao condutor. Para o dimensionamento térmico, utilizamos a fórmula de Onderdonk mostrada abaixo.

$$I = 226,53 S_{cobre} \sqrt{\left(\frac{1}{t_{defeito}}\right) \ln\left(\frac{\theta_m - \theta_a}{234 + \theta_a} + 1\right)} \quad [6]$$

Sendo que:

S_{cobre} = Seção do condutor de cobre da malha de aterramento (mm²).

I = Corrente de defeito (A).

$t_{defeito}$ = Duração do defeito (s).

θ_a = Temperatura ambiente (°C).

θ_m = Temperatura máxima permissível (°C).

Deste modo, garantimos que a energia que passa ao longo do condutor não será suficiente para danificá-lo, durante o período de defeito, com a corrente de defeito especificada, de modo a ser facilmente compreendida pela integral de Joule:

$$\int i^2_1 dt < \int i^2_0 dt \quad [7]$$

A temperatura máxima permissível utilizada será de 850°C, uma vez que a conexão e emendas serão feitas com solda exotérmica. Para que haja a conexão dos equipamentos a malha de aterramento, é necessário um condutor de cobre devidamente especificado com a ajuda da tabela abaixo, para cada kA de corrente de defeito, de acordo com o tempo de atuação da proteção (que neste estudo é de 500ms).

Tabela 10 - Capacidade de Condução do Condutor de Aterramento

Capacidade de Condução do Cobre (mm ² /kA)		
Tempo do defeito (s)	Condutor 97% Cobre	
	Solda Exotérmica	Solda Convencional
0,5	2,44	3,2
1	3,45	4,51
4	6,84	9,07
30	18,74	24,83

Fonte: O Autor.

Precisamos ainda definir potenciais máximos de toque e de passo para que o projeto da malha de aterramento assegure a segurança de todos os que estão sobre a mesma, dentro da subestação. O potencial de toque que aparece entre a mão e o pé, da pessoa exposta a uma parte metálica, que está sob efeito de uma corrente de falta é V_{toque} . Enquanto a $V_{\text{toque máxima}}$ é a tensão máxima de toque que pode ser experimentada pelo operador, sem que esta cause uma fibrilação ventricular. A variável “ p_s ” é a resistividade superficial do solo em que a subestação está sendo instalada, e que já foi calculada no item anterior. É importante mencionar que a subestação terá toda a sua extensão coberta por brita, que será considerada no cálculo de potenciais máximos.

$$V_{\text{toque}} < V_{\text{toque máximo}} \quad [8]$$

$$(1000 + 1,5p_s) * I_{\text{corpo}} < [1000 + 1,5 * C(h, K) * p_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

Sendo que:

p_s = Resistividade superficial do solo (solos cobertos por brita com certa profundidade).

I_{corpo} = Corrente que circula pelo corpo do operador quando sofre uma descarga elétrica.

$C(h, K)$ = Fator de correção da resistividade

O fator de correção de resistividade é aplicado toda vez que há a cobertura completa da malha de aterramento por britas. A fórmula para a obtenção deste valor é mostrada na próxima página.

$$C_s(h_s, K) = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h_s}{0,08})^2}} \right]$$

Sendo que:

$h_s \Rightarrow$ Profundidade (espessura) da brita [m]

$$K = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a + \rho_s}$$

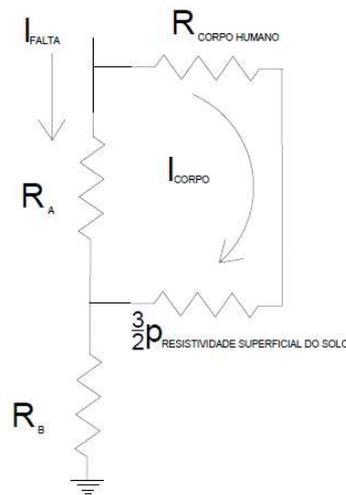
$\rho_a \Rightarrow$ Resistividade aparente da malha, sem considerar a brita

$\rho_s = \rho_{brita} \Rightarrow$ Resistividade da brita

$C_s = 1 \Rightarrow$ Se a resistividade da brita for igual a resistividade do solo

De modo que o circuito formado pelo operador, em contato com a parte metálica exposta, pode ser vista na figura abaixo (considerando a resistência do corpo humano em aproximadamente $1k\Omega$).

Figura 16 - Potencial de Toque.



Fonte: O Autor.

Podemos notar pelo circuito, que o potencial de toque é o que aparece na resistência A, que é a resistência do trecho A de terra. A corrente que passa pelo corpo do operador é mostrada no circuito formado pela resistência natural do corpo humano e a resistividade superficial da primeira camada do solo estratificado. Deste modo, garantimos máxima segurança a todos que estão sobre a malha de aterramento da subestação.

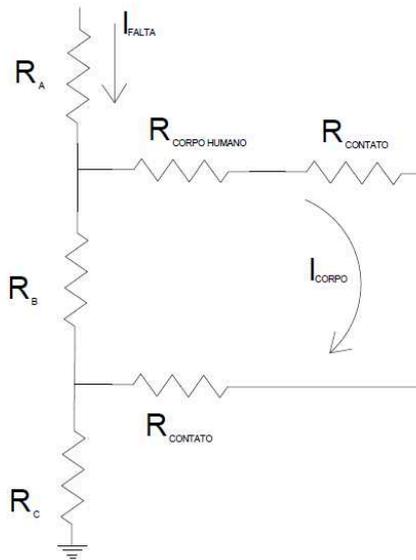
Para o potencial de passo, nos utilizaremos da mesma análise realizada anteriormente, com as seguintes equações:

$$V_{passo} < V_{passo \text{ máximo}} \quad [9]$$

$$(1000 + 6ps)I_{corpo} < [1000 + 6 * C(h, K) * ps] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

Da mesma forma que foi feito no item anterior, podemos definir o circuito que representa o potencial de passo, dentro dos limites da malha de aterramento na subestação.

Figura 17 - Potencial de Passo.



Fonte: O Autor.

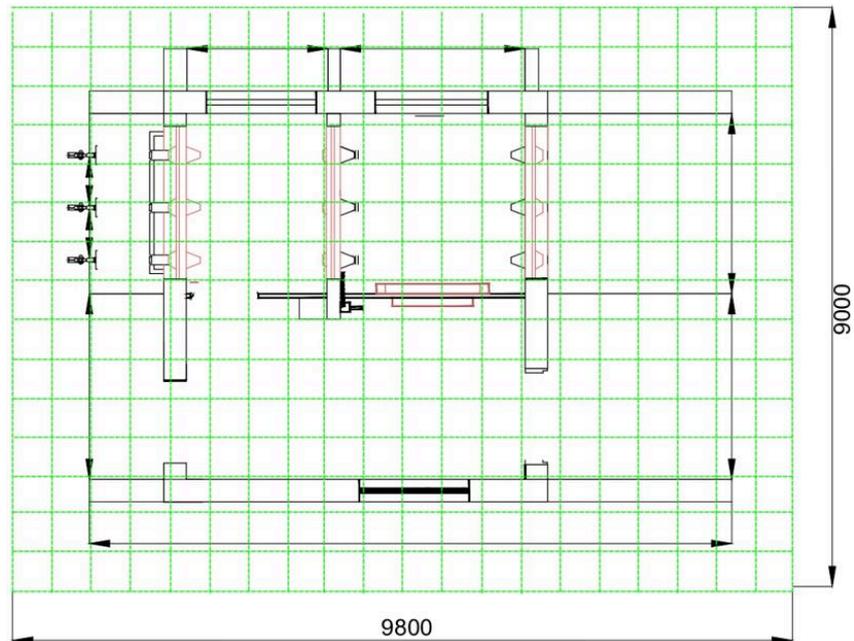
No circuito, podemos notar que há três trechos a terra considerados (A,B e C) e o potencial de passo é o que aparece na resistência B, sendo que a corrente que percorre o corpo do operador é indicada no circuito.

O projeto da malha de aterramento é um estudo iterativo em que são necessários procedimentos bem definidos para sua completa realização. Ao longo dos últimos parágrafos, foram apresentados métodos que visam a obtenção de dados para a realização do projeto. Deste modo, uma vez definido a estratificação do solo e a obtenção da resistividade de cada camada, já podemos definir o potencial máximo de toque e de passo na superfície do solo com a camada de britas que cobre o solo. De posse do estudo de curto-circuito que foi disponibilizado pela concessionária com os valores da corrente máxima de defeito assimétrica do tipo F-T, no ponto de conexão, temos o valor da corrente de defeito. Outro ponto de crucial atenção é o valor máxima de resistência de terra em que haverá completa sensibilidade por parte do relé de proteção instalado.

O primeiro passo para a realização do processo iterativo para o cálculo da malha de aterramento, será a adoção de um espaçamento de 5% em relação ao comprimento total de cada lado. Este valor foi adotado devido a experiência prévia do projetista em projetos de planta de

geração fotovoltaica. A figura abaixo é a planta baixa do projeto inicial da malha de aterramento.

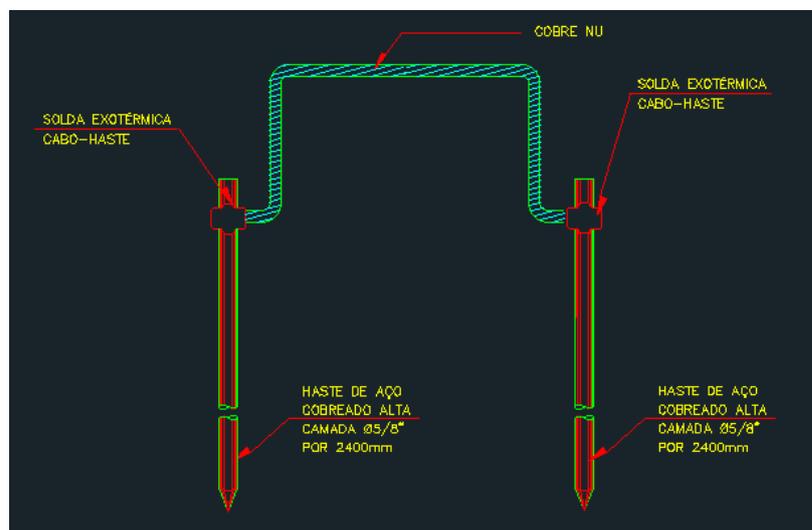
Figura 18 - Malha de Aterramento Inicial.



Fonte: O Autor.

Deste modo, podemos verificar os potenciais de toque, passo e a resistência de aterramento, de modo a definir a sensibilidade que esta terá sobre a proteção da subestação. A malha de aterramento será composta por hastes cravadas em solo, que interligará a malha de aterramento em cada ponto correspondente a 5% de seu comprimento e largura, tal como mostrado no corte AA (transversal), mostrado abaixo.

Figura 19 - Detalhe da malha de aterramento.



Fonte: O Autor.

Desta forma, a corrente de defeito irá chegar até a malha através do condutor de cobre nú, e injetando a maior parte da corrente no solo, através das hastes de aterramento. Por conta das hastes, há um aumento do comprimento total dos condutores da malha, de modo a reduzir o potencial máximo da malha, o que pode ser visto na equação seguinte.

$$V_{\text{malha}} = \frac{\rho_a K_m K_i I_{\text{malha}}}{L_{\text{cabo}} + 1,15L_{\text{hastes}}} \quad [10]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\}$$

Sendo que:

ρ_a = resistividade aparente vista pela malha

h = profundidade da malha (m)

e = espaçamento entre condutores da malha (m)

d = diâmetro do condutor de malha (m)

$$N = \sqrt{NaNb}$$

$$K_{ii} = 1$$

$$N = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$K_i = 0,656 + 0,172N$$

Enquanto podemos definir o potencial de passo da malha, que é uma das condições que devem ser satisfeitas, de modo a garantir a segurança de todos.

$$V_{psM} = \frac{\rho_a K_p K_i I_{\text{malha}}}{L_{\text{cabo}} + 1,15L_{\text{hastes}}} \quad [11]$$

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1}{e} (1 - 0,5^{N-2}) \right]$$

Desta forma, podemos verificar que a malha atende os requisitos especificados nos cálculos acima, algo que já era esperado pela distância adotada de 5% do comprimento e largura da malha.

6 PROJETO ELETROMECAÂNICO

Para o projeto eletromecânico ser aprovado na concessionária, precisamos analisar questões extremamente específicas que são previamente informadas ao projetista. Os isoladores, precisam estar a uma altura adequada de modo a respeitar as distâncias mínimas entre os condutores nus fase-fase, ou ainda fase-terra. Esta distância, para 13,8 kV, e NI de 110kV, é de 180mm. Desta forma, toda a estrutura em alvenaria e os condutores nus fase-fase, devem respeitar este valor. Já a distância mínima entre o anteparo, as telas e a grade metálica que separa a subestação, deve ser de 300mm, como afirmado na NTC91110 da COPEL.

Os isoladores do tipo pilar serão de porcelana, assim como o isolador de ancoragem do tipo bastão e do tipo disco. O isolador de pedestal será de classe 15kV, assim como o isolador de passagem.

O disjuntor especificado para este projeto, segue o modelo disponível comercialmente para subestações do mercado livre de energia.

Tabela 11 - Especificações Disjuntor

Uso	Interno
Tensão nominal	15 kV
Corrente nominal (mínima)	400 A
Frequência nominal	60 Hz
Capacidade nominal de interrupção em curto circuito (mínima)	10,5 kA
Tensão suportável nominal à frequência industrial durante 1 minuto (eficaz)	34 kV
Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (crista)	95 kV
Tempo total de interrupção (8 ciclos em 60 Hz)	130 ms

Fonte: O Autor.

As chaves seccionadoras que são utilizadas na entrada de serviço desta subestação serão tripolares, com mecanismo de operação (seccionamento) manual, com intertravamento mecânico do tipo Kirk acompanhada de indicação visual de sua posição (aberta ou fechada), mesmo que seus contatos estiverem expostos. As chaves seccionadoras possuem a posição ABERTO, quando é efetuada o deslocamento mecânico, de forma vertical, de sua alavanca ou punho de manobra para baixo. Desta forma, comercialmente se encontra a chave seccionadora que acompanha o mesmo disjuntor especificado anteriormente.

Tabela 12 - Especificação Chave Seccionadora

Uso	Interno
Tensão nominal	15 kV
Frequência nominal	60 Hz
Corrente nominal permanente (mínima)	400 A
Corrente suportável nominal de curta duração (It)	10,5 kA
Duração nominal da It	3 s
Valor de crista nominal da correntes suportável (Id)	31,25 kA
Tensão suport. nom. de impulso atmosférico (crista): à terra e entre pólos	95 kV
Tensão suport. nom. de impulso atmosférico (crista): entre contatos abertos	110 kV
Tensão suport. nom. à freq. ind. durante 1 min (eficaz): à terra e entre pólos	36 kV
Tensão suport. nom. à freq. ind. durante 1 min (eficaz): entre contatos abertos	40 kV

Fonte: O Autor.

Os transformadores de potencial que são destinados aos instrumentos de proteção da subestação possuem características específicas, por conta de sua aplicação. Desta forma, a tabela abaixo especifica o transformador de potencial aplicado tanto na subestação de entrada (abrigada ou de uso interior) , quanto na subestação skid (ao tempo ou de uso externo).

Tabela 13 - Especificação do Transformador de Potencial

Uso	Interno	Externo
Tensão máxima	15 kV	15 kV
Frequência nominal	60 Hz	60 Hz
Frequência industrial / Nível de isolamento	34/95 kV	34/110 kV
Meio dielétrico	Massa Isolante (Epóxi)	Óleo Isolante ou Resina Cicloalifática
Exatidão	*	*
Potência térmica nominal	*	*
Tensão primária nominal	13,8 kV	13,8 kV
Relação nominal	120:1	120:1
Grupo de ligação	1	1

Fonte: O Autor.

Da mesma forma, os transformadores de corrente, no que se refere ao seus componentes eletromecânicos serão especificados de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 14 - Especificação Transformador de Corrente

Uso	Interno	Externo
Tensão máxima	15 kV	15 kV
Frequência nominal	60 Hz	60 Hz
Frequência industrial / Nível de isolamento	34 / 95 kV	34 / 110 kV
Meio dielétrico	Massa Isolante (Epóxi)	Óleo Isolante ou Resina Cicloalifática
Exatidão	10%	10%
Fator térmico nominal	*	*
Corrente térmica nominal (I _{th})	*	*
Corrente dinâmica nominal	*	*
Corrente primária nominal (I _n)	*	*
Corrente secundária nominal	5 A	5 A
Fator de Sobre corrente (FS)	20xI _n	20xI _n

Fonte: O Autor.

A capacidade de condução de corrente para os barramentos feitos com vergalhões de cobre para uma instalação que é abrigada, é mostrada na tabela abaixo.

Tabela 15 - Capacidade de Condução de Barramentos

TA: 40 °C		ET: 30 °C	Frequência: 60 Hz
Bitola (pol)	Seção (cm ²)		Corrente (A)
1/4	0,3167		103
3/8	0,7126		179
1/2	1,2668		285

Fonte: O Autor.

Para os barramentos em barras chatas de cobre nu, quando realizado a montagem em cutelo, teremos a tabela de capacidade de condução abaixo.

Tabela 16 - Capacidade de Condução de Barras Chatas em Cobre

Condutividade: 97,40 – 98,70 % IACS TA: 40 °C ET: 30 °C Frequência: 60 Hz			
Dimensões	Seção mm²	Massa (kg/m)	Corrente (A)
3/4 x 1/4	120,97	1,0781	335
1 x 1/4	161,29	1,437	410
1 ½ x 1/4	241,94	2,231	565
2 x 1/4	322,58	2,875	730
2 ½ x 1/4	403,23	3,594	900
3 x 1/4	483,87	4,312	1025
4 x 1/4	640,88	5,750	1255

Fonte: O Autor.

7 SISTEMA DE PROTEÇÃO E SUAS FUNÇÕES

De acordo com o diagrama unifilar apresentado no projeto no Anexo B, há uma cabine de transferência, que faz a interface com a rede da concessionária e se conecta diretamente as subestações responsáveis pela conexão de cada conjunto de cubículos transformadores e geradores fotovoltaicos.

A cabine de transferência é composta por chaves seccionadoras colocadas em um cubículo seccionador com três posições: aberta, fechada e aterrada. As chaves por sua vez, são modulares, podendo ser estendidas em qualquer um de seus lados. A tensão nominal do cubículo é de 24kV, tripolar, 60Hz, com corrente nominal de 630A, com corrente admissível nominal de curta duração (1s) de 20kA, e seu valor de pico de 52kA, com tensão suportável nominal na frequência industrial de 60kV, e tensão suportável nominal de impulso atmosférico de 145kV e com proteção contra presença de tensão, através de sensor capacitivo na ordem de 24kV.

O cubículo de medição presente nas subestações é metálico com isolamento a ar, totalmente modular em ambos os lados, com espaçamentos apropriados para o nível de tensão nominal para a acomodação de TC's e TP's de medição. Há em seu interior espaços próprios para a alocação de pára-raios, transformadores, transformadores auxiliares e no-break. A tensão nominal do cubículo é de 24kV, tripolar, 60Hz, com corrente nominal de 630A, com corrente admissível nominal de curta duração (1s) de 20kA, e seu valor de pico de 52kA, com tensão suportável nominal na frequência industrial de 60kV, e tensão suportável nominal de impulso atmosférico de 145kV e com proteção contra presença de tensão, através de sensor capacitivo na ordem de 24kV.

O cubículo de proteção é o responsável por abrigar o disjuntor, TC's e TP's de proteção e chaves seccionadoras. Sendo totalmente modular, o equipamento é equipado com o disjuntor à vácuo, em série com a chave seccionadora de três posições: aberto, fechado e aterrado. A indicação visual da posição da chave é realizada na parte externa do cubículo através de um dispositivo eletromecânico. O cubículo pode ser estendido em ambos os lados, para fixação de mais módulos. tensão nominal do cubículo é de 24kV, tripolar, 60Hz, com corrente nominal de 630A, com corrente admissível nominal de curta duração (1s) de 20kA, e seu valor de pico de 52kA, com tensão suportável nominal na frequência industrial de 60kV, e tensão suportável nominal de impulso atmosférico de 145kV, com impulso atmosférico entre fase e terra de 125kV e com proteção contra presença de tensão, através de sensor capacitivo na ordem de 24kV.

Os transformadores de potência presentes na instalação serão de 1,1 MVA com tensão primária de 13,8kV e tensão secundária de 800V, com impedância de 0,05 p.u., com perdas em vazio de 764W, e perdas de transformação à 75°C de 10,3kW, com ligação estrela aterrada-Delta, e corrente nominal de aproximadamente 46A.

Desta forma, podemos definir as correntes de magnetização, a corrente ANSI e a NANSI, que são exigências no projeto de proteção. I_{n_i} é a corrente nominal do Transformador i (Transformador 1, Transformador 2, ... , Transformador i).

$$I_{mag} = 10 * I_{n_1} + \sum_{i=2}^{i=5} I_{n_i}$$

Desta forma, obtem-se o valor de $I_{mag} = 460,2A$.

$$I_{ansi} = \frac{I_n}{Z_{p.u.}} * 100$$

$$I_{nansi} = \frac{1}{\sqrt{3}} * I_{ansi}$$

Desta forma, obtem-se o valor de $I_{ansi} = 767 A$ e $I_{nansi} = 444,8 A$.

Realizado a introdução ao estudo de proteção, as funções de proteção em que há a obrigação de ser implementado na planta de geração são descritas abaixo, assim como a sua forma de cálculo.

7.1 Função de proteção de acordo com a nomenclatura ANSI

7.1.1 Função 67 – Relé Direcional de Corrente

A proteção 67 atua na sobrecorrente, mas com um filtro direcional sentido COPEL-ACESSANTE e/ou no sentido ACESSANTE-COPEL, a depender da necessidade previamente estipulada pela concessionária no momento de submissão do projeto de proteção. Esta função atua de maneira a evitar a falta de seletividade que possa vir a acontecer devido a bidirecionalidade do fluxo de potência proveniente da concessionária ou da planta de geração. A COPEL, indica que primeiramente, deve se submeter o projeto de proteção com a função 67 parametrizada no sentido ACESSANTE-COPEL, e caso haja necessidade de outro ajuste, será informada por ela, após a aprovação do projeto de proteção. Isto se dá devido a necessidade da concessionária em realizar a simulação no ANAFAS, de sua rede de distribuição, no ponto de conexão da planta de geração.

Para a determinação do valor de ajuste da proteção, será necessário obter a demanda contratada para a instalação da planta de geração, que geralmente começa limitada a algumas unidades até que a empresa venda as cotas de cada módulo a seus clientes. Os conversores de frequência serão ajustados de maneira a ter um fator de potência resistivo.

$$I_n = \frac{D}{1 * 13,8kV * \sqrt{3}}$$

Desta forma, qualquer defeito que haja na rede de distribuição, não será alimentada pela planta de geração, uma vez que a função 67 irá atuar instantaneamente, logo quando a corrente ultrapassar a nominal calculada através da demanda. A função 50/51 será a utilizada para proteger o cliente de defeitos na parte da ACESSANTE em que a concessionária irá alimentar a falta. Desta forma, precisamos parametrizar a função 67 para que esta atue de maneira mais rápida que a 50/51, de modo que possamos determinar se o defeito está a acontecer dentro da planta de geração ou na rede de distribuição da concessionária para que possa realizar uma intervenção sendo que esta informação será mostrada pelo relé de proteção.

A corrente de pick-up ajustada será de 1,05 p.u. da corrente nominal calculada pela demanda, de modo a garantir a sua correta operação em condições normais. O tempo de atuação da proteção para esta mesma corrente será de 1,5 segundos, da mesma forma que é mencionado nos manuais da COPEL. Será ainda ajustada uma corrente de pick-up instantânea de 1,09 p.u. para que haja completa segurança na operação da planta, e de seus conversores de frequência.

O relé utilizado possui o ângulo de medição de 90° - disposição das bobinas de medição - sendo que os conversores de frequência foram ajustados de modo a trabalharem com fator de potência resistivo, sendo que seu ângulo de fator de potência, como consequência, é zero. Desta forma, o ângulo de disparo parametrizado para a função 67 será de 90°.

7.1.2 Função 67N – Relé Direcional de Corrente de Neutro

A proteção 67N atua na sobrecorrente de neutro, da mesma forma que na 67 com o mesmo filtro direcional sentido COPEL-ACESSANTE e no sentido ACESSANTE-COPEL, a depender da necessidade previamente estipulada pela concessionária no momento de submissão do projeto de proteção. Esta função atua de maneira a evitar um desbalanço de corrente maior que 0,2 p.u. em relação a corrente nominal da planta de geração no neutro. Desta forma, a corrente de pick-up da função será de 0,2 p.u. da corrente nominal, sendo que o tempo de atuação da função será em 1,5 segundos. A proteção instantânea será de 0,25 p.u.

A função 67N, na prática, jamais irá atuar, devido a presença da função 59N, em que há a detecção de desbalanço de tensão nas fases, antes mesmo de chegar ao neutro. No entanto, a função 67N é obrigatória para a aprovação junto a concessionária, e deve ser submetida para aprovação.

7.1.3 Função 51 – Relé de Sobrecorrente Temporizada de Fase

A função 51 supervisiona o valor eficaz da corrente que circula no alimentador em que o relé está protegendo. Quando há um valor de corrente eficaz maior que o parametrizado pela corrente de pick-up, haverá o envio de trip do relé para o disjuntor realizando o comando de abertura do circuito. A unidade 51 é temporizada, pois possui retardo de tempo podendo operar em função da intensidade de corrente em que circula no circuito, dependendo da curva de atuação parametrizada.

Para proteger os transformadores de possíveis sobrecargas resultantes no sentido do cliente, haverá uma corrente de pick-up ajustada a 1,05 p.u. da corrente nominal de demanda calculada. A curva utilizada será a IEC Normalmente Inversa.

$$DIAL_{51} = \frac{\left(\frac{I_{inrush}}{I_{51}}\right)^1 - 1}{13,5} * (0,1 + 0,05)$$

Desta forma, o dial de tempo calculado será de 0,2 segundos.

7.1.4 Função 50 – Relé de Sobrecorrente Instantânea de Fase

Da mesma forma que a função 51, a 50 monitora a intensidade de corrente que circula no alimentador em que a função está protegendo. Quando há um valor de corrente eficaz maior que o parametrizado pela corrente de pick-up, haverá o envio de trip do relé para o disjuntor realizando o comando de abertura do circuito. A grande diferença é que esta função atua instantaneamente.

Esta função será parametrizada de modo a ter uma corrente de pick-up de 2.840A para o relé skid, 2.900A para o relé principal e 3.000A para o religador automático.

7.1.5 Função 51N – Relé de Sobrecorrente Temporizada de Neutro

A função 51N é uma unidade de proteção contra sobrecorrente temporizada para o neutro, no qual há o monitoramento da corrente eficaz que circula no barramento em que está sendo protegido.

A corrente de pick-up parametrizada para esta função será de 0,23 p.u. para o relé skid, 0,29 p.u. para o relé principal e 0,32 p.u. para o religador automático, sendo que a curva utilizada será a mesma nas funções anteriores: IEC Normalmente Inversa. Deste modo podemos definir que o dial de tempo será de 0,2 segundos.

7.1.6 Função 50N – Relé de Sobrecorrente Instantânea de Neutro

A função 50N irá realizar a proteção instantânea da planta de geração, de modo a evitar que a concessionária alimente defeitos nas instalações internas da planta. Para isso, definiremos a corrente de pick-up sendo de 100 A para o relé skid, 105A para o relé principal e 115A para o religador automático.

7.1.7 Função 51V – Sobrecorrente com Restrição de Tensão

A função 51V tem a função de determinar a distância em que a falta está acontecendo do relé. No momento do defeito, há um grande aumento da corrente que gera da mesma forma um aumento na queda de tensão. O relé recebe estas duas informações, e as transforma em uma impedância, e sabendo a resistividade da linha, sabe-se a distância em que a falta está, do relé.

A função atua na planta de geração como proteção de retaguarda, de modo a aumentar a sensibilidade do relé para defeitos ocorridos no ACESSANTE. A função será responsável por modificar a corrente de pick-up, de maneira proporcional a redução de tensão medida pelos transformadores de potenciais durante a falta.

Desta forma, iremos ajustar uma tensão de restrição de 0,9 p.u. da tensão nominal de fase, de modo que qualquer redução anormal de tensão causada, por exemplo, por um defeito, irá reduzir o tempo de atuação e a corrente de pick-up de maneira proporcional, gerando um aumento significativo da sensibilidade ao defeito.

7.1.8 Função 27 – Subtensão

A função 27 monitora a tensão eficaz do ponto de instalação, para que haja a atuação de um elemento de seccionamento do circuito no momento em que a tensão fique abaixo de um valor pré-definido pela concessionária. A COPEL define valores específicos para a desconexão da central geradora, quando o determinado nível de tensão fique abaixo do previsto na rede.

A tensão monitorada é de fase, e a função irá atuar para um valor de 0,8 p.u. da tensão nominal da rede, em um tempo de operação de 0,4 segundos.

7.1.9 Função 59 – Sobretensão

A função 59 monitora os valores de tensão eficaz no barramento do cliente, sendo que a função atua no momento em que a tensão fique maior que um valor pré-definido pela concessionária.

A tensão monitorada é de fase, sendo que a proteção irá atuar para um valor de tensão de 1,1 p.u. da tensão nominal da rede, em um tempo de operação de 0,2 segundos.

7.1.10 Função 59N – Sobretensão de neutro

Tendo em vista que o transformador de conexão à COPEL é delta-estrela e em situações normais de operação, a componente de sequência zero tem seu valor eficaz de tensão igual a zero. Caso haja uma falta assimétrica do tipo fase-terra no sistema, ocorrerá um desbalanço das componentes da tensão, sem alterar o módulo de sua tensão de fase.

Quando a proteção da subestação da COPEL realizar a abertura do disjuntor, haverá um aumento da tensão de sequência zero, fazendo com que a função 59N do cliente atue, evitando o ilhamento da planta de geração.

A função 59N irá atuar desconectando o barramento do cliente, no momento em que há faltas assimétricas monofásicas. A função monitora a tensão do neutro, e atua sempre que o valor predefinido na proteção for ultrapassado. Para esta função iremos adotar o valor já definido pela concessionária de 0,3 p.u. da tensão de fase da planta de geração, na qual qualquer valor acima, a proteção irá atuar. O tempo de atuação será de 0,1 segundos.

7.1.11 Função 81O/U – Sobrefrequência e Subfrequência

A função 81O/U tem como objetivo realizar a desconexão da planta de geração em todos os momentos em que a frequência ficar abaixo ou acima de um valor parametrizado no relé de proteção. Esta função será parametrizada conforme indicado pela COPEL, em que a função de proteção irá atuar para valores maiores que 1,03 p.u. da frequência nominal ou em 0,95 p.u. com o tempo de atuação de 0,2 segundos para qualquer corrente.

7.1.12 Função 46 – Relé de Desbalanceamento de Corrente

A função 46 atua de maneira a proteger o gerador fotovoltaico, e assegurar a coordenação entre ela e a proteção do gerador. A função atua na interconexão com a COPEL, de maneira que a sensibilidade desta função, por razão de desequilíbrios das correntes de fase, é maior que a proteção que irá atuar no gerador. Desta forma, caso haja um desequilíbrio de corrente na rede da COPEL, o paralelismo com a rede da concessionária será desfeito, e o gerador fotovoltaico será desconectado.

Da mesma forma, caso o desequilíbrio de corrente for originado na planta de geração fotovoltaica, o paralelismo será desfeito da mesma forma, e a planta será desconectada para que haja a completa proteção dos equipamentos do sistema de distribuição da COPEL e em seguida o sistema de proteção do gerador fotovoltaico irá atuar, protegendo e desligando o mesmo da rede da concessionária COPEL.

A COPEL estabelece que os valores para esta função deve ser de 0,15 p.u. da corrente nominal, calculada pela demanda contratada, sendo que o tempo de atuação deve ser de 3,5 segundos.

7.1.13 Função 47 – Relé de Desbalanceamento de Tensão

O desbalanceamento de tensão é definido pela razão entre a componente de sequência zero, pela componente de sequência positiva do sinal que está sendo monitorado.

Esta função protege a planta de geração fotovoltaica contra aberturas indevidas nos equipamentos de proteção, devido a desequilíbrios de tensão ou até mesmo inversão da sequência de fases. O envio do trip ao disjuntor, na função que será parametrizada, é condicionada a detecção de inversão de fases, com o tempo de atuação fixo em 0,2 segundos.

7.1.14 Função 98 – Oscilografias

A COPEL estabelece que o acessante deverá instalar um relé e habilitar a função 98 deste, de forma a registrar as formas de ondas de corrente e tensão antes, durante e logo depois da ocorrência de uma falta, por um período total de, no mínimo, 2 segundos. Realizamos o ajuste e habilitação da função 98 para um tempo de 2 segundos.

7.1.15 Função 25 – Sincronismo e Anti-ilhamento

A função 25 monitora o sincronismo entre a rede de distribuição da COPEL e a unidade de geração. No caso da geração fotovoltaica, este sincronismo é de total responsabilidade dos conversores de frequência instalados na planta. Isto porque o conversor é um dispositivo que possui uma malha fechada de controle, que realiza o acionamento de suas chaves estáticas, de modo a sincronizar com a rede. Juntamente com a função 25, há a função anti-ilhamento, que monitora a o sinal de tensão – que também é a referência da malha de controle – e desliga a unidade conversora de frequência, quando a tensão no barramento da concessionária é zero, evitando o ilhamento da planta de geração fotovoltaico.

7.2 Transformadores para proteção

7.2.1 Transformadores de corrente

Na seção 5.2 deste documento há as informações de curto-circuito fornecidas pela concessionária e que serão utilizadas para realizar o dimensionamento dos transformadores de corrente.

Considerando as correntes adotadas no Capítulo 7, e a parametrização encontrada para as diversas funções mencionadas, iremos adotar um transformador de corrente de relação 150:5, modelo 10B50 que possui tensão máxima de saturação de 50V. O condutor que faz parte do circuito de sinal que irá para o transformador de corrente é um cabo de 4 mm², com comprimento total de 10 metros e resistividade de 4,7 Ω por quilômetro (km). O consumo dos 3 transformadores de corrente é de 1,5 VA, que será utilizado no cálculo para a determinação da impedância da carga no relé.

Desta forma, devemos considerar que a tensão de saturação calculada deve ser menor ou igual a tensão de saturação nominal do transformador de corrente.

$$V_{cs} \leq V_{ns}$$

Sendo que a tensão de saturação calculada tem sua fórmula mostrada abaixo

$$V_{cs} = \frac{I_{CC3\phi}}{RTC} * Z_{Load}$$

Sendo que

$$Z_{Load} = Z_{condutor} + Z_{relé} + Z_{\tau C}$$

Sendo o condutor composto por uma resistividade Z e um comprimento D , teremos

$$Z_{condutor} = 2 * Z_{cabo} * D$$

A impedância da relé pode ser facilmente obtida pela potência aparente de sua carga

$$Z_{relé} = \frac{S}{ITC^2}$$

Sabendo que é definido,

$$Z_{\tau C} = Z_{burden} * 0,2$$

Teremos que a impedância será

$$Z_{burden} = 0,5 \Omega$$

Desta forma, iremos verificar se haverá saturação do transformador de corrente, caso haja uma falta simétrica trifásica na rede.

$$Z_{\tau C} = 0,5 * 0,2 = 0,1 \Omega$$

Calculamos então a impedância total dos transformadores de corrente, que estão conectados ao relé.

$$Z_{relé} = \frac{1,5}{5^2} = 0,06 \Omega$$

Considerando a impedância total da carga vista

$$Z_{Load} = Z_{condutor} + Z_{relé} + Z_{\tau C}$$

$$Z_{Load} = 2 * \frac{4,7}{1000} * 10 + 0,06 + 0,1 = 0,254 \Omega$$

De forma que chegamos a impedância total de $0,254 \Omega$ que ao levar em conta a corrente de curto-circuito trifásica fornecido pela concessionária, teremos o valor de saturação calculado, que deve ser comparado com o valor de tensão nominal de saturação.

$$V_{cs} = \frac{2731,2}{30} * 0,254 = 23,13 V$$

Desta forma, garantimos que o transformador de corrente não irá saturar para a condição máxima de solicitação que é um defeito trifásico, quando a tensão máxima de saturação calculada for menor ou igual a tensão máxima de saturação nominal.

$$23,13 V \leq 50 V (OK!)$$

7.2.2 Transformadores de potencial

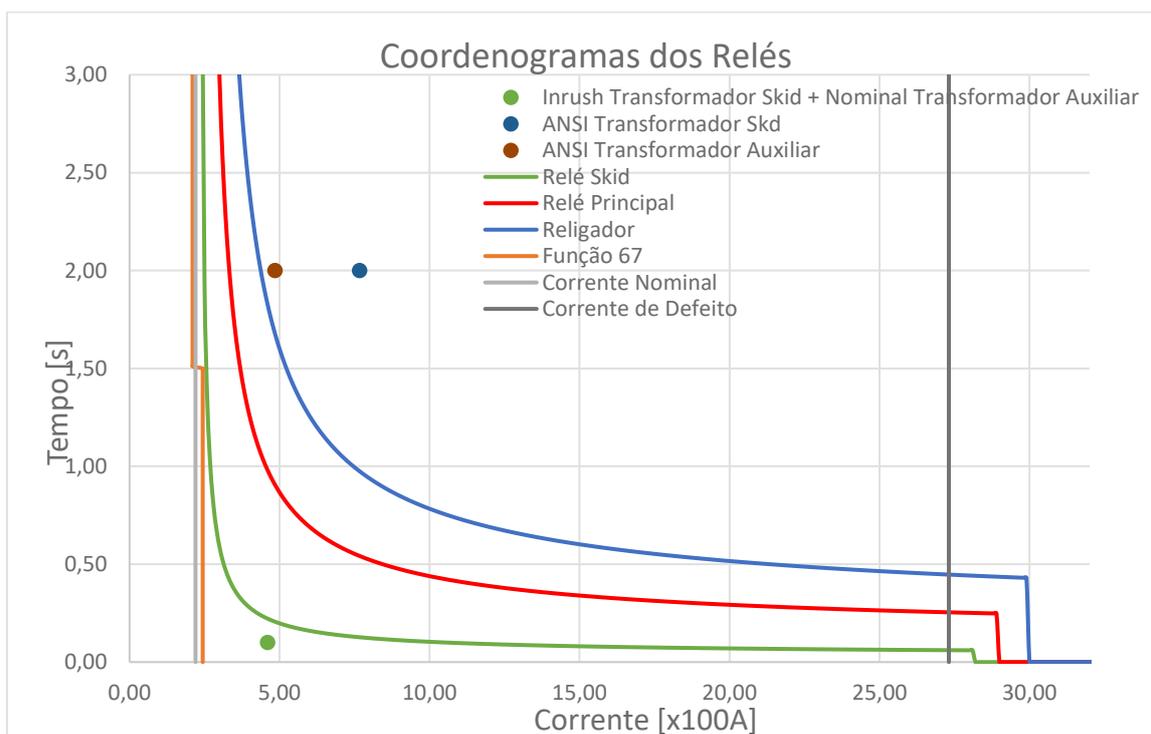
Os transformadores de potencial instalados no projeto serão de uso exclusivo do relé de proteção, que garante precisão de 0,24% na leitura, quando a carga instalada for menor que 75VA no relé. Os transformadores de potencial possuem juntos, uma carga de 1,5VA que é menor que o valor máximo de carga permitido.

Os transformadores de potencial instalados no projeto para comando, serviços auxiliares e referência, serão utilizados especificamente para cada tipo de uso. Como pode ser visto no diagrama unifilar, será especificado um transformador de potencial que irá alimentar o nobreak, o relé, realizar o comando eletromecânico, serviços auxiliares, iluminação, iluminação de emergência e sistema de pânico, e a motorização dos disjuntores e demais dispositivos seccionadores.

7.3 Coordenograma de proteção com os ajustes realizados

Com os parâmetros calculados na seção anterior, foi possível contruir o coordenograma da subestação, como mostrado no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Coordenograma de Fase dos Relés.

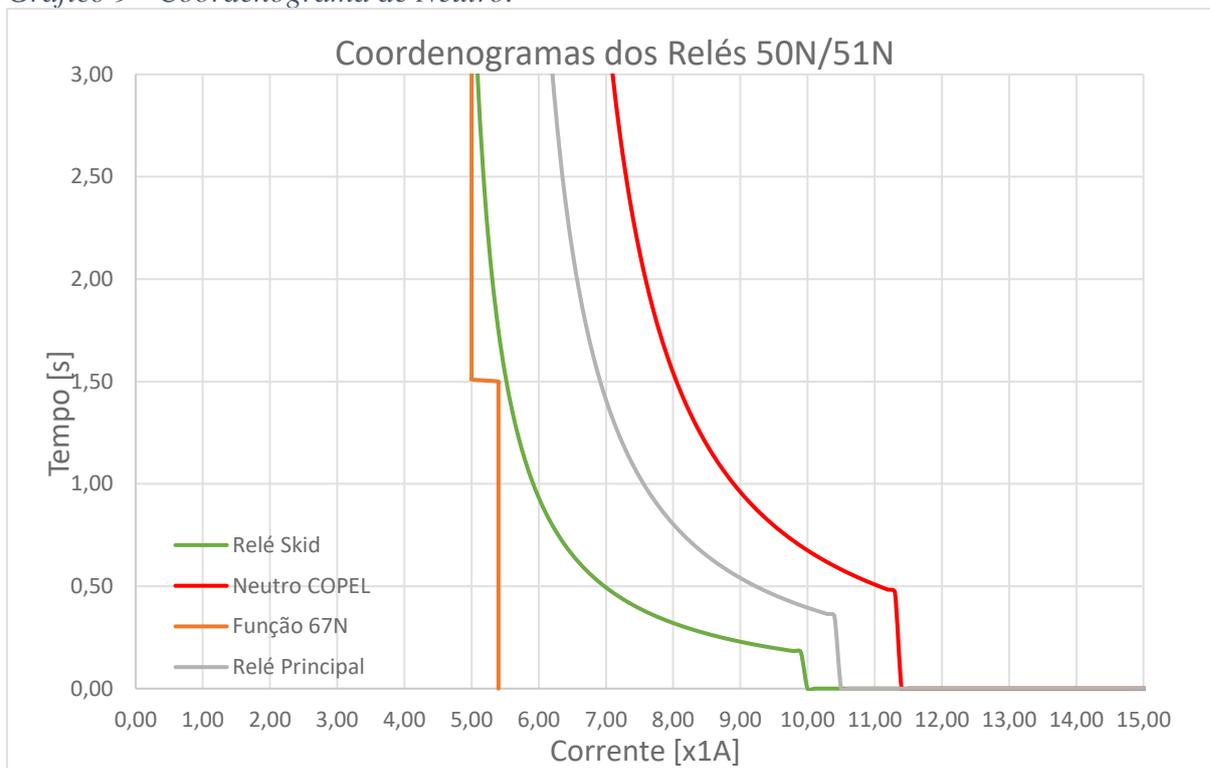


Fonte: O Autor.

A corrente de curto-circuito no ponto de conexão com a planta de geração fotovoltaica é de 2.731 A, deste modo podemos perceber que há coordenação da proteção, no momento do curto-circuito. A corrente de dano dos transformadores é de 767 A, por no máximo 2 segundos. Pelo coordenograma, podemos perceber que os transformadores da instalação estão protegidos. A corrente de inrush dos transformadores é de 460 A, que dura 0,1 segundos e pelo coordenograma, podemos perceber que a proteção não irá atuar por conta da operação normal de partida dos transformadores. A planta de geração irá operar com apenas 525 kW de demanda inicial, realizando um aumento de demanda, assim que novas cotas forem compradas pelos clientes, sendo que a corrente nominal será de aproximadamente 22A.

Da mesma forma, podemos construir o coordenograma de proteção para as funções 50N e 51N que tem a função de proteger o neutro do sistema, como visto no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Coordenograma de Neutro.



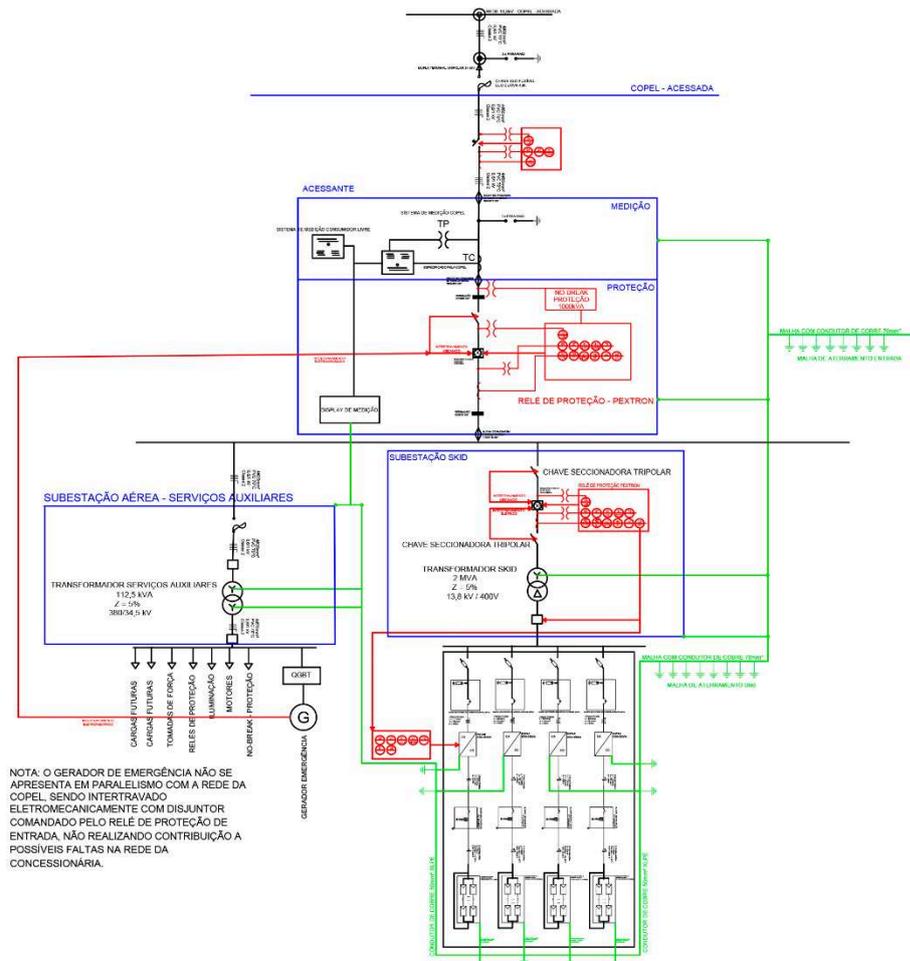
Fonte: O Autor.

A utilização das funções de proteção para o neutro, como anteriormente explicada, se mostra externamente necessária para proteger o sistema contra faltas assimétricas e sinistros que podem ocorrer na planta, de maneira a não sensibilizar o relé em um evento atípico.

8 DIAGRAMA UNIFILAR COMPLETO

O diagrama unifilar mostrado na Figura 21 deixa claro todas as conexões elétricas e proteções que estão sendo aplicadas ao longo da instalação, mostrando como o projeto deve ser executado.

Figura 20 - Diagrama Unifilar da Planta.

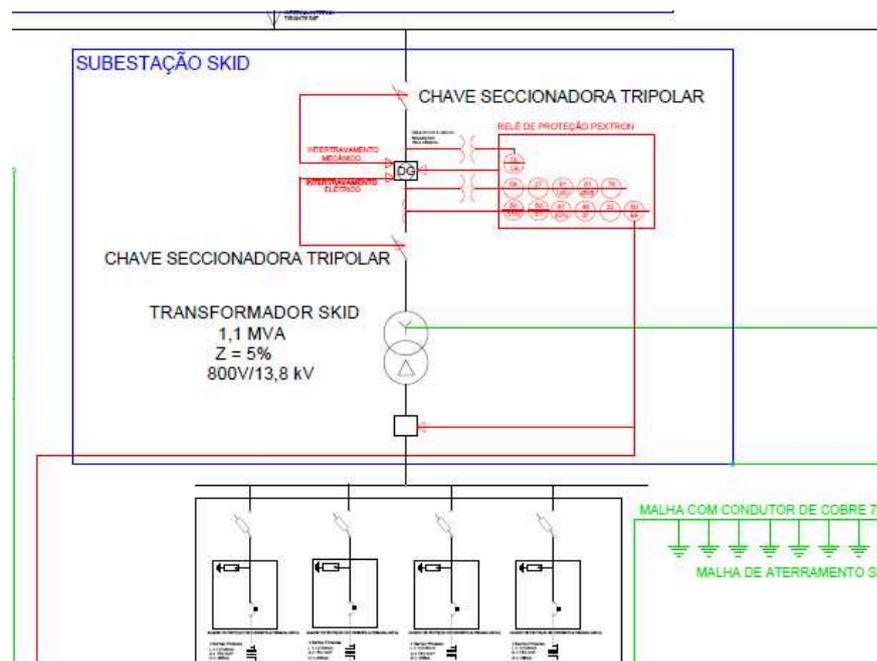


Fonte: O Autor.

O diagrama unifilar foi projetado de maneira a considerar o poste em que haverá a conexão da central geradora em tensão primária de distribuição – em 13,8 kV, pela COPEL – de maneira que há ainda, dentro da propriedade outro poste que realiza o içamento do condutor e a proteção contra descargas atmosféricas, através de pára-raios em cada uma das fases. Há especificado uma chave fusível, para realizar a proteção contra uma corrente de defeito e um religador automático com as funções mencionadas no unifilar para proteção.

barramento, adquirindo os sinais de corrente e tensão através dos transformadores de corrente e potencial do barramento. O relé envia o trip ao mesmo disjuntor à vácuo, que para uma dada corrente de pick-up, abre o circuito da planta de geração em conjunto com a chave seccionadora. O vergalhão, então, é conectado ao barramento principal da planta de geração através de cabos, com ajuda de uma bucha de passagem externa, que faz o isolamento entre a subestação abrigada e o barramento principal., como mostrado abaixo, na Figura 24.

Figura 23 - Detalhe subestação skid



Fonte: O Autor.

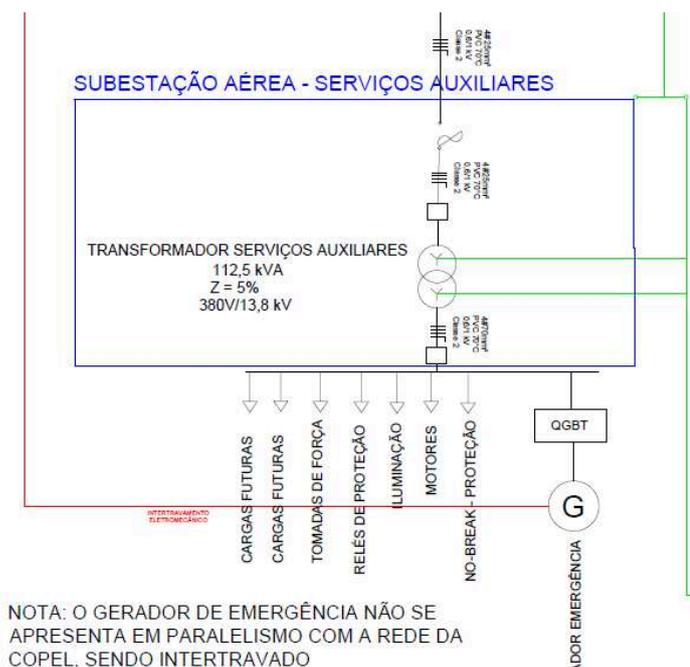
Conectado a este barramento, há a subestação skid, que é uma subestação compacta, blindada que possui em seu interior um disjuntor à vácuo, intertravado mecanicamente com duas chaves seccionadoras à jusante e à montante. Juntamente com os elementos seccionadores, há o relé de proteção que monitora os sinais de tensão e corrente através do mesmo barramento, com transformadores de corrente e tensão.

Ainda nesta mesma subestação, há um transformador Estrela Aterrada-Delta. A escolha da topologia de ligação de suas bobinas foi exclusivamente por conta da tentativa de conter a corrente de sequência zero, no delta do transformador, de modo a melhorar a qualidade da energia elétrica que será injetada na rede da concessionária. A escolha se estabelece no conceito em que as fases são equilibradas, e que a corrente de 3ª harmônica será de sequência zero, sendo mitigada pela ligação delta do transformador. Logo após o transformador há um disjuntor, que realiza a proteção na baixa tensão do transformador. Os conversores de frequências são ligados diretamente as caixas de strings, e que estas realizam a conexão entre as diversas combinações

de módulos fotovoltaicos. Há proteções contra descargas atmosféricas em cada quadro de proteção de corrente alterada e contínua, assim como elementos de seccionamento sob carga. Há ainda um fusível de proteção, que protege cada ramal de geração, de maneira independente.

Para a correta operação da planta de geração fotovoltaica, é necessário a especificação de um gerador de emergência, conectado a uma subestação aérea para realizar a alimentação dos serviços auxiliares, como pode ser visto na Figura 25.

Figura 24 - Detalhe subestação de serviços auxiliares



Fonte: O Autor.

Este gerador síncrono deve obrigatoriamente ter um intertravamento eletromecânico com o disjuntor geral, de modo que o gerador apenas entre em operação, quando toda a planta de geração está desconectada do barramento da concessionária. Este método é utilizado para evitar o ilhamento da planta, de modo a proteger os operários que poderão estar trabalhando na rede de distribuição.

O gerador síncrono é especificado de maneira a conseguir atender a demanda de novas cargas que poderão ser conectadas ao barramento desta mesma subestação aérea, as tomadas de força, o relé de proteção, a iluminação local e os motores. O gerador deve ser ligado em baixa tensão, e conectado ao barramento da subestação através de um quadro de distribuição.

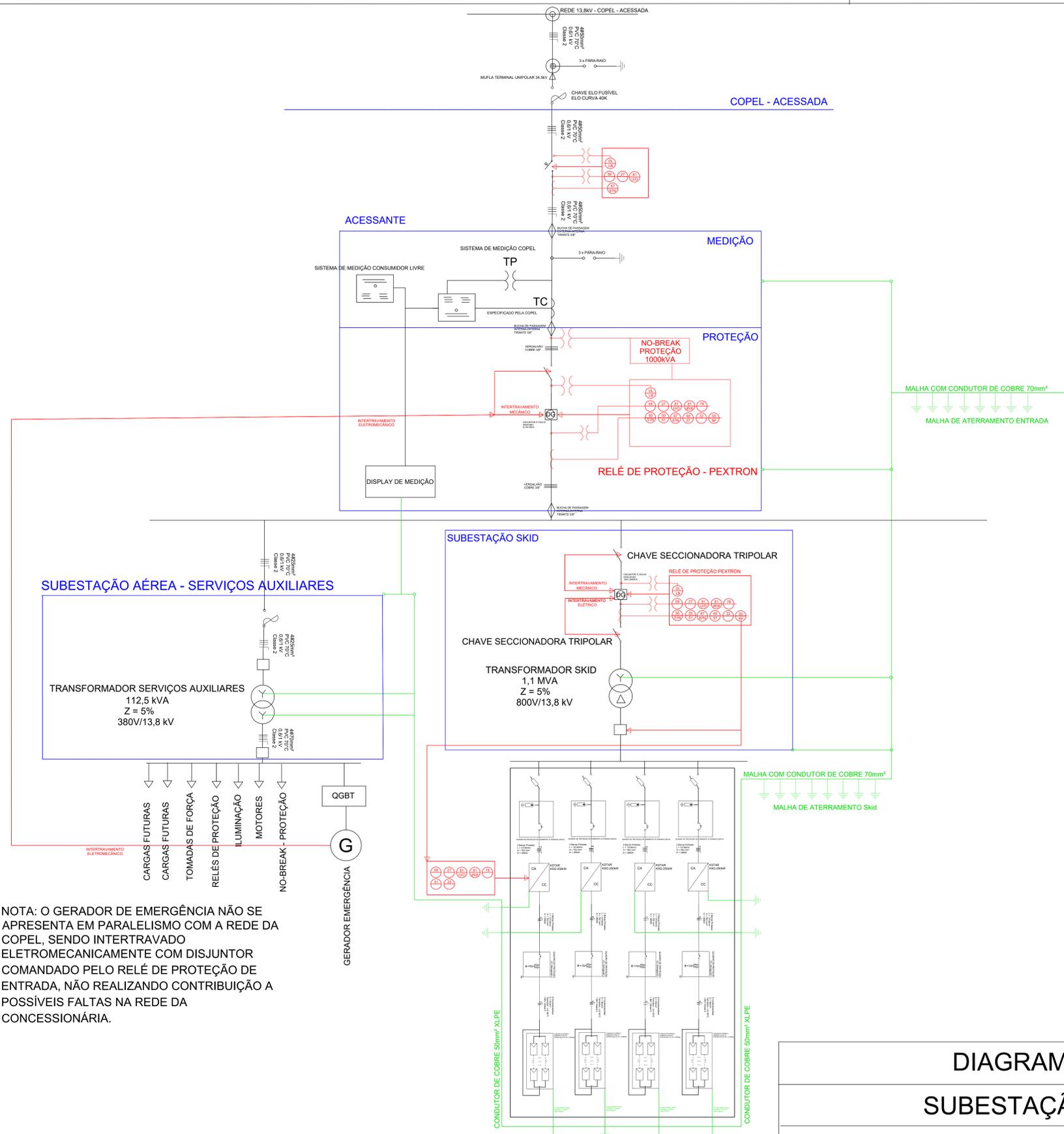
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRESESB-CEPEL, Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, Rio de Janeiro. Ago.2004. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004. Pdf Acesso em: 04 Mar.2021, 18:42.
- NBR 14039. Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. ABNT, 2005
- FILHO, João Mamede. Instalações Elétricas Industriais. 9. ed. LTC, 2017
- RIZZONI, Giorgio. Fundamentos de Engenharia Elétrica. 1. ed. Bookman, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST): Módulo 3 – Acesso ao sistema de distribuição. 2012. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo3_revisao_5.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.
- PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CRESESB. 2014.
- KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. Aterramento elétrico. 4. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1998. 214p.
- AGÊNCIA Nacional de Energia Elétrica - ANEEL . Nota Técnica ANEEL nº175. ANEEL, 2008.
- COPEL Distribuição S. A. Manuais de Instrução Técnica de projeto e construção de Redes Subterrâneas. 2005.

ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR

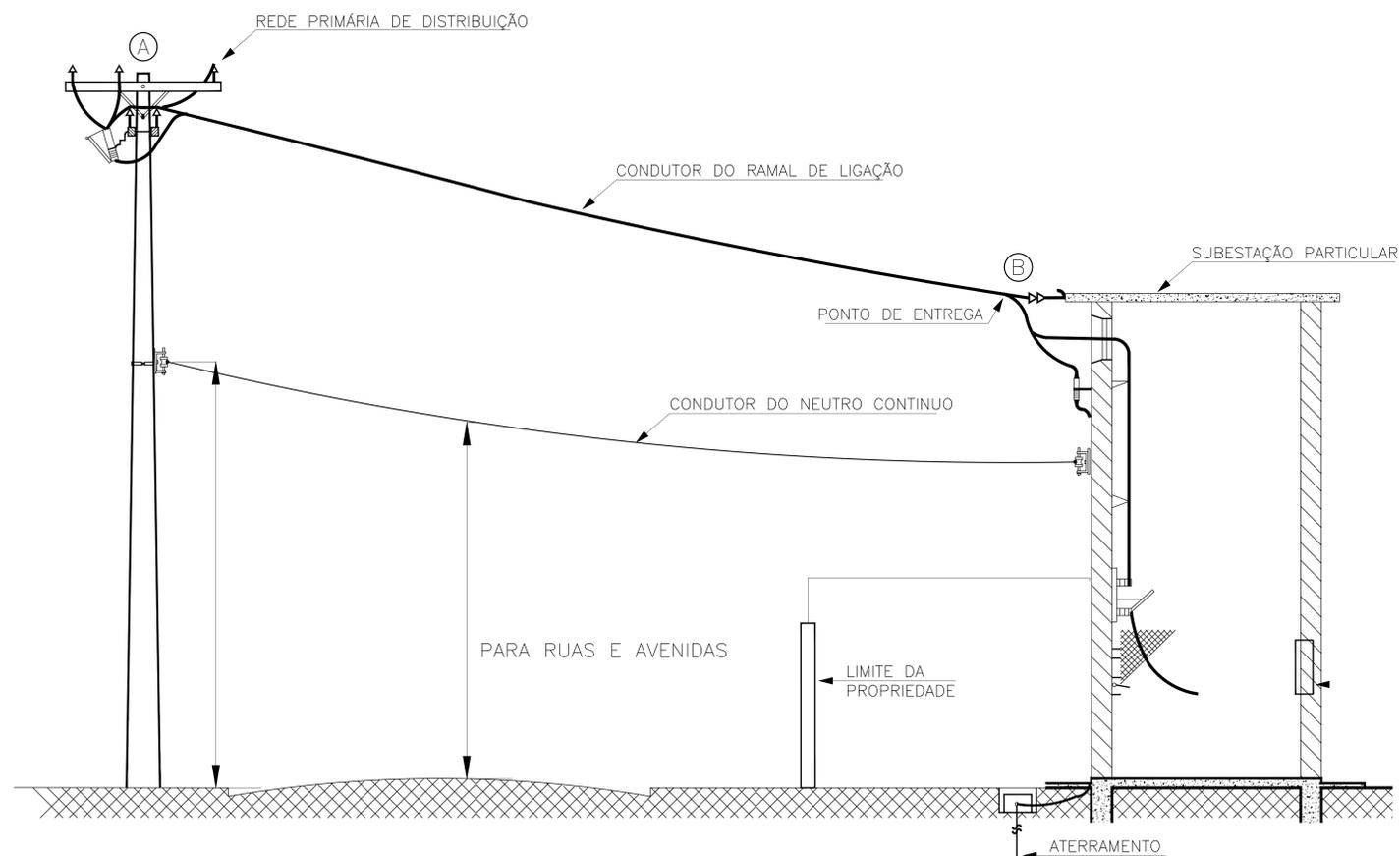
ANEXO B – COORDENOGRAMA DE FASE

ANEXO C – COORDENOGRAMA DE NEUTRO

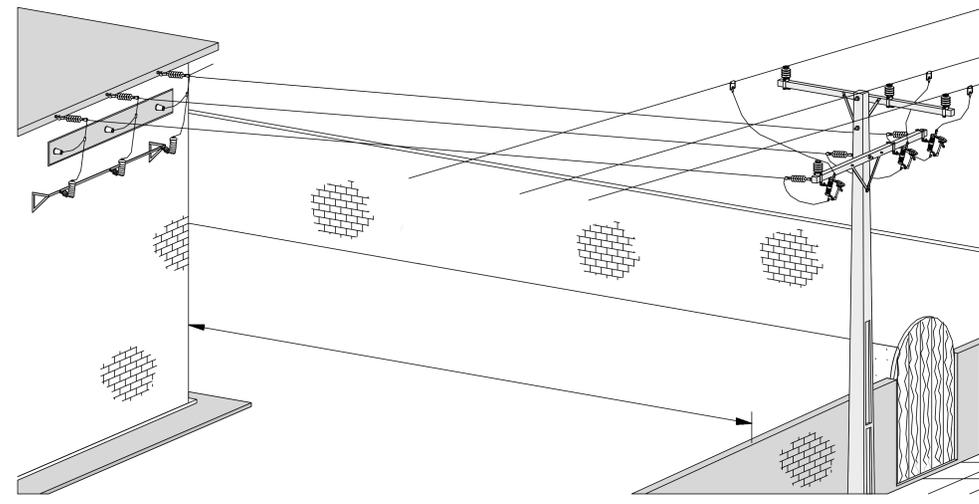


NOTA: O GERADOR DE EMERGÊNCIA NÃO SE APRESENTA EM PARALELISMO COM A REDE DA COPEL, SENDO INTERTRAVADO ELETROMECANICAMENTE COM DISJUNTOR COMANDADO PELO RELÉ DE PROTEÇÃO DE ENTRADA, NÃO REALIZANDO CONTRIBUIÇÃO A POSSÍVEIS FALTAS NA REDE DA CONCESSIONÁRIA.

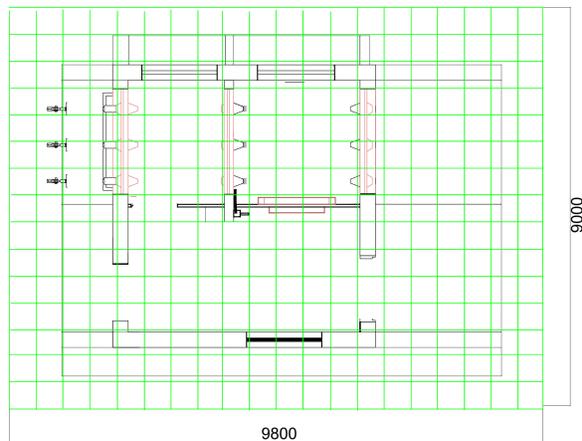
DIAGRAMA UNIFILAR	REV 2
SUBESTAÇÃO DE MEDIÇÃO E PROTEÇÃO	
COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA	



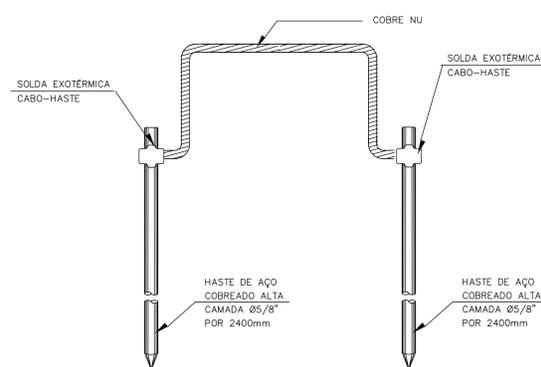
- (A) (C) - ENTRADA DE SERVIÇO
- (A) (B) - RAMAL DE LIGAÇÃO
- (B) (C) - RAMAL DE ENTRADA
- (B) - PONTO DE ENTREGA



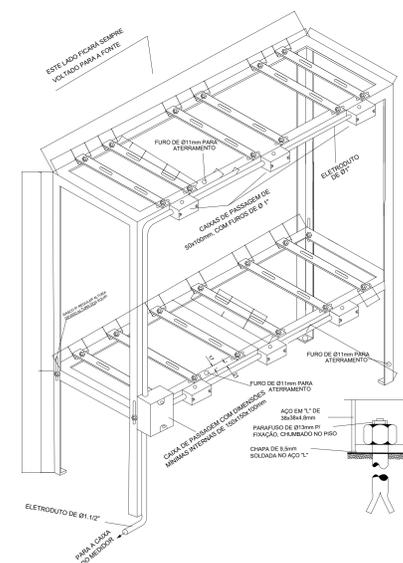
PROJETO ELETROMECÂNICO	REV 2
SUBESTAÇÃO DE MEDIÇÃO E PROTEÇÃO	
COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA	



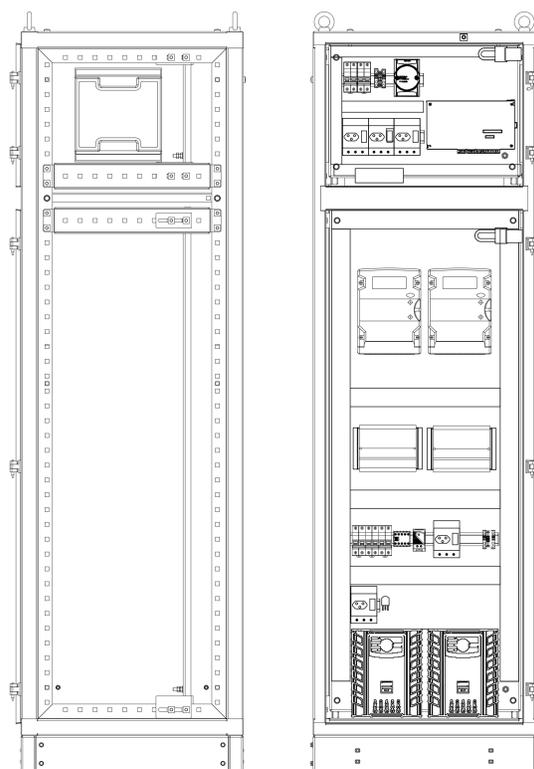
MALHA DE ATERRAMENTO



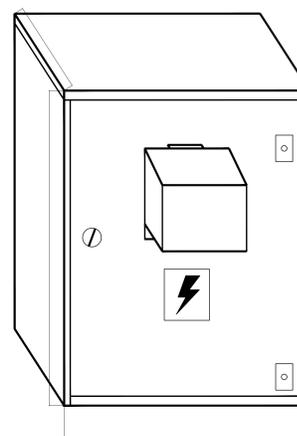
DETALHE CONEXÃO DA HASTE



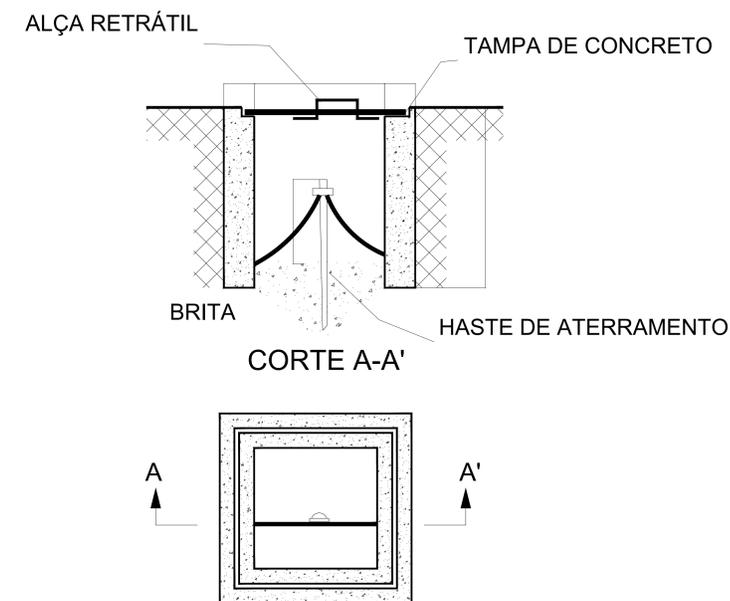
DETALHE CAVALETE PARA MONTAR TC E TP



PAINEL MEDIÇÃO FATURAMENTO



CAIXA PARA PROTEÇÃO GERAL



CAIXA DE INSPEÇÃO DA MALHA ATERRAMENTO

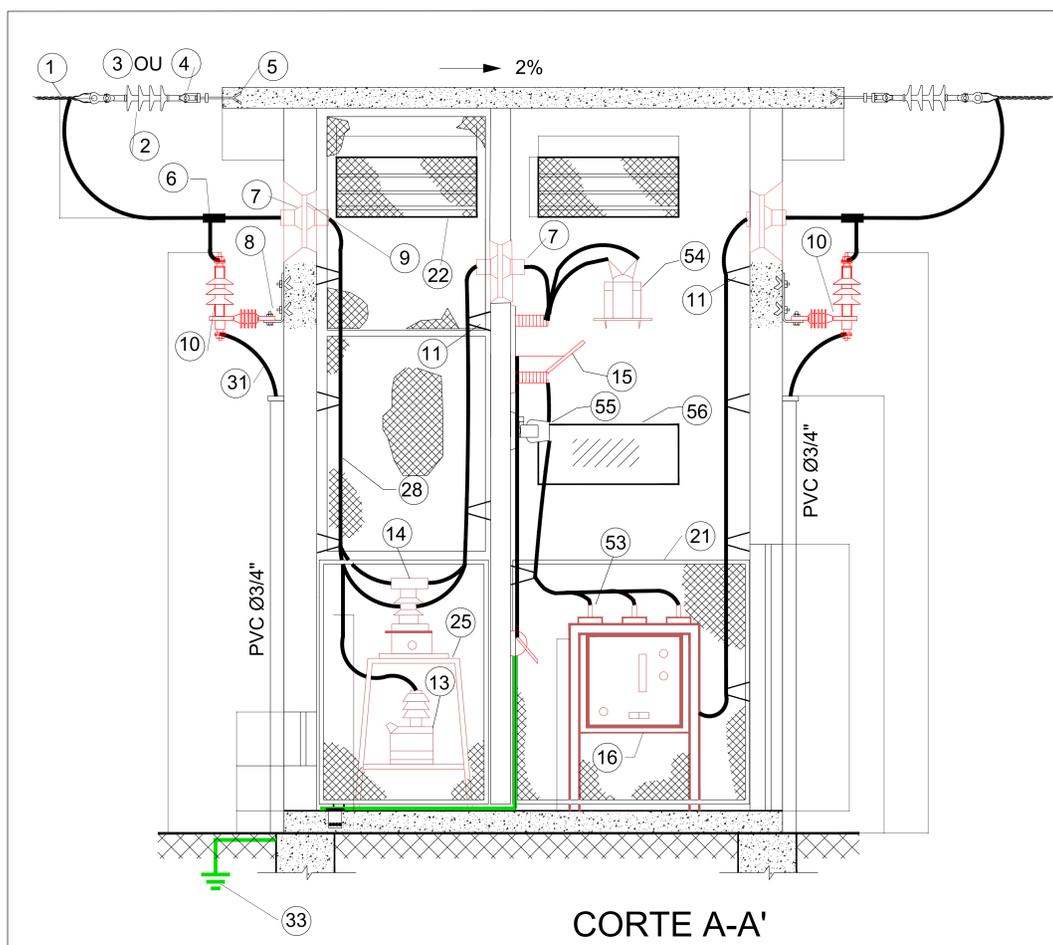
PROJETO ELETROMECCÂNICO

REV

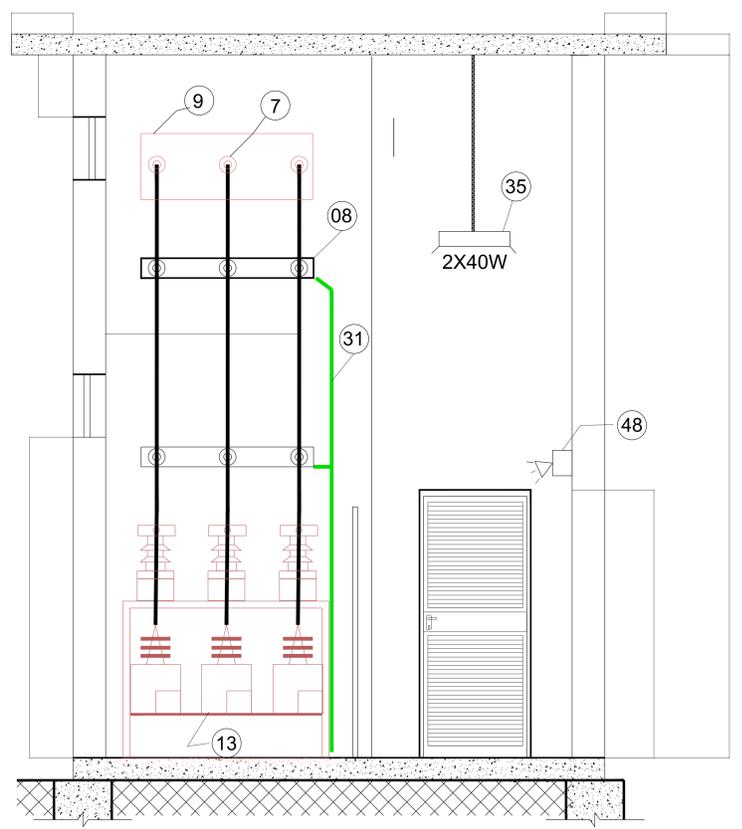
DETALHES GERAIS

2

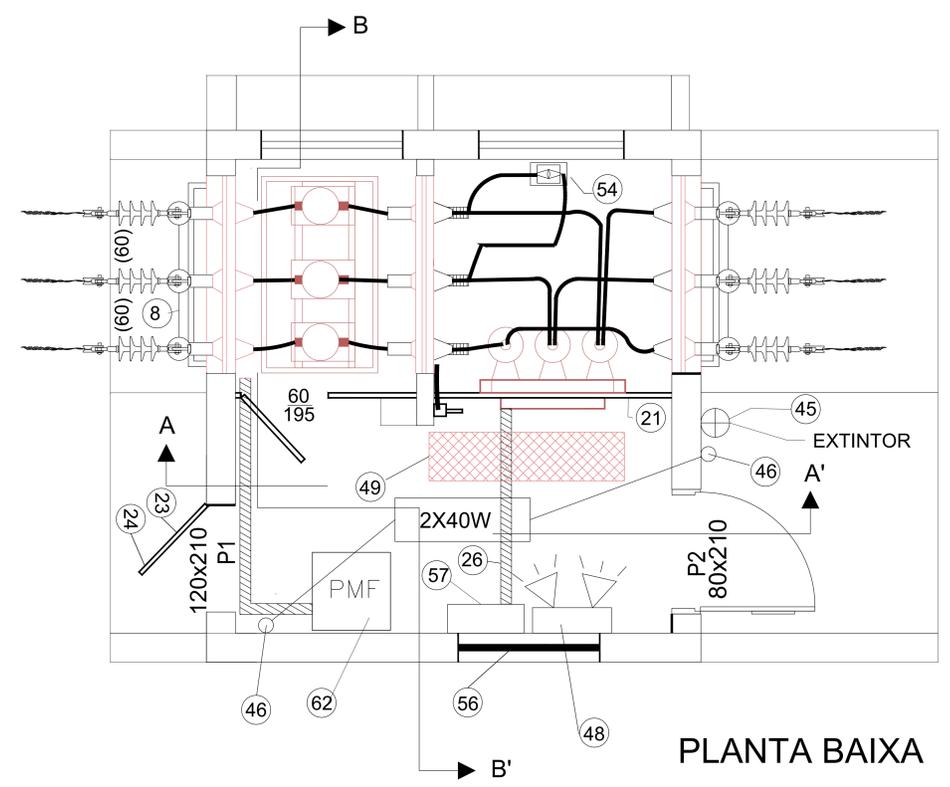
COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA



CORTE A-A'



CORTE B-B'



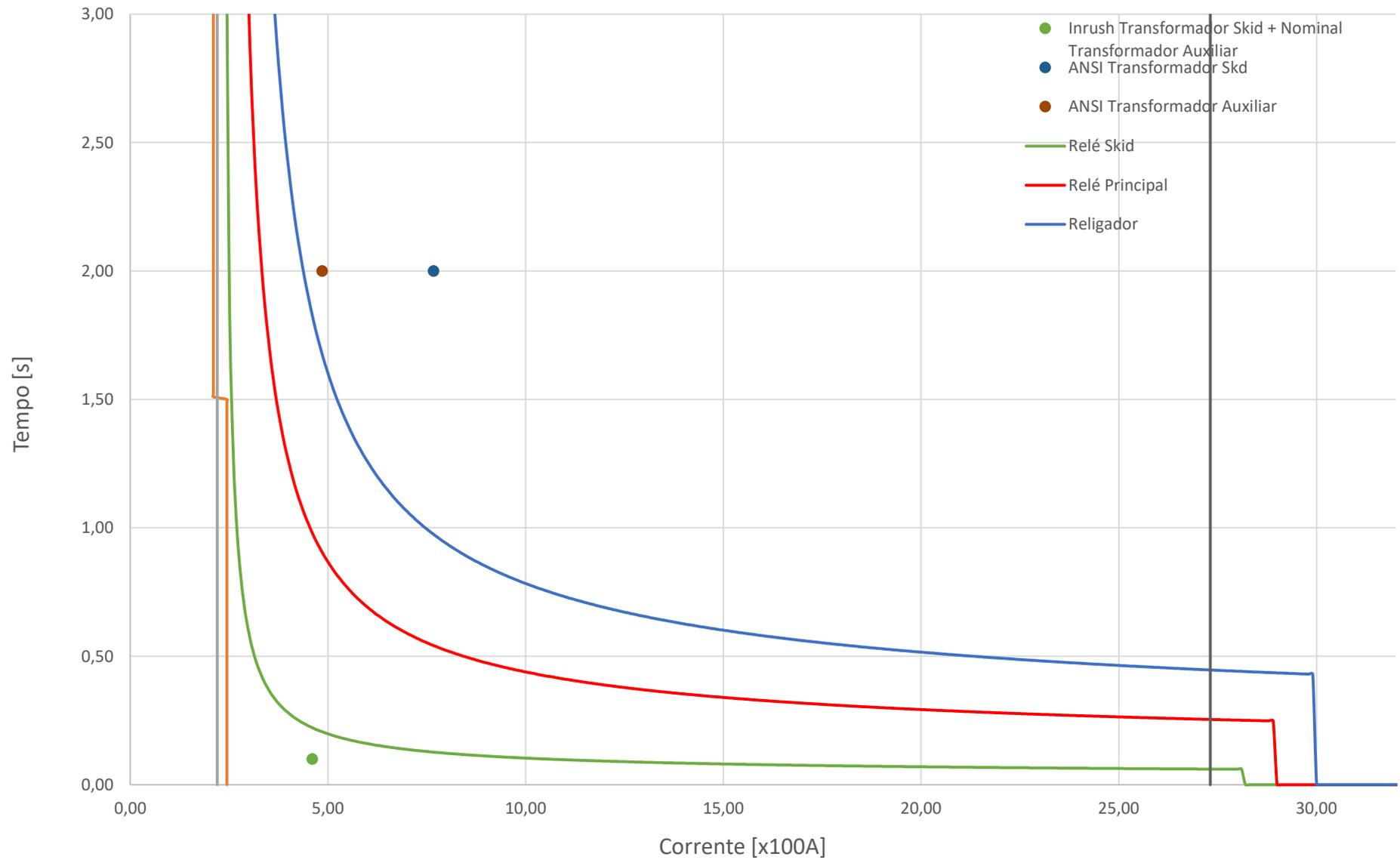
PLANTA BAIXA

NOTAS:

- 1 - O CUBÍCULO DE MEDIÇÃO DEVERÁ SER FECHADO ATÉ O TETO COM DIVISÓRIA DE ALVENARIA E QUADRO DE TELA LACRÁVEL
- 2 - PODERÁ SER INSTALADO TP AUXILIAR PARA ILUMINAÇÃO
- NÃO EXISTIR CIRCUITO DE BT PARA ESTA FINALIDADE INTERNA DA SUBESTAÇÃO E TOMADAS, QUANDO
- 3 - O NEUTRO DO TRANSFORMADOR DEVE SER ATERRADO DIRETAMENTE NO BEP.
- 4 - PORTA P1 DEVERÁ ABRIR PARA A VIA PÚBLICA
- 5 - PMF = PAINEL DE MEDIÇÃO PARA FATURAMENTO (CONSUMIDOR LIVRE/ESPECIAL)

PROJETO ELETROMECÂNICO	REV 2
SUBESTAÇÃO DE MEDIÇÃO E PROTEÇÃO	
COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA	

Coordenogramas dos Relés



Coordenogramas dos Relés 50N/51N

