

DESCRIÇÃO TÉCNICA DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA LOCALIZADA EM ROSEIRA – SP

TECHNICAL DESCRIPTION OF A MINI-GENERATION PHOTOVOLTAIC SOLAR POWER PLANT

Matheus Martins Melo de Almeida¹

Bruno Martins Mariano De Andrade Santos²

Victor Hugo Dias Pedrozo Jacinto³

Renan Gutierrez Barbosa⁴

Lucas Peixoto Berloff⁵

Vinicius Epifanio De Mello⁶

Resumo: Uma usina solar fotovoltaica é um avançado sistema de geração de energia que aproveita a luz do sol para converter diretamente em eletricidade por meio de células fotovoltaicas. Essas instalações, cada vez mais comuns em todo o mundo, representam uma solução sustentável e ambientalmente amigável para a produção de eletricidade. Neste contexto, a descrição técnica de uma usina solar fotovoltaica abrange todos os aspectos relacionados à sua estrutura, componentes, operação e desempenho, que se destinam a transformar a energia solar em eletricidade limpa e renovável. Esta descrição técnica engloba desde a seleção e posicionamento estratégico dos painéis solares até a integração com sistemas de monitoramento e conversão de energia, oferecendo uma visão abrangente de como essas usinas funcionam e contribuem para o fornecimento de energia sustentável.

-
- 1 Graduandos de Engenharia Elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes - UMC
 - 2 Graduandos de Engenharia Elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes - UMC
 - 3 Graduandos de Engenharia Elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes - UMC
 - 4 Graduandos de Engenharia Elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes - UMC
 - 5 Graduandos de Engenharia Elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes - UMC
 - 6 Graduandos de Engenharia Elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes - UMC



Palavras-chave: usina solar fotovoltaica, geração de energia, energia renovável, energia limpa.

Abstract: A photovoltaic solar plant is an advanced energy generation system that harnesses sunlight to convert it directly into electricity through photovoltaic cells. These facilities, increasingly common worldwide, represent a sustainable and environmentally friendly solution for electricity production. In this context, the technical description of a photovoltaic solar plant encompasses all aspects related to its structure, components, operation, and performance, aimed at transforming solar energy into clean and renewable electricity. This technical description ranges from the selection and strategic placement of solar panels to integration with energy monitoring and conversion systems, providing a comprehensive view of how these plants operate and contribute to sustainable energy supply.

Keywords: photovoltaic solar plant, energy generation, renewable energy, clean energy.

Introdução

A evolução da tecnologia fotovoltaica e a redução de custos tornaram as usinas solares fotovoltaicas (UFV) elementos estratégicos na transição para uma matriz energética limpa e sustentável. A eficiência de geração dessas centrais depende diretamente do potencial de irradiação solar da região, da qualidade dos módulos e inversores, e da disposição espacial do arranjo gerador. O emprego dessa fonte viabiliza maior segurança energética, redução de impactos ambientais e fomento ao desenvolvimento econômico em áreas com alta incidência solar.

Delimitação do estudo

O estudo restringe-se à descrição técnica e ao dimensionamento de uma usina solar fotovoltaica em regime de minigeração distribuída conectada à rede de distribuição.

Justificativa

A implantação de uma UFV demanda a superação de barreiras como o custo de investimento inicial, a ocupação de área territorial e, fundamentalmente, a conformidade normativa e eletromecânica com o sistema da concessionária local para garantir a injeção segura da energia gerada.

Objetivos do estudo

Objetivos Gerais

Analisar os princípios técnicos e o marco regulatório da geração fotovoltaica, avaliando os recursos solares disponíveis e detalhando a viabilidade técnica e o dimensionamento completo da usina.

Objetivos Específicos

Definir e caracterizar a área de instalação da UFV;

Realizar a análise técnica e o dimensionamento eletromecânico dos componentes do sistema;

Avaliar os requisitos de proteção e integração com a rede da distribuidora de energia.

Fundamentação teórica

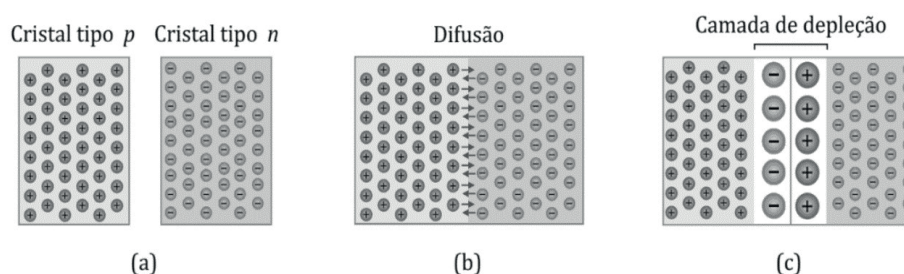
Energia solar fotovoltaica

A geração fotovoltaica baseia-se na conversão direta da radiação solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico em materiais semicondutores, fenômeno observado pioneiramente por Edmond Becquerel em 1839 (PINHO; GALDINO, 2014; MARIANO; JUNIOR, 2022). Em razão de sua abundância e viabilidade econômica, o silício compõe aproximadamente 95% das células solares



produzidas globalmente (VILLALVA, 2015). O dispositivo opera a partir de uma junção pn, unindo uma camada semicondutora do tipo N (excesso de elétrons) a uma do tipo P (deficiência de elétrons/lacunas). A difusão inicial de portadores estabelece um campo elétrico na região de depleção (barreira de potencial). Ao incidir na estrutura, a energia dos fótons excita os elétrons, originando a diferença de potencial responsável pelo fluxo de corrente elétrica contínua (VILLALVA, 2015; COELHO; SCHMITZ; MARTINS, 2022).

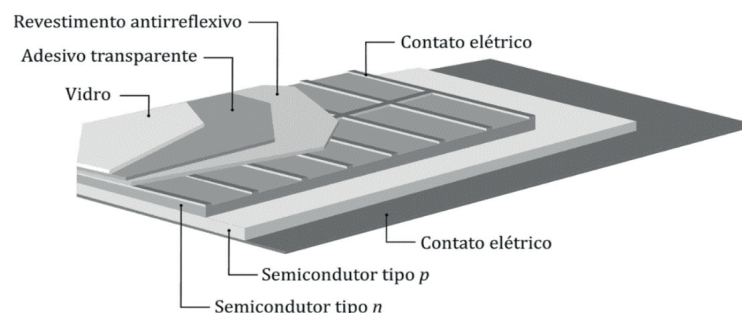
Figura 1 - Processo de criação da junção pn



Célula, módulo e arranjo fotovoltaico

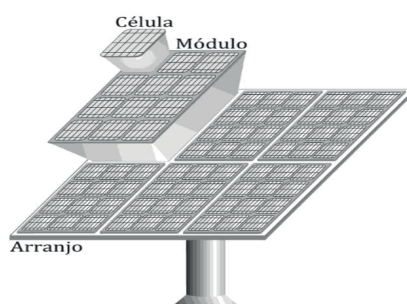
A célula fotovoltaica é a unidade elementar de conversão da radiação solar em energia elétrica, fornecendo tipicamente uma tensão em torno de 0,6 V e correntes proporcionais à sua área ativa iluminada (COELHO; SCHMITZ; MARTINS, 2022). Sua estrutura é composta pela junção semicondutora pn, camadas antirreflexo e de proteção mecânica, além de contatos metálicos frontais e posteriores projetados para maximizar a captação de luz e a condução da corrente (COELHO; SCHMITZ; MARTINS, 2022).

Figura 2 - Estrutura de uma célula fotovoltaica



Para viabilizar potências comerciais, as células são conectadas em série e integradas em estruturas físicas rígidas, formando os módulos fotovoltaicos. Quando há demanda por potências e tensões superiores, múltiplos módulos são associados entre si em configurações em série, paralelo ou mistas, constituindo os chamados arranjos fotovoltaicos (arrays) (COELHO; SCHMITZ; MARTINS, 2022).

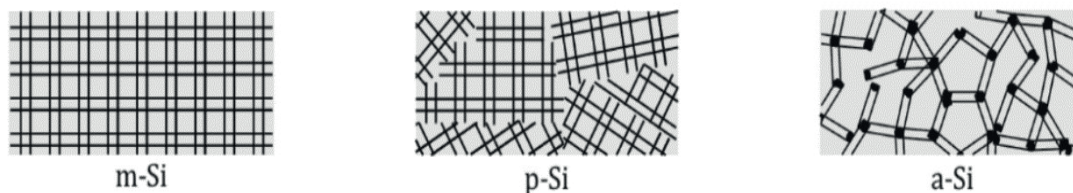
Figura 3 - Célula, módulo e arranjo fotovoltaico



Tipos de células fotovoltaicas

As células solares comerciais baseiam-se majoritariamente no silício (Si), classificando-se conforme o arranjo atômico de sua estrutura:

Figura 4 - Tipos de células fotovoltaicas



Célula de Silício Monocristalino (m-Si)

Produzida pelo método de Czochralski a partir de um cristal semente imerso em silício fundido dopado com boro (tipo P). O lingote cilíndrico homogêneo resultante é fatiado em lâminas (wafers) e submetido à difusão térmica de fósforo para consolidar a junção pn (MACHADO; MIRANDA, 2015; MARIANO; JUNIOR, 2022). Apresenta tonalidade uniforme e a mais alta eficiência entre as tecnologias de silício.

Célula de Silício Policristalino (p-Si)

Fabricada pela fusão e solidificação direta do silício do tipo P em blocos multifacetados, sem a utilização do método Czochralski, seguida por laminação e dopagem com fósforo (MACHADO; MIRANDA, 2015). Caracteriza-se pela coloração azul-clara e pela textura visual heterogênea provocada pela multiplicidade de grãos cristalinos desalinhados (MARIANO; JUNIOR, 2022).

Célula de Silício Amorfo (a-Si)

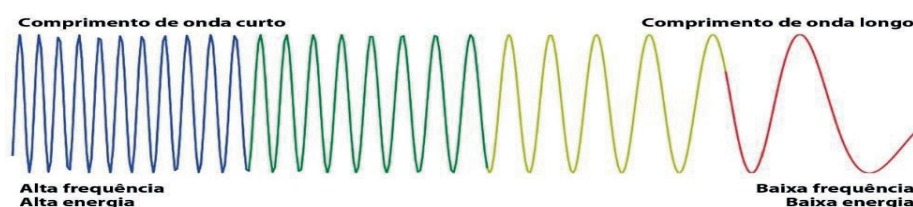
Tecnologia de filme fino composta por silício em estado desordenado e não cristalino (MACHADO; MIRANDA, 2015; COELHO; SCHMITZ; MARTINS, 2022). As imperfeições de rede geram ligações atômicas pendentes (dangling bonds) que aprisionam os elétrons livres. Esse efeito é neutralizado pelo processo de hidrogenação (a-Si:H), no qual átomos de hidrogênio passivam os

vazios estruturais, viabilizando o fluxo contínuo de portadores de carga (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Radiação solar

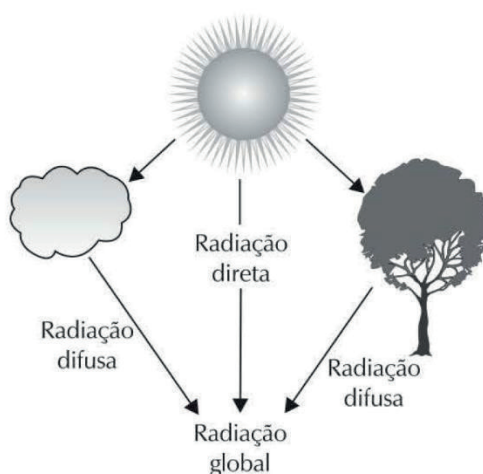
A energia solar propaga-se através do espaço na forma de radiação eletromagnética, cujo potencial energético é diretamente proporcional à frequência da onda e inversamente proporcional ao seu comprimento (VILLALVA, 2015).

Figura 5 - Representação de uma onda eletromagnética



A radiação solar global incidente sobre a superfície divide-se em duas componentes principais (MARIANO; JUNIOR, 2022; VILLALVA, 2015):

Figura 6 - Radiação solar e suas componentes



Radiação Direta: Constituída pelos raios solares que atingem o plano terrestre em trajetória

retilínea, diretamente do Sol;

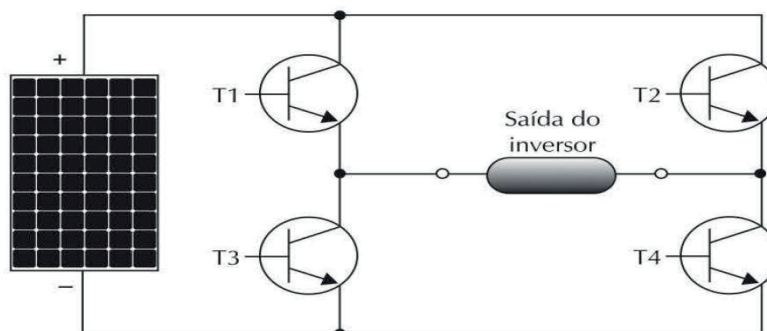
Radiação Difusa: Formada pela fração de raios que atinge a superfície de forma indireta, resultante de reflexões e do espalhamento atmosférico em nuvens, gases e partículas em suspensão.

COMPONENTES DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

Inversor

O inversor é o equipamento eletroeletrônico encarregado de converter a energia gerada em corrente contínua (CC) pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), viabilizando o autoconsumo e a injeção sincronizada na rede de distribuição (PINHO; GALDINO, 2014; VILLALVA, 2015).

Figura 7 - Circuito eletrônico básico de um inversor C.C – C.A



Princípio de funcionamento

A conversão básica fundamenta-se no chaveamento alternado de pares de transistores dispostos em ponte H (T1 a T4) a uma frequência fixa, gerando uma onda alternada retangular a partir da fonte contínua (VILLALVA, 2015). Os inversores comerciais incorporam indutores, capacitores de filtragem e controle microprocessado para sintetizar formas de onda senoidais puras com mínima

distorção harmônica (VILLALVA, 2015).

Figura 8 - Princípio básico de funcionamento do inversor

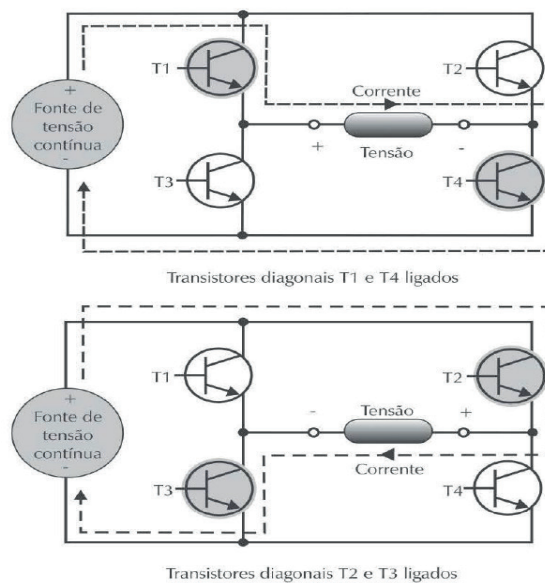
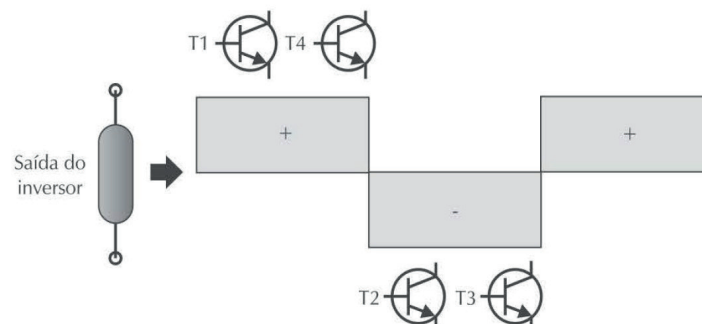


Figura 9 - Tensão alternada gerada pelo inversor de onda quadrada



Módulo fotovoltaico

Consiste no encapsulamento e na associação elétrica de células fotovoltaicas para fornecer patamares adequados de tensão e corrente sob proteção mecânica contra intempéries (PINHO; GALDINO, 2014).

Curvas características de um módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico atua como uma fonte não linear, cuja tensão de saída varia inversamente com a corrente demandada (VILLALVA, 2015). As curvas $I-V$ e $P-V$ delimitam seus parâmetros nominais: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e o ponto de máxima potência (VILLALVA, 2015).

Figura 10 - Curva característica $I-V$ de um módulo fotovoltaico

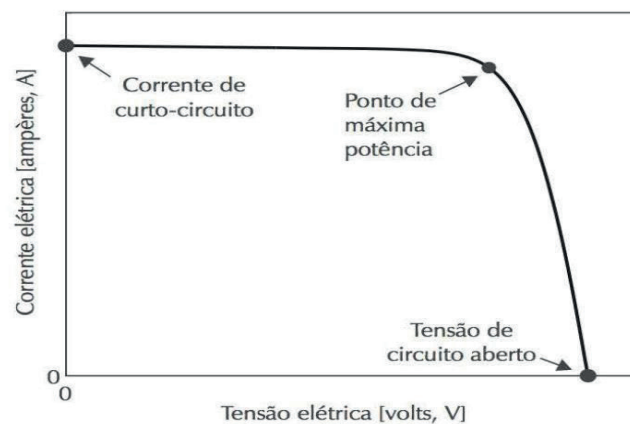
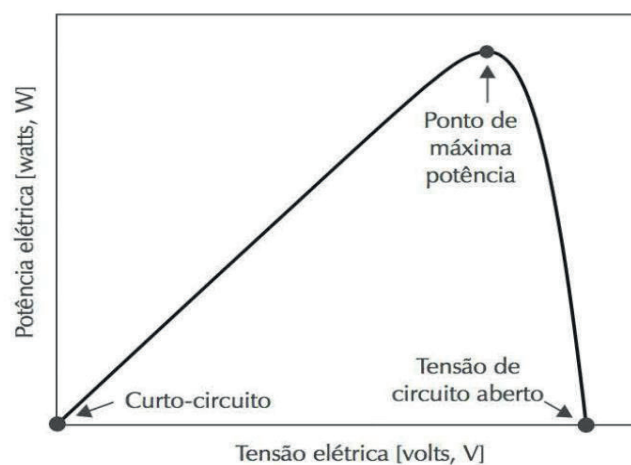


Figura 11 - Curva característica $P-V$ de um módulo fotovoltaico



Conexão de módulos em série

Na ligação em série (string), as tensões individuais somam-se () e a corrente permanece constante em todo o ramo (), permitindo elevar a tensão de operação e mitigar as perdas por efeito Joule nos condutores (PINHO; GALDINO, 2014; VILLALVA, 2015).

Figura 12 - Associação de módulos fotovoltaicos em série

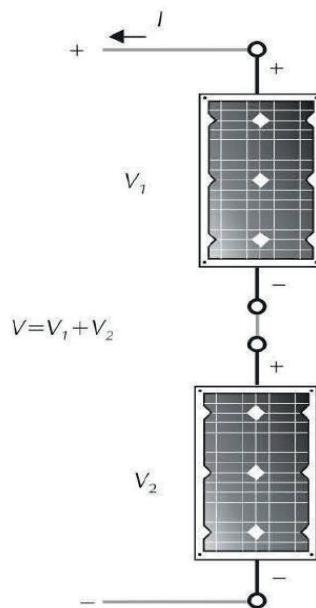
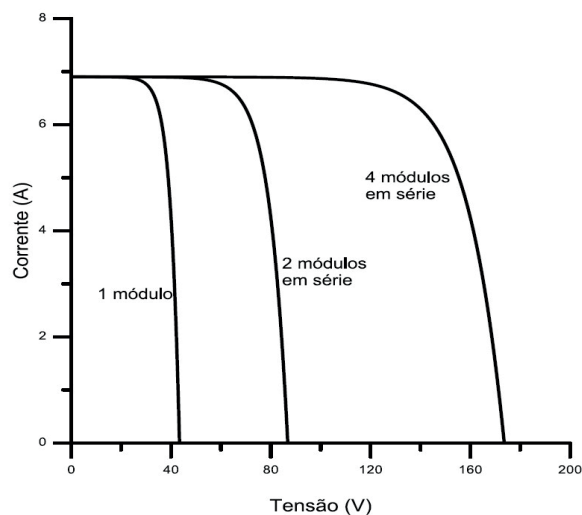


Figura 13 - Curva característica I – V da associação de módulos em série



Conexão de módulos em paralelo

Na ligação em paralelo, a tensão total equivale à de um único módulo (V), enquanto a corrente fornecida pelo conjunto resulta da soma das correntes de cada ramo ($I = I_1 + I_2$) (PINHO; GALDINO, 2014; VILLALVA, 2015).

Figura 14 - Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo

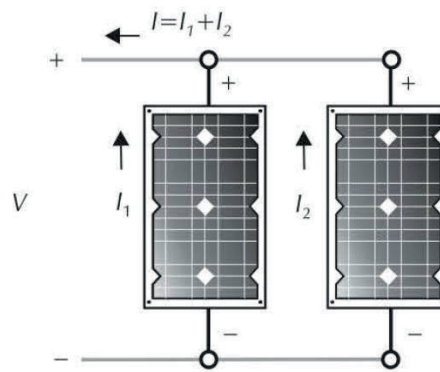
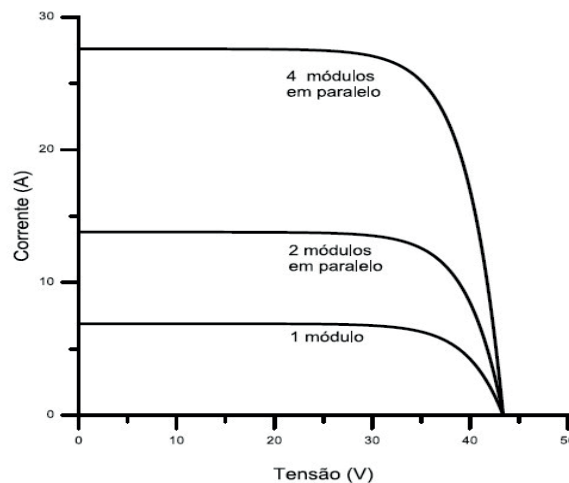


Figura 15 - Curva característica I – V da associação de módulos em paralelo



Cabine primária

A cabine primária estabelece a interface de média tensão (MT) entre a usina e a rede da

concessionária, sendo dimensionada conforme a potência instalada e estruturada em setores de transformação, proteção e medição.

Componentes de uma cabine primária

Bucha e isolador

Fabricados em porcelana ou vidro, fornecem sustentação mecânica e isolamento dielétrico entre os condutores energizados e a estrutura metálica aterrada (BARROS; GEDRA, 2018).

Figura 16 - bucha e isolador



Chave seccionadora

Dispositivo tripolar destinado a manobras de abertura e fechamento visível de circuitos sem carga, apto a suportar correntes nominais e de curto-circuito (BARROS; GEDRA, 2018). Modelos para manobra sob carga incorporam contatos auxiliares com molas de ação rápida e câmaras de extinção de arco (BARROS; GEDRA, 2018).

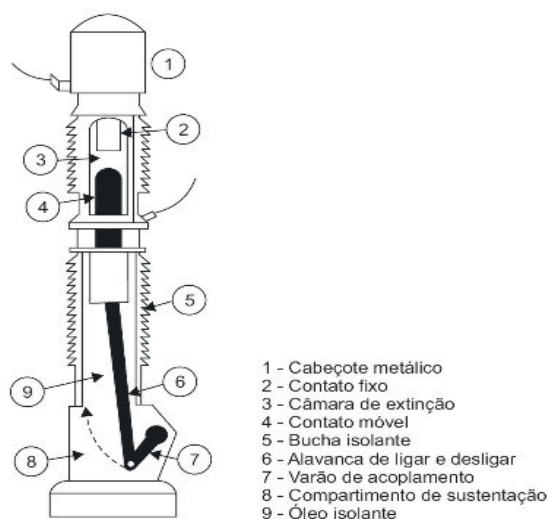
Figura 17 - chave seccionadora



Disjuntor de média tensão

Equipamento eletromecânico motorizado projetado para extinguir o arco elétrico e interromper correntes nominais e sobrecorrentes de curto-circuito, utilizando meios de extinção como óleo, vácuo ou gás (BARROS; GEDRA, 2018).

Figura 18 - disjuntor de média tensão



Fusível

Os fusíveis tipo HH atuam na proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos em transformadores e TPs, operando pela fusão térmica do elo imerso em areia de sílica sob efeito Joule (BARROS; GEDRA, 2018).

Figura 19 - fusível



Para-raios

Dispositivos tipo válvula (varistores de óxido de zinco) instalados para escoar surtos transitórios de sobretensão causados por descargas atmosféricas ou chaveamentos da rede elétrica (BARROS; GEDRA, 2018).

Figura 20 - para-raios



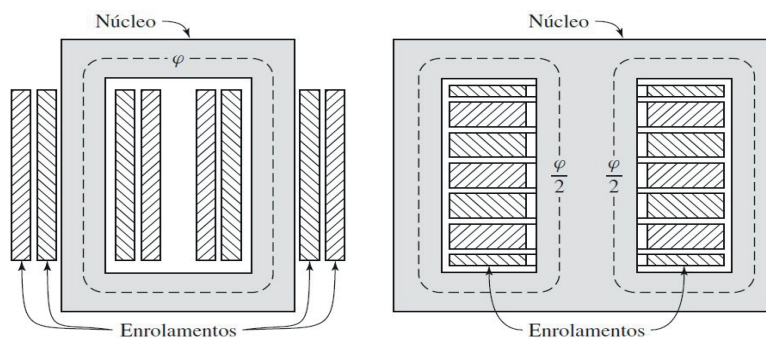
Relé de proteção

Dispositivo eletrônico microprocessado dotado de elementos sensores, comparadores e atuadores, configurado para supervisionar parâmetros da rede e emitir sinais de disparo para a abertura do disjuntor geral sob condições anômalas (BARROS; GEDRA, 2018).

Transformador de Potencial (TP)

Equipamento magnético que reduz a média tensão primária da linha para níveis normalizados e seguros no secundário (ex.: 115 V), garantindo isolamento galvânico aos circuitos de proteção e medição de faturamento (CHAPMAN, 2013; UMANS, 2014).

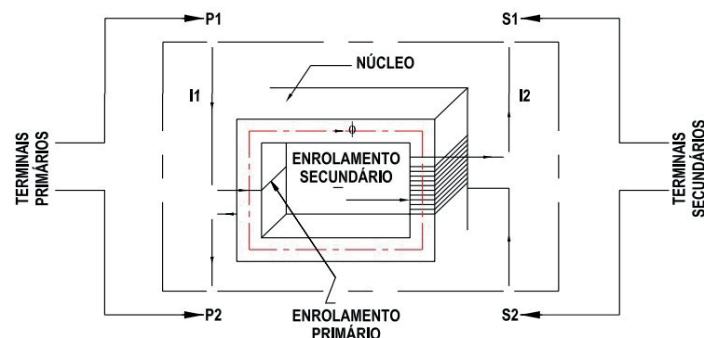
Figura 21 - transformador de potencial



Transformador de Corrente (TC)

Ligado em série com o circuito principal, reduz as correntes primárias para patamares de 1 A ou 5 A com mínima queda de tensão, permitindo a leitura e a atuação de relés e instrumentos (MARDEGAN, 2010).

Figura 22 - Transformador de corrente



Geração distribuída

A geração distribuída viabiliza a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis junto ou próximo às unidades consumidoras, abatendo a energia gerada da fatura mensal por meio do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (EDP S.A., 2021).

Classifica-se normativamente em duas categorias principais (ANEEL, 2022):

- Microgeração Distribuída: Central geradora com potência instalada menor ou igual a 75 kW;
- Minigeração Distribuída (MMGD): Central geradora com potência superior a 75 kW, limitada a 5 MW para fontes despacháveis e a 3 MW para fontes não despacháveis (como a solar fotovoltaica).

O marco regulatório estabelece diferentes modalidades de compensação (ANEEL, 2022):

- Autoconsumo Local: Geração e consumo no mesmo local da central geradora;
- Autoconsumo Remoto: Geração em um local e compensação em outras unidades consumidoras de mesma titularidade;
- Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras: Rateio de energia gerada em condomínios e frações ideais;
- Geração Compartilhada: União de consumidores via consórcio, cooperativa ou associação civil para usufruir dos créditos de uma mesma central de MMGD dentro da área de concessão.

Desenvolvimento do projeto

Esta UFV foi projetada com a finalidade de se adequar às regulamentações de MMDG, adotando ao sistema de compensação de energia elétrica (SCEE) e seguindo o modelo de geração compartilhada de consumidores. Através de um consórcio, o percentual da energia gerada pela usina é distribuído entre os vários clientes que compartilham a mesma área de concessão.

Análise do local de instalação

A UFV será implantada no município de Roseira – SP, em um terreno de 27.264 m² (2,73 hectares). A conexão ao Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) da concessionária EDP SP ocorrerá nas coordenadas geográficas -22,860359° e -45,296468°, integrando-se ao alimentador APA 1302 em 13,8 kV, suprido pela Estação Transformadora de Distribuição (ETD) Aparecida.

Figura 23 - area de instalação



Características do Local de Instalação	
UF	São Paulo
Município	Roseira
Concessionária	EDP SP
Área do Terreno (Google Earth)	27.264 m ² ou 2,73 Hectares

Abaixo, as informações sobre a irradiação no município de Roseira:

Características de Irradiação (Atlas Solar Global)	
Coordenadas Geográficas do Ponto de Conexão	-22.860359°, -45.296468°
Irradiação normal direta	4.302 kWh/m ² .dia
Irradiação horizontal global	4.919 kWh/m ² .dia
Irradiação horizontal difusa	1.995 kWh/m ² .dia
Irradiação global inclinada em ângulo ideal	5.290 kWh/m ² .dia

Através da área escolhida, decidiu-se que será construída uma UFV com capacidade de 1 MWp. Com o objetivo de maximizar a geração de energia elétrica, serão empregados módulos bifaciais e uma estrutura com rastreamento do ângulo de elevação solar (tracker), os quais, em conjunto, resultarão em um considerável aumento na produção média mensal de energia.

Dimensionamento do sistema fotovoltaico

A seleção dos módulos baseou-se nos critérios de classificação TIER 1 do fabricante, tecnologia bifacial e compatibilidade com os seguidores solares (trackers). Adotou-se o modelo Canadian Solar CS7N-670TB-AG de 670 Wp, totalizando 1.512 módulos e uma potência de pico instalada de 1.013,04 kWp.

O arranjo elétrico é subdividido em 14 strings por inversor, com 27 módulos associados em série por fileira. Os módulos possuem molduras de alumínio de alta resistência mecânica contra ventos e granizo, além de certificação INMETRO Classe “A” (Relatório nº 012077/2022) (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).



Características Técnicas do Módulo Fotovoltaico		
Parâmetros	Símbolo	Valor
Fabricante	-	Canadian Solar
Modelo	-	CS7N-670TB-AG
Tecnologia das células	-	Silício Monocristalino Bifacial
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS		
Potência máxima	P_{max}	670 W
Rendimento	η_{fv}	21,60%
Tensão nominal	V_{mp}	38,80 V
Tensão em aberto	V_{oc}	46,70 V
Corrente nominal	I_{mp}	17,27 A
Corr. de curto-circuito	I_{sc}	18,19 A
Dimensões		
Dimensões	-	2384 mm x 1303 mm x 33 mm
Peso	-	37,8 kg

Os valores de tensão, corrente e potência listados na Tabela 1 são aplicáveis nas condições de teste padrão, Standard Test Conditions (STC), que correspondem a uma temperatura de 25 °C e 1000 W/m².

Dimensionamento dos inversores

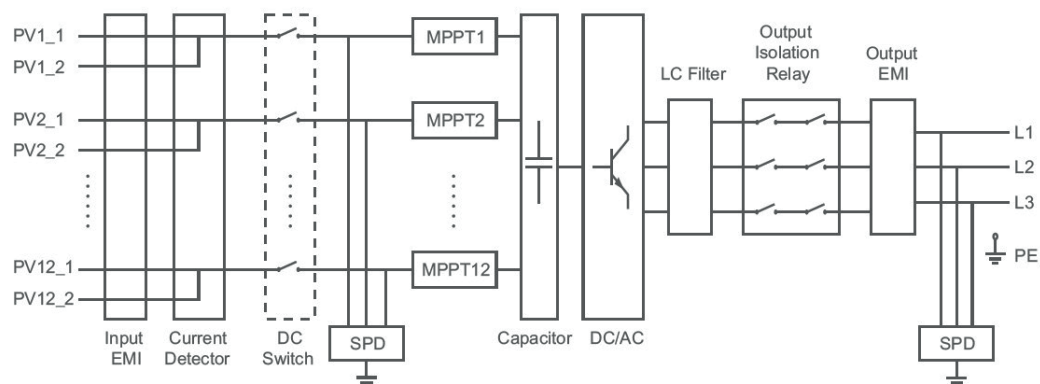
Adotou-se o inversor string trifásico modelo TS228KTL-HV do fabricante TBEA, com potência nominal de saída de 250 kW e tensão máxima de operação de 1.500 Vcc.

O equipamento opera com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) e controle microprocessado, garantindo alta qualidade de injeção na rede com distorção harmônica total inferior a 3% () (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022). O inversor atua como fonte de corrente sincronizada à rede por bandas de histerese e incorpora proteção anti-ilhamento ativa através da medição contínua da impedância do sistema elétrico (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Dados Técnicos do Inversor	
Fabricante	TBEA
Modelo	TS228KTL-HV
Características Elétricas	
Potência nominal	250 kVA
Potência máxima	250 kVA a 30 °C / 228 kVA a 40 °C / 208 kVA a 50°C
Rendimento europeu	98,70%
Características Elétricas da Entrada	
Número de entradas MPPT	12
Entradas por MPPT	3
Tensão nominal de entrada (CC)	1.160 V
Tensão máxima de entrada (CC)	1.500 V
Tensão mínima por MPPT (CC)	500 V
Tensão máxima por MPPT (CC)	1.500 V
Corrente máxima de entrada (CC)	40 A * 12
Corrente máxima de curto-circuito (CC)	50 A * 12
Características Elétricas da Saída	
<i>Tensão nominal de saída (CA)</i>	<i>800 V</i>
<i>Faixa de tensão de saída (CA)</i>	<i>680-920 V</i>
<i>Corrente máxima de saída (CA)</i>	<i>180 A</i>
Características Mecânicas	
Dimensões	1100 mm x 700 mm x 360 mm
Peso	110kg
Conector (CC)	Amphenol UTX / Staubli MC4 EVO2
Conector (CA)	Waterproof Connector + DT Terminal

O inversor opera em estágio único de conversão, gerando uma tensão de saída com perfil senoidal otimizado, o que reduz as correntes harmônicas, diminui o dimensionamento do filtro CA e amplia a eficiência global do sistema (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022). A montagem atende integralmente às exigências do fabricante e aos padrões da concessionária local, garantindo acesso facilitado para operação e manutenção.

Figura 24 - Esquema de Ligação do Inversor



Estrutura de fixação

A sustentação dos módulos é realizada por seguidores solares (trackers) de eixo único em configuração bifila, com quatro mesas acionadas por um motor central. Cada mesa comporta 27 módulos em orientação retrato (equivalente a uma string), apresentando amplitude de rotação de controlada por algoritmo astronômico integrado ao sistema SCADA e capacidade de absorver declives de até no sentido Norte-Sul.

Características de proteção

Os inversores atendem aos requisitos do Módulo 3 do PRODIST e às normas ABNT NBR 16149:2013, NBR 16150:2013 e NBR IEC 62116:2012 (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022). O controle microprocessado monitora continuamente a tensão e a frequência da rede, bloqueando a injeção sob anomalias (função anti-ilhamento) e restabelecendo a operação de forma automática após a normalização dos parâmetros, além de garantir limites estritos para injeção CC, distorção harmônica e fator de potência (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Quadro geral de baixa tensão (qgbt)

A proteção geral do barramento de baixa tensão (800 V) é provida por um disjuntor termomagnético de 1.000 A. Os circuitos individuais dos inversores dispõem de chaves seccionadoras sob carga com fusíveis NH gG de 250 A e capacidade de interrupção de 50 kA a 800 V, garantindo proteção contra sobrecorrentes e seccionamento mecânico seguro em conformidade com as seções 5.3 e 6.3 da ABNT NBR 5410:2004 (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Condutores

Cabos Solares (Circuito CC)

Os circuitos de corrente contínua entre as séries fotovoltaicas e os inversores utilizam cabos unipolares flexíveis de cobre estanhado (Classe 5) com seção de 6 mm². Possuem isolamento em HEPR para operação contínua a até 90 °C, cobertura em PVC ST2 antichama, isenta de chumbo e resistente a intempéries e raios UV, suportando tensões de até 1.800 Vcc (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022). Os condutores atendem às normas ABNT NBR 16612, NBR 5410:2004, IEC 60332-1-2 e certificações TÜV (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Cabos do Circuito CA

A interligação entre os inversores e os quadros de baixa tensão é constituída por cabos unipolares flexíveis de alumínio de têmpera mole (Classe 5), com isolamento em HEPR (90 °C) e cobertura em PVC ST2 antichama (BWF-B) (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022). O dimensionamento das seções nominais garante uma queda de tensão inferior a 1,5% para mitigar as perdas elétricas, em conformidade com as diretrizes das normas NBR NM-IEC 60332-1 e NBR 5410:2004 (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Dispositivos de proteção

Com o propósito de garantir a segurança dos equipamentos, das instalações e das pessoas envolvidas no sistema, serão integrados dispositivos de proteção tanto para os circuitos CC quanto para os CA.

Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS CC)

O DPS CC tem o objetivo de assegurar a integridade da interface de corrente contínua contra sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas diretas e/ou indiretas. O DPS deve estar equipado com um indicador de vida útil, que possibilita a verificação do estado do protetor de surto por meio de um medidor mecânico situado na parte frontal do dispositivo, o qual muda para a cor vermelha à medida que o protetor se aproxima do fim de sua vida útil (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS CA)

O DPS CA é incorporado no circuito CA da instalação, sendo colocado internamente ao inversor solar. Sua finalidade é restringir as sobretensões transitórias provenientes de descargas atmosféricas diretas e/ou indiretas que podem ocorrer tanto nas instalações do sistema fotovoltaico quanto na rede elétrica de distribuição de energia local. A seleção e a instalação desses dispositivos obedecerão aos critérios estabelecidos na seção 6.3 “Dispositivos de proteção, seccionamento e comando” da norma técnica ABNT NBR 5410:2004. O esquema de conexão dos Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) é determinado de acordo com as diretrizes da norma técnica ABNT NBR 5410, Parágrafo 6.3.5.2.2 (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Aterramento e equipotencialização

Os elementos da instalação fotovoltaica estão em conformidade com as normas ABNT NBR 5419:2015 e CLC/TS 50539-12/2013, no que diz respeito à proteção contra descargas atmosféricas, equipotencialização e aterramento de todos os componentes condutores da instalação elétrica que não façam parte dos circuitos elétricos, mas que, eventualmente ou acidentalmente, possam estar sujeitos a tensão.

Serão implementadas malhas de aterramento ao redor da usina, do skid e da subestação de entrada de energia. Estas redes serão interligadas com o propósito de reduzir a resistência de aterramento e aprimorar as características de proteção.

Eletrodutos

Componente da infraestrutura elétrica designado para a proteção dos condutores, os critérios de seleção e instalação dos condutos elétricos seguirão as diretrizes estabelecidas na seção 6.2.11.1 “Eletrodutos” da norma ABNT NBR 5410:2004.

Caixas de concreto ou alvenaria, dotados de tampa, dispostos ao longo da infraestrutura subterrânea para acomodar condutores e equipamentos. No que se refere ao cálculo das medidas das caixas de passagem, suas dimensões serão determinadas conforme as diretrizes estabelecidas nas normas ABNT NBR 14039 e ABNT NBR 9511 (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Transformador de acoplamento

O transformador de acoplamento adotado será do tipo óleo mineral, projetado para operar em uma classe de tensão de 15 kV, sendo especialmente desenvolvido para sua aplicação em conversores de energia fotovoltaica. Ele é capaz de suportar cargas lineares, incluindo distorções harmônicas com um fator $k = 1$, e será instalado ao ar livre. Os enrolamentos de média tensão (MT) e baixa tensão

(BT) são feitos de alumínio, e o transformador foi testado de acordo com as normas ABNT NBR 10295 e 5356-11 (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Normas aplicáveis:

- NBR 5356 - Transformadores de potência - Partes 1, 2, 3 e 4.
- NBR 5440 - Transformadores para redes aéreas de distribuição - Padronização.

A seguir são apresentadas as características técnicas do componente a ser utilizado na instalação:

Informações Técnicas do Transformador de Acoplamento	
Potência Nominal	1.000 kVA
Tensão Nominal	13.800 V - 800 V
Taps primários	14.490/14.145/13.800/13.455/13.110 V
Tap selecionado	13.800 V
Fator K	1
Esquema de Ligação	Dyn1
Corrente de Magnetização Inicial*	10*In (1.000 kVA, 13,8 kV)
Classe de Material Isolante	A (105 °C)
Elevação de Temp. Média do Óleo	60/65 °C
Temperatura Ambiente Máxima	40 °C
Refrigeração	KNAN
Z%	5,5 % (1.000 kVA, 13,8 kV)

Funções de proteção do acessante

Funções de Proteção do Inversor

- Sistema de Verificação de Sincronismo (25);
- Função de Proteção de Sub e Sobretensão (27/59);
- Função de Proteção de Sobre e Subfrequência (81O/U);
- Função de Proteção Derivada de Frequência (81df/dt);



- Função de Proteção Salto de Vetor “Vector Jump” (78).

Funções de Proteção no Relé de Proteção

A proteção da UFV será implementada por meio do relé da fabricante Pextron, com o modelo URP6000. Nesse sentido, foi planejado empregar as seguintes funções de proteção:

- Função de Proteção de Sobrecorrente Instantâneo e Temporizado de Fase (50/51);
- Função de Proteção de Sobrecorrente Instantâneo e de Neutro Sensível (50N/51GS);
- Função de Proteção Direcional de Corrente (67);
- Relé de Sobrecorrente com Restrição de Tensão (51V);
- Função de Proteção direcional de Potência (32);
- Função de Proteção de Sub e Sobretensão (27/59);
- Função de Proteção de Sobretensão Residual (59N);
- Função de Proteção de Sobre e Subfrequência (81O/U);
- Função de Proteção de Inversão de Fase (46);
- Função de Proteção de Tensão de Sequência de Fase (47).

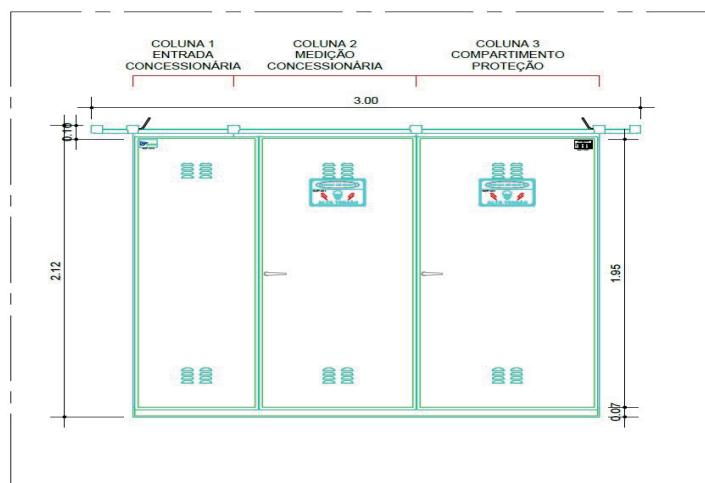
Subestação de entrada de energia

A subestação associada a esta unidade consumidora será formada por cubículos blindados que incluem as seções de entrada, medição e proteção da unidade consumidora.

A seção de entrada será equipada com para-raios de 12 kV de tensão nominal e capacidade de descarga de 10 kA. A seção de medição conterá a caixa de medição conforme as especificações descritas na PT.DT.PDN.03.14.017 da EDP SP, e os transformadores de corrente (TP) e de potencial (TC), bem como o medidor, serão fornecidos pela concessionária (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).



Figura 25 - Vista Frontal da Subestação de Entrada de Energia



Fonte: A&J Engenharia e Consultoria LTDA (2022)

Cubículo de Entrada

Nesse espaço, serão incluídos para-raios, muflas internas, isoladores e uma chave seccionadora.

Chave Seccionadora Primária

A chave seccionadora tripolar, projetada para uso interno, tem a responsabilidade de efetuar o corte completo da alimentação elétrica da unidade consumidora a ela conectada. Trata-se de uma chave tripolar, de uso interno, que opera de forma simultânea com um sistema de intertravamento elétrico conectado ao disjuntor de interligação de média tensão. A sua corrente nominal é de 400 A, com uma classe de tensão de 15 kV. A chave suporta uma corrente de curta duração de 16 kA (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Esta chave possui contato normalmente fechado e é projetada para operações com carga.

A abertura dos contatos é visível e é indicada por meio das marcações “Desligado” (O) e

“Ligado” (I), que representam as posições aberta e fechada, respectivamente (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Barramentos

O Barramento é de cobre eletrolítico retangular para tensão nominal de 15 kV. O barramento será contínuo e sem emendas, está previsto o uso de conectores apropriados nas derivações e ligações de aparelhos e equipamentos, com suas superfícies de contato estanhadas ou prateadas, não sendo permitido o uso de solda (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Cubículo de Medição

Neste espaço, será incluída uma caixa de medição homologada pela EDP SP, e o TP e TC, bem como o medidor, serão fornecidos pela concessionária.

Cubículo de Proteção

Este cubículo tem como objetivo oferecer as proteções essenciais na interconexão das instalações de propriedade do acessante ao SDMT da EDP.

Nobreak

O nobreak atua como um condicionador que regula a voltagem e a qualidade da energia elétrica que chega ao relé secundário. Além disso, desempenha a função de fornecer energia, por meio de baterias, por um período mínimo de 02 horas ao relé, no caso de uma interrupção no fornecimento elétrico da subestação. Isso permite que o relé continue a monitorar a condição da rede elétrica no

momento de seu restabelecimento (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Fonte Capacitiva

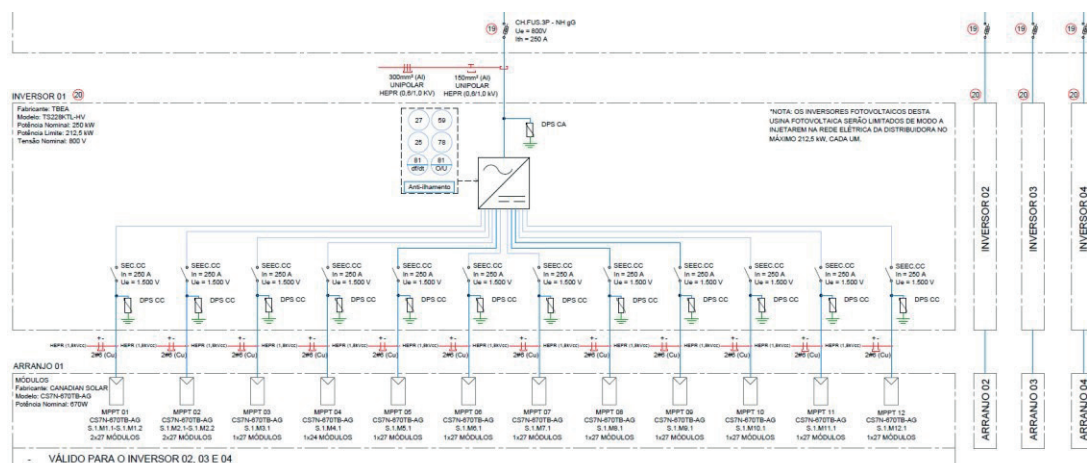
A Fonte Capacitiva ou Disparador Capacitivo é um componente auxiliar de proteção conectado em paralelo ao relé secundário. Sua finalidade é armazenar energia em capacitores o bastante para acionar a bobina de abertura do disjuntor, quando este não estiver dispoindo de uma fonte de energia auxiliar (A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022).

Relé de Proteção da Interligação

Como mencionado no tópico 3.13.2, o relé de proteção da interligação será o Pextron URP6000, ele receberá a parametrização adequada de acordo com o estudo de proteção realizado, para se adequar aos parâmetros da rede de distribuição.

Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico

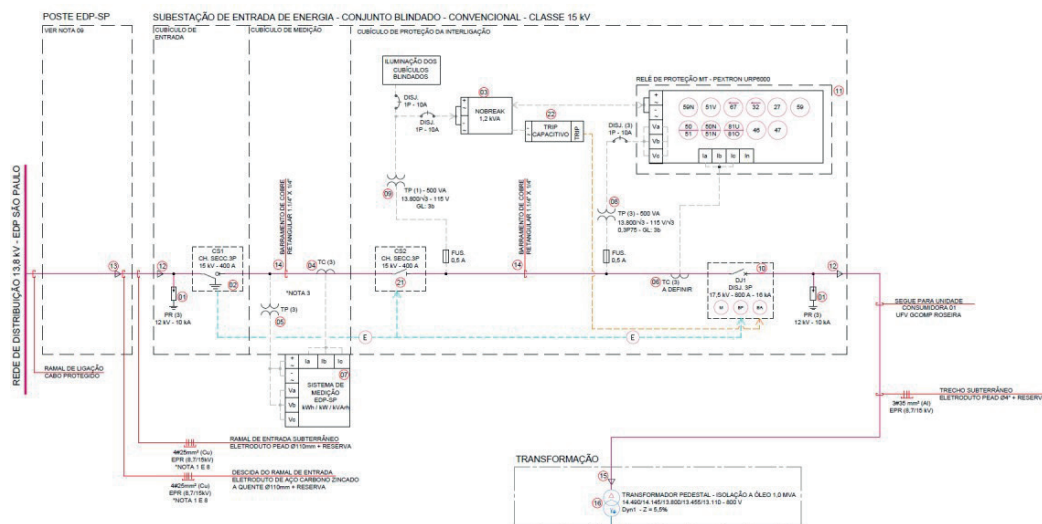
Figura 26 - Diagrama Unifilar do Sistema Fotovoltaico



Fonte: A&J Engenharia e Consultoria LTDA (2022)

Diagrama unifilar da entrada de energia

Figura 27 - Diagrama Unifilar da Entrada de Energia



Fonte: A&J Engenharia e Consultoria LTDA (2022)

Conclusão

Em resumo, a descrição técnica de uma usina solar fotovoltaica de minigeração distribuída localizada em Roseira, SP, oferece uma visão abrangente de uma avançada instalação de energia sustentável. Este sistema representa um exemplo notável de como a tecnologia fotovoltaica está sendo aplicada de forma eficaz para produzir eletricidade limpa e renovável. Além disso, essa descrição técnica ilustra como o aproveitamento da energia solar se tornou uma solução viável e economicamente atraente, contribuindo para a redução das emissões de carbono e a promoção da sustentabilidade na região de Roseira e além. A usina solar fotovoltaica de minigeração distribuída é um passo importante em direção a um futuro energético mais verde e responsável.

Referências bibliográficas

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Micro e Minigeração Distribuída. Brasília, DF: ANEEL, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/ptbr/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 15 set. 2023.

BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BARROS, B. F.; GEDRA, R. L. Cabine primária: Subestação de alta-tensão de consumidor. 4. ed. São Paulo: Érica, 2018.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>. Acesso em: 15 set. 2023.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

COELHO, R. F.; SCHMITZ, L.; MARTINS, D. C. Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Conversão e Aplicações. Florianópolis: Edição dos Autores, 2022.

EDP S.A. Cartilha de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD). São Paulo: EDP Brasil, 2021. Disponível em: https://www.edp.com.br/media/dlqdooql/cartilha_mmgd_final-02-08-21.pdf. Acesso em: 15 set. 2023.

EDP S.A. Micro e mini geração distribuída. Disponível em: <https://www.edp.com.br/micro-e-minigeracao/>. Acesso em: 15 set. 2023.

FADIGAS, E. A. F. A. Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica. São Paulo: GEPEA/EPUSP, 2023. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 02 set. 2023.

MACEDO, Ane. Memorial Descritivo: Projeto de Entrada de Energia de 850 kVA – UFV GCOMP Roseira. Mogi das Cruzes: A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022.



MACEDO, Ane. Memorial Descritivo: Projeto de Minigeração Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica. Mogi das Cruzes: A&J Engenharia e Consultoria LTDA, 2022.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma breve revisão. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015. Disponível em: <http://rvqsub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/664/508>.

MARDEGAN, C. Transformadores de corrente, potencial e bobinas de Rogowski para fins de proteção – Parte 1. O Setor Elétrico, ed. 48, 2010. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/04/Ed48_janeiro_protecao_seletividade_capI.pdf. Acesso em: 09 set. 2023.

MARIANO, J. D.; JUNIOR, J. U. Energia solar fotovoltaica: Princípios fundamentais. Ponta Grossa: Atena, 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 01 set. 2023.

SANTANA, E. S.; JUNIOR, I. J. S. Circuitos Elétricos e Eletrotécnica: Fundamentos e Aplicações. 2. ed. Eudemario Souza de Santana, 2021.

UMANS, S. D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.

VILLALVA, M. G. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

