



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LYANDRA ARAÚJO DA SILVA

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO, VIABILIDADE
TÉCNICA E FINANCEIRA PARA ATENDIMENTO DE PRÉDIO COMERCIAL EM
TUCURUÍ - PA**

TUCURUÍ – PA

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LYANDRA ARAÚJO DA SILVA

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO, VIABILIDADE
TÉCNICA E FINANCEIRA PARA ATENDIMENTO DE PRÉDIO COMERCIAL EM
TUCURUÍ - PA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado do
Colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica do
Campus Universitário de Tucuruí da Universidade
Federal do Pará como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Eng. Samuel Antonio Pereira Filho

Coorientador:

Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira

TUCURUÍ – PA

2023

LYANDRA ARAÚJO DA SILVA

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO, VIABILIDADE
TÉCNICA E FINANCEIRA PARA ATENDIMENTO DE PRÉDIO COMERCIAL EM
TUCURUÍ - PA**

DATA DE APROVAÇÃO: ___/___/___

CONCEITO:

Samuel Antonio Pereira Filho
Orientador: Vale S.A

Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira
Coorientador: UFPA - CAMTUC - FEE

Prof. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Membro: UFPA - CAMTUC - FEE

Prof. Dr. Washington César Braga de Sousa
Membro: UFPA - CAMTUC - FEE

TUCURUÍ – PA

2023

Sou muito grata ao Senhor, que em nenhum momento me deixou fraquejar ou desistir deste trabalho, até porque para Deus nada é impossível. (Lucas 1:37)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tanto me ajudou e me sustentou até aqui, ao Senhor seja dada toda Honra e toda Glória.

Meus sinceros agradecimentos a minha família, aos meus pais Maria Alice e Adolfo por sempre me apoiarem e investirem nos meus estudos, pelas noites em claro e pelas orações, amo muito vocês.

Aos meus irmãos, Liceni Araújo, Lenildo Araújo e Leticia Araújo, muito obrigada por todo suporte e incentivo durante toda essa caminhada.

Não poderia deixar de agradecer ao Alan Valente, amigo muito querido ao qual sou eternamente grata por toda ajuda neste trabalho. E meus agradecimentos à família Gransolar Engenharia e ao Fagner por me acolher e por toda ajuda.

As minhas amigas Joelia Cruz, Dariele Costa, Klarissa Carvalho, Ayla Liz, muito obrigada a todas pelo suporte, ajuda e conselhos, só vocês e Deus sabem o quanto foi difícil ter chegado até aqui, amo muito vocês.

E por fim, gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador Samuel Antonio Pereira Filho e ao meu coorientador Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira, por me acolherem, incentivar e acreditar no meu trabalho, serei eternamente grata a vocês.

RESUMO

À medida que a crise ambiental se intensifica e o consumo de energia elétrica aumenta, a busca pelo consumo sustentável de energia a partir de fontes renováveis vem crescendo. O consumo de eletricidade vem aumentando com crescimento econômico, novas tecnologias energéticas e a população brasileira em expansão. Diante dessa situação de crise, cada vez mais energia elétrica é necessária ao longo do ano para atender a demanda. Nesse sentido, a energia solar é uma excelente alternativa de energia limpa, silenciosa, quase livre de poluição, inesgotável, com variedade de materiais e adaptável a diferentes projetos. O trabalho aqui exposto, envolve o projeto e instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede para produção de energia elétrica em um estabelecimento comercial localizado no município de Tucuruí, no estado do Pará. No primeiro momento foram colhidos os dados do local de instalação, logo depois, foi analisada a área total de cobertura e o consumo da edificação pertinente para o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Desta forma, além de estimar a energia anual produzida pelo sistema, é possível dimensionar e especificar os módulos e inversores, sendo possível a instalação mais efetiva do projeto no local.

Palavras-chave: Energia solar, geração de energia, sistema fotovoltaico, energia elétrica.

ABSTRACT

As the environmental crisis intensifies and electricity consumption increases, the search for sustainable energy consumption from renewable sources is growing. Electricity consumption has been increasing with economic growth, new energy technologies and the expanding Brazilian population. Faced with this crisis situation, more and more electricity is needed throughout the year to meet demand. In this sense, solar energy is an excellent alternative for clean, silent, almost pollution-free, inexhaustible energy, with a variety of materials and adaptable to different projects. The work presented here involves the design and installation of a photovoltaic system connected to the grid for the production of electricity in a commercial establishment located in the municipality of Tucuruí, in the state of Pará. Where the installation site data were first collected. From there, the total coverage area and the consumption of the relevant building for the sizing of the photovoltaic system were analyzed. In this way, in addition to estimating the annual energy produced by the system, it is possible to size and specify the modules and inverters, making it possible to install the project more effectively on site.

Keywords: Solar energy, energy generation, photovoltaic system, electricity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Oferta Interna de Energia Elétrica 2020	21
Figura 2.2 - Repartição da Oferta Interna de Energia Elétrica (OIE) 2020.....	22
Figura 2.3 - Os principais marcos na história do desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica	24
Figura 2.4 - Esquema de funcionamento de um painel fotovoltaico.....	25
Figura 2.5 - Efeito fotovoltaico em uma célula solar	27
Figura 2.6 - Espectro eletromagnético da radiação solar	28
Figura 2.7 - Componentes da irradiância solar.....	29
Figura 2.8 - Mapa dados totais diários da irradiação no Brasil. (média anual).....	31
Figura 2.9 - Potencial de geração solar fotovoltaica (rendimento energético anual)	32
Figura 2.10 - Perfis de radiação solar diárias com valores equivalentes de HSP.....	33
Figura 2.11 - O ângulo de declinação solar variando ao longo do ano de acordo com a posição da Terra em sua órbita em torno do Sol.....	34
Figura 2.12 - O ângulo de declinação solar é máximo no início do inverno e do verão e nulo no início do outono e da primavera	34
Figura 2.13 - A trajetória do movimento aparente do Sol é diferente ao longo do ano	35
Figura 2.14 - Orientação azimutal correta do módulo solar, com sua face voltada para o norte geográfico.....	36
Figura 2.15 - Módulo solar com orientação azimutal incorreta	36
Figura 2.16 - Ângulo de inclinação do módulo e ângulo de incidência dos raios solares.....	37
Figura 2.17 - Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia	37
Figura 3.1 - Esboço de sistema híbrido	39
Figura 3.2 - Esboço de um sistema fotovoltaico conectado à rede	42
Figura 3.3 - Conexões elétricas em série das células fotovoltaicas de um módulo	44
Figura 3.4 - Componentes de um módulo fotovoltaico.....	44
Figura 3.5 - Curva característica I – V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.....	45
Figura 3.6 - Curva característica P – V de potência e tensão de um módulo fotovoltaico.....	46
Figura 3.7 - Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico	47
Figura 3.8 - Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica.....	48
Figura 3.9 - Funcionamento do sistema de MPPT com o algoritmo de perturbação e observação	49
Figura 3.10 - Conjunto de módulos fotovoltaicos com sombreamento parcial.....	50

Figura 3.11 - Curva de potência conjunto de módulos fotovoltaicos com sombreamento parcial	51
Figura 3.12 - Módulos fotovoltaicos em situação de sombreamento parcial com sistema de MPPT independentes.....	51
Figura 3.13 - Curva de potência conjunto módulos fotovoltaicos em situação de sombreamento parcial com sistema de MPPT independentes.	52
Figura 4.1 - Localização do estabelecimento através do Google Earth	54
Figura 4.2 - Exposições disponíveis no estabelecimento	55
Figura 4.3 - Ângulo azimutal das exposições disponíveis dos imóveis comerciais.....	55
Figura 4.4 - Possíveis obstáculos de sombreamento	56
Figura 4.5 - Áreas indisponíveis.....	57
Figura 4.6 - Irradiação solar da cidade de Tucuruí - PA	58
Figura 5.1 - Dimensões do módulo selecionado, vista frontal e traseira.....	63
Figura 5.2 - Curvas I – V e P – V de temperatura e irradiância do módulo selecionado	63
Figura 5.3 - Exposições para a instalação dos módulos	66
Figura 5.4 - Estimativas de geração	70
Figura 5.5 - Layout do sistema fotovoltaico.....	71
Figura 5.6 - Layout do inversor fotovoltaico.....	71
Figura 6.1 - Medidor Bidirecional.....	73
Figura 6.2 - Interface Web do sistema de monitoramento	74
Figura 6.3 - Geração de Energia Elétrica no mês de janeiro	75
Figura 6.4 - Geração de Energia Elétrica no mês de fevereiro.....	75
Figura 6.5 - Geração de Energia Elétrica no mês de agosto.....	76
Figura 6.6 - Geração de Energia Elétrica no mês de dezembro	77
Figura 6.7 - Geração de Energia Anual	77
Figura 6.8 - Retorno do Investimento.....	78
Figura 6.9 - Contribuição Social	79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.4 ESCOPO DO TRABALHO	13
2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	15
2.1 ENERGIA RENOVÁVEL	15
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	23
2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO	26
2.4 RADIAÇÃO SOLAR	27
2.5 CAPTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR	33
3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	38
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	38
3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	40
3.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMERCIAIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA	41
3.4 COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA	43
3.4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	43
3.4.2 CARACTERÍSTICAS DOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS	47
3.4.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	52
4 LEVANTAMENTO DE DADOS	53
4.1 AVALIAÇÃO TÉCNICA E LEVANTAMENTO DE DADOS	53
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DA INSTALAÇÃO	53
4.2.1 IDENTIFICAÇÃO DA EDIFICAÇÃO	53
4.2.2 EXPOSIÇÕES DISPONÍVEIS	54
4.2.3 AZIMUTE DAS EXPOSIÇÕES	55
4.2.4 INCLINAÇÃO DAS EXPOSIÇÕES	56
4.2.5 OBSTÁCULOS E SOMBREAMENTO	56
4.2.6 ÁREA DISPONÍVEL	56
4.2.7 DADOS DE IRRADIAÇÃO DO LOCAL	57
4.2.6 LEVANTAMENTO DO CONSUMO NA RESIDÊNCIA	58
5 PROJETO FOTOVOLTAICO	60
5.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA	60
5.1.1 ESTIMATIVA DE POTÊNCIA NECESSÁRIA	60

5.1.3 ESCOLHA DO INVERSOR	64
5.1.4 DEFINIÇÃO DAS EXPOSIÇÕES	65
5.1.5 PROTEÇÃO DO SISTEMA	66
5.1.6 ESTRUTURAS DE APOIO	67
5.1.7 CABEAMENTO	67
5.1.8 PONTO DE CONEXÃO	68
5.1.9 PADRÃO DE ENTRADA	68
5.1.10 GERADOR FOTOVOLTAICO	68
5.1.11 <i>LAYOUT</i> DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	70
5.1.12 DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA	72
6 RESULTADOS	73
6.1 CONEXÃO COM A REDE	73
6.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO	73
6.3 ROI DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	77
6.4 BENEFÍCIO AO MEIO AMBIENTE	78
CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS	82
ANEXOS	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Aproveitar a energia gerada pelo sol, que é inesgotável na escala de tempo da Terra, tanto como fonte de calor quanto como fonte de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras hoje para fornecer a energia necessária ao desenvolvimento humano. Ao falar sobre energia, deve-se lembrar que o sol é a fonte de quase todas as outras fontes de energia da Terra. Em outras palavras, a energia vem principalmente da energia solar, (PINHO; GALDINO, 2014).

Nas últimas décadas, o mercado fotovoltaico mundial experimentou um crescimento exponencial. Mais recentemente, a China passou a liderar o mercado, tanto do ponto de vista tecnológico quanto na implementação de metas internas de redução de emissões de CO₂. Além de incentivar modelos regulatórios e políticas de comercialização da energia solar fotovoltaica, esses e vários outros incentivos para a indústria fotovoltaica alavancam a fabricação e comercialização de equipamentos e componentes.

O mercado fotovoltaico do Brasil tem crescido rapidamente nos últimos anos, principalmente devido às capacidades de radiação solar do país, oportunidades para explorar reservas naturais de quartzo e compromissos globais para reduzir as emissões de CO₂, e várias aquisições de sistemas fotovoltaicos.

Segundo a ANEEL (2022), o Brasil superou a marca de 10 gigawatts (GW) de potência instalada em micro e minigeração distribuída de energia elétrica, esta que é gerada pelos próprios consumidores. Esse valor é capaz de abastecer cerca de 5 milhões de unidades de residências brasileiras, isto é, atender quase 20 milhões de pessoas. Esta é uma marca significativa pois em 2019 comemorava-se a marca de 1 GW de potência instalada de micro e minigeração.

Ainda segundo dados da ANEEL (2022), só na região Norte são 1.012.658,94 kW de potência instalada, 415 municípios com geração distribuída e cerca de 106.309 unidades consumidoras que recebem os créditos de geração.

Portanto, este trabalho de conclusão de curso irá abranger o estudo técnico e econômico, de forma teórica e prática, para analisar a viabilidade da instalação de um sistema fotovoltaico, através de um estudo de caso, em um prédio comercial, mais especificamente, a Padaria Mega

Pão, popularmente conhecida na cidade, localizado no município de Tucuruí - PA, com um consumo médio mensal de 5.773 kWh.

1.2 JUSTIFICATIVA

O mundo é movido a energia e está mudando a cada dia, tanto nas atividades desenvolvidas quanto na indústria, há uma demanda crescente por eletricidade, especialmente as de origem renovável. No entanto, uma grande porcentagem das pessoas que utilizam e não conhece sua origem ou nem se importa com ela. No entanto, com as discussões sobre as consequências de gerar energia a partir de fontes poluentes, os mercados de energia têm buscado soluções ou alternativas com menor impacto ambiental.

Uma das razões para se optar pela utilização de sistemas fotovoltaicos para se gerar energia é a econômica, pela redução na fatura de energia, isso atrelado ao fato de ser uma fonte de energia limpa e renovável.

Com a realização satisfatória do presente projeto, propõe-se exibir um recurso para a comunidade como um meio de solução para a situação atual na qual a fatura de energia está cada vez mais elevada, que afeta a renda dos consumidores.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo a elaboração do projeto elétrico de um sistema fotovoltaico propício para um prédio comercial, dimensionando e especificando os devidos componentes e equipamentos necessários para a sua implementação.

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 6 capítulos mais a conclusão e anexos, da seguinte forma:

Capítulo 1: Trata-se da introdução do trabalho, com uma breve exposição do conteúdo, logo depois a justificativa e os objetivos.

Capítulo 2: O conceito de energia solar é revisto, juntamente com fatores como a radiação solar, o conceito de captação solar e a orientação, inclinação e posicionamento dos módulos. É visto os aspectos fundamentais de instalações fotovoltaicas caracterizadas para melhor captar os recursos de energia solar e assim gerar a melhor produção de energia elétrica possível para a localidade.

Capítulo 3: São relatados alguns modelos de sistemas fotovoltaicos e a possibilidade de ligação à rede, agregando-se o conceito de geração distribuída. Além de apresentar os dispositivos utilizados nos sistemas fotovoltaicos, assim como seus princípios de operação e características elétricas.

Capítulo 4: É mostrado a pesquisa feita dos dados do estabelecimento comercial para fundamentar o projeto do sistema fotovoltaico mais adequado à realidade do local. As informações foram adquiridas em visita técnica feita no local.

Capítulo 5: Apresenta o dimensionamento do projeto fotovoltaico do estabelecimento comercial, o cálculo de geração esperado do sistema, as orientações dos módulos fotovoltaicos e a caracterização do gerador mais adequado para satisfazer a demanda requerida.

Capítulo 6: Descreve os resultados obtidos ao longo de um período do sistema fotovoltaico já implementado, o seu desempenho e geração em tempo real de energia elétrica.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1 ENERGIA RENOVÁVEL

A demanda global de energia para o desenvolvimento socioeconômico e melhoria da qualidade de vida da população tem aumentado significativamente devido aos avanços tecnológicos e científicos da sociedade humana. Desde meados da década de 1850, o consumo global de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) dominou a oferta de energia, levando ao rápido crescimento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), e o consumo dessas fontes não renováveis de energia é responsável pela maior parte das emissões antropogênicas globais desses gases. (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018)

No entanto, desde a última virada do século XX, o mundo testemunhou uma mudança evidente no consumo de fontes de energia. O setor de energia mudou significativamente, principalmente devido ao aumento inesperado dos investimentos no mercado de energia renovável, novas capacidades tecnológicas e altas taxas de crescimento nos países em desenvolvimento. Conseqüentemente, tem-se testemunhado cada vez mais o rápido desenvolvimento de fontes não convencionais e desenvolvimentos tecnológicos para a exploração de todas as formas de energia. Isso tem contribuído para a queda nos preços e aumento da dissociação entre os conceitos de crescimento econômico e emissões de GEE. Por isso, a maioria dos países tem buscado uma maior diversificação de sua matriz energética, com crescimento do setor privado de microprodução de energia e desenvolvimento do sistema de geração descentralizado, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

As tecnologias renováveis são consideradas fontes limpas de energia. O uso otimizado desses recursos minimiza os impactos ambientais, produz resíduos secundários mínimos e são sustentáveis com base nas necessidades econômicas e sociais atuais e futuras. O desenvolvimento sustentável requer métodos e ferramentas para medir e comparar as atividades humanas e seus impactos ambientais para vários produtos. As fontes de energia renováveis, que incluem biomassa, energia hidrelétrica, geotérmica, solar, eólica e marinha, fornecem 14% da demanda total de energia do mundo. Os recursos renováveis referem-se a recursos energéticos primários, domésticos e limpos ou inesgotáveis. A energia hidrelétrica em grande escala fornece 20% da necessidade global de eletricidade. A energia eólica em regiões costeiras e outras regiões ventosas é uma fonte promissora de energia, (RATHORE; PANWAR, 2021).

Os recursos energéticos renováveis podem contribuir decisivamente para o desenvolvimento econômico, social e sustentável das regiões rurais dos países em

desenvolvimento, mas o consumo de combustíveis fósseis está aumentando drasticamente juntamente com a melhoria da qualidade de vida, a industrialização das nações em desenvolvimento e o aumento da população mundial. Há muito se reconhece que o consumo excessivo de combustível fóssil leva não apenas a uma diminuição mais rápida das reservas de combustível fóssil, mas também tem um impacto adverso significativo no meio ambiente. Tais impactos resultam no aumento dos riscos à saúde e na ameaça das mudanças climáticas globais. Mudanças para melhorar as condições ambientais estão se tornando politicamente mais aceitáveis globalmente, especialmente nos países desenvolvidos, (RATHORE; PANWAR, 2021).

A sociedade caminha lentamente na busca de métodos de produção mais sustentáveis, minimizando o desperdício, reduzindo a poluição do ar por veículos, gerando energia distribuída, conservando as florestas nativas e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa. O aumento do consumo de combustível fóssil para atender às demandas atuais de energia soou alarmes sobre uma potencial crise energética, (RATHORE; PANWAR, 2021). Isso gerou um ressurgimento do interesse em promover alternativas renováveis para atender às crescentes necessidades energéticas do mundo em desenvolvimento. O uso excessivo de combustíveis fósseis tem causado o aquecimento global a partir das emissões de dióxido de carbono, portanto, a promoção de formas renováveis de energia limpa é avidamente necessária, (RATHORE; PANWAR, 2021).

Políticas e pesquisas energéticas prudentes podem desempenhar um papel importante na orientação de países industrializados e em desenvolvimento para caminhos de desenvolvimento energético mais sustentáveis. Especificamente, podem fortalecer os três pilares do desenvolvimento sustentável: a economia, por meio do aumento da produtividade; bem-estar social, melhorando os padrões de vida e aumentando a segurança e proteção, e o meio ambiente, reduzindo a poluição interna e externa e remediando a degradação ambiental, (RATHORE; PANWAR, 2021).

Qualquer forma de energia é necessária para atender a muitos de nossos requisitos para um mundo mais sustentável. Suas definições variadas mostram a importância da energia em nossa vida. Tudo o que acontece no universo é essencialmente um processo de energia. E a energia nada mais é que a capacidade de realizar trabalho. Na verdade, é um meio para realizar atividades que estão diretamente relacionadas ao ser humano. As fontes de energia disponíveis às vezes são chamadas de combustível. O termo originalmente entrou em uso para descrever

fontes de energia e para mostrar o fenômeno da queima de óleo, carvão, madeira, óleo etc., (RATHORE; PANWAR, 2021).

Enfim, as vantagens do uso de fontes renováveis são amplamente reconhecidas. No entanto, sua natureza inconsistente e muitas vezes imprevisível é vista como barreiras para a integração em larga escala na rede de energia convencional. Alguns desses desafios são: flutuações da energia gerada; garantia reduzida de energia e potência; impacto na regulação de tensão na rede local; e a estabilidade do sistema elétrico. As particularidades dos sistemas de energia representam grande parte do problema, pois precisam equilibrar as relações de oferta e demanda devido ao custo ainda elevado de sistemas de armazenamento de eletricidade. (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018)

A matriz energética brasileira possui uma característica única que a diferencia do resto do mundo: possui uma parcela significativa de fontes renováveis de energia. Particularmente no que diz respeito à sua geração de energia elétrica, a matriz brasileira caracteriza-se pela predominância na participação da energia hidrelétrica na geração de energia elétrica. (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018)

As mais proeminentes fontes de energia renovável no país são as PCH 's (Pequenas Centrais Hidrelétricas), Biomassa, Solar Fotovoltaica e Eólica, das quais são qualificadas pela forma que é empregada. Ambas, nos últimos anos, ganharam representatividade significativa na matriz energética no país. (BRASIL, 2021)

PCH é a abreviação de "Pequena Central Hidrelétrica", que se refere às usinas hidrelétricas menores em tamanho e capacidade do que aquelas classificadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 1997.

A energia cinética da água corrente dos rios pode ser aproveitada de duas maneiras: como a alta energia potencial da água na barragem é transportada e usada para girar as turbinas na base da barragem ou apenas como a energia cinética da água corrente sem reservatório. O segundo modo é usualmente empregado em plantas conhecidas como “água a fio d'água”. De ambas as formas, a geração de energia hidrelétrica é feita a partir do fluxo de água em uma usina, cujas obras civis, que envolvem tanto a construção e o desvio do rio quanto à formação do reservatório, são tão importantes quanto os equipamentos instalados. (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018)

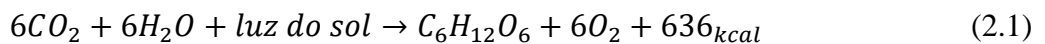
No Brasil, a energia hidrelétrica instalada em uma usina determina sua classificação. De acordo com a Lei nº 13.097 de 2015, às usinas com potência instalada de até 100 kW, e alturas de queda entre 15 e 50 m, são classificadas como Microcentrais. As usinas com potência instalada de 100 kW a 3 MW e alturas de queda entre 20 e 100 m são classificadas como usinas de microgeração. As usinas com potência instalada de 3 MW a 50 MW e alturas de queda entre 25 e 130 m são classificadas como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Portanto, as usinas com potência instalada acima de 50 MW são classificadas como Usinas Hidrelétricas, ou UHEs. Os empreendimentos com capacidade instalada inferior a 3 MW (Microgeração) estão isentos de qualquer tipo de concessão, anuência ou autorização, devendo somente ser notificados ao poder concedente. (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018)

Com o mesmo princípio das Hidroelétricas em larga escala, as PCH's (Pequenas Centrais Hidroelétricas) servem como uma fonte de energia barata e renovável com impactos ambientais insignificantes, a mesma tem um papel importante a desempenhar no futuro fornecimento de energia no cenário energético no país. É uma alternativa atraente para sistemas diesel em áreas rurais e remotas como meio de alcançar a eletrificação rural. (RATHORE; PANWAR, 2021)

Como espera-se acabar com os combustíveis convencionais, como petróleo e gás natural, há muitos anos que se buscam alternativas que proporcionem a utilidade, flexibilidade, limpeza e economia desses recursos. Uma dessas alternativas é tão perto quanto o balde de lixo da cozinha ou as plantas do lado de fora. isto é biomassa - uma fonte de energia que é tão antiga quanto a humanidade e tão nova quanto o jornal da manhã, (HINRICHS; KLEINBACH, 2012).

As fontes de biomassa estão em forte desenvolvimento hoje como combustíveis alternativos para transporte, especialmente por causa dos altos preços do petróleo, novos padrões de poluição do ar e preocupações com o aquecimento global. A energia da biomassa é aquela derivada da matéria viva, como plantações (milho, trigo), árvores e plantas aquáticas; são também resíduos agrícolas e florestais (incluindo resíduos de colheitas e estrume) e resíduos sólidos urbanos. A biomassa pode ser descrita como “energia solar armazenada”. Ele pode ser usado como combustível de três formas: (a) combustíveis de biomassa sólida ou matérias-primas como cavacos de madeira; (b) combustíveis líquidos produzidos a partir de biomassa sólida por ação química ou biológica e/ou conversão de açúcares vegetais em etanol ou metanol; e (c) combustíveis gasosos produzidos por processamento em alta temperatura e alta pressão, (HINRICHS; KLEINBACH, 2012).

O termo “biomassa” geralmente se refere à matéria orgânica renovável gerada pelas plantas através da fotossíntese. Materiais com matéria orgânica combustível também são referidos como biomassa. A biomassa é uma importante fonte de combustível em nosso cenário energético geral. A biomassa é produzida através do armazenamento químico de energia solar em plantas e outras matérias orgânicas como resultado da fotossíntese. Durante este processo ocorre a conversão da energia solar em açúcar e amido, que são compostos ricos em energia. A reação química da fotossíntese pode ser escrita pela fórmula (2.1).



Indica que o armazenamento de 636 kcal está associado à transferência de 72 g de carbono em matéria orgânica. A biomassa pode ser utilizada diretamente como combustível ou pode ser convertida através de diferentes rotas em formas úteis de combustível. Na verdade, a biomassa é uma fonte de cinco agentes úteis, que começam com 'F' como alimentos, forragem, combustível, fibra e fertilizante. Além disso, a biomassa tem muitas vantagens como: está amplamente disponível; sua tecnologia para produção e conversão é bem compreendida; é adequada para pequenas ou grandes aplicações, incorpora vantagem de armazenamento e transporte; e está associada a uma poluição baixa ou insignificante, (RATHORE; PANWAR, 2021).

O uso da energia eólica pelo homem também é milenar. Ao longo de sua história de uso da energia eólica, além de ser uma força motriz, o vento também desempenhou um papel importante em aplicações mecânicas, como moagem de grãos, bombeamento de água e máquinas. Assim, como a energia solar, a energia eólica pode ser considerada de longevidade virtualmente infinita. No entanto, para determinar se sua utilização é viável ou não, é imprescindível considerar a densidade de energia eólica disponível em cada região. É importante ressaltar que o recurso eólico não está distribuído uniformemente pelo planeta, os ventos são formados devido a gradientes de pressão causados por gradientes térmicos que resultam do aquecimento e resfriamento da atmosfera. Estas correntes de vento não são constantes ao longo do tempo, embora a velocidade média do vento possa ser estimada em um determinado local, suas variações são um pouco mais imprevisíveis, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

Assim, o uso da energia eólica deve ser planejado em conjunto com os sistemas de armazenamento. A energia cinética das correntes eólicas pode ser transformada em energia elétrica a partir de um sistema de geração de energia eólica. Este sistema consiste em um

moinho de vento, ou turbina eólica, conectado a um transformador e sistema de transmissão, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

A pressão do vento gira as pás acopladas ao rotor, que é conectado ao eixo de um gerador elétrico por meio de caixa de transmissão. Como resultado, a energia cinética do vento é transformada em energia elétrica pelo gerador. Esta energia é produzida em energia de corrente contínua. Assim, a invenção do “inversor síncrono” revolucionou o setor de energia eólica, pois permitiu a conversão da corrente contínua do gerador eólico em corrente alternada, possibilitando a conexão para operação em paralelo com a rede elétrica na frequência correta, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

A energia eólica tem um grande potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, substituindo a eletricidade proveniente de combustíveis fósseis. No contexto brasileiro, enquanto os pequenos parques eólicos são capazes de abastecer pequenas localidades distantes da rede, contribuindo para a universalização dos serviços de energia, as grandes usinas podem atender uma parcela significativa do Sistema Interligado Nacional. Assim, a participação desta fonte energética na matriz brasileira pode trazer significativos benefícios ambientais e sociais, como reduzir a emissão de poluentes atmosféricos; reduzir a necessidade de construir grandes reservatórios; e reduzir os riscos de desabastecimento de energia devido à sazonalidade hidrológica, graças à complementaridade dos dois sistemas. Além disso, a disponibilidade comercial e o custo da tecnologia fazem com que esse tipo de utilização seja imediatamente implementada em larga escala. (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018)

Como o próprio nome indica, a energia solar usa a radiação solar recebida absorvida pela atmosfera da Terra. Esta energia pode ser convertida em calor e utilizada em sistemas de aquecimento, ou convertida em eletricidade por métodos diretos ou indiretos. Enquanto os módulos fotovoltaicos transformam diretamente a energia solar em energia elétrica, os sistemas de concentração captam e concentram o calor do sol, utilizando-o para aquecer um fluido, que por sua vez é utilizado para produzir vapor, responsável por acionar turbinas, cuja energia mecânica é finalmente convertida em eletricidade por meio de geradores. (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018)

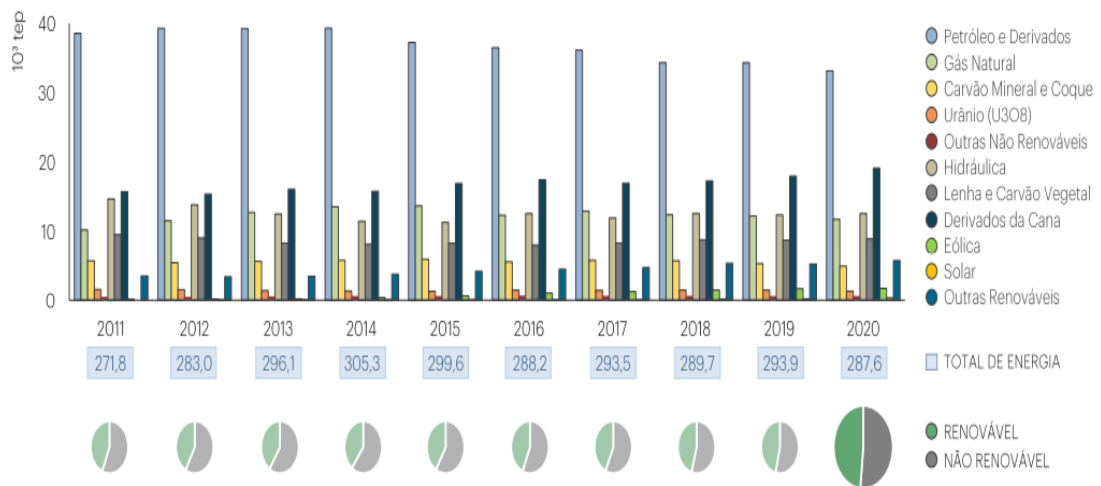
No entanto, a definição de energia solar fotovoltaica será extensivamente debatida na Seção 2 deste capítulo.

A matriz energética do Brasil é umas das mais renováveis no mundo, e isto é devido a vários fatores como o avanço tecnológico, redução de custos de implantação e operação e

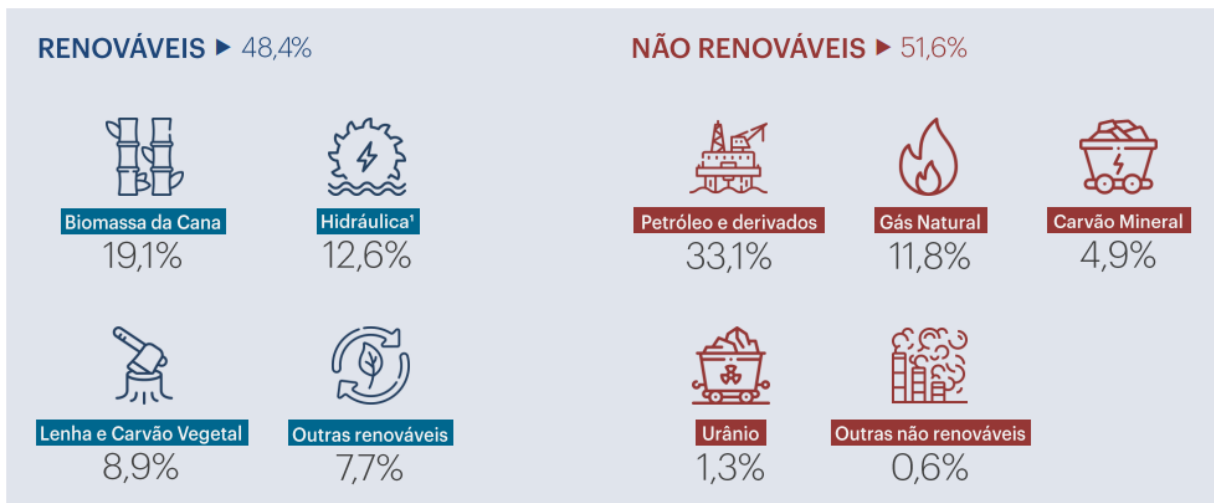
sobretudo de novas regulamentações governamentais que fomentam a diversificação da matriz energética nacional.

Em cumprimento ao estabelecido em sua lei de criação (nº 10.847, Art. 4º, inciso II), a empresa de Pesquisa Energética (EPE) elabora e publica anualmente o Balanço Energético Nacional (BEN), com a supervisão do Ministério de Minas e Energia (MME). O mesmo tem por finalidade apresentar a contabilização relativa à oferta e ao consumo de energia no Brasil. Com base neste relatório, é possível verificar os dados da geração de energia elétrica por fontes, como ilustram as Figuras 2.1 e 2.2. (BRASIL, 2021)

Figura 2.1 - Oferta Interna de Energia Elétrica 2020



Fonte: EPE, (2021)

Figura 2.2 - Repartição da Oferta Interna de Energia Elétrica (OIE) 2020

Fonte: EPE, (2021)

De acordo com a Figura 2.1, nota-se que houve uma redução de fontes renováveis na matriz energética entre 2011 e 2014 devido à queda da oferta hidráulica. A partir de 2015, às fontes renováveis retomam uma trajetória de crescimento com a expansão das ofertas de derivados da cana, eólica e biodiesel, atingindo 48,4% em 2020, como representado na Figura 2.2. Ainda segundo o BEN, em 2020 a participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira atingiu 84,8% de renovabilidade. Esse movimento se deu justamente pela combinação entre o aumento da geração por meio de fontes renováveis, sobretudo biomassa e solar, e a redução do uso de fontes fósseis para geração termelétrica.

Em resumo, os dados apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2 mostram que o uso de fontes renováveis de energia não é uma questão nova no Brasil. No entanto, devido à abundância de recursos hidrelétricos disponíveis e ao custo relativamente baixo, o uso generalizado de hidrelétricas causa grandes áreas de alagamento e a geração de metano através da decomposição de matéria orgânica. Também é importante notar que a dependência do país de usinas hidrelétricas tem prejudicado a geração de energia elétrica no Brasil desde alguns anos atrás devido a fatores climáticos. Esse fato reforça a importância de diversificar a matriz energética e introduzir mais fontes renováveis de energia.

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão, (PINHO; GALDINO, 2014).

Em resumo, o estudo da tecnologia fotovoltaica começou em 1800, e a pesquisa continuou até 1904 para completar a fase de descoberta da fotovoltaica. Em 1905, uma base científica foi formada para o desenvolvimento de tecnologia até a década de 1950, onde os laboratórios Bell introduziram a primeira célula solar de silício em 1954. Após esse avanço, os primeiros dispositivos fotovoltaicos práticos surgiram drasticamente por uma década. De 1960 a 1980, a tecnologia fotovoltaica obteve uma escala global, e sua utilização foi estendida para a escala de potência enquanto o número de dispositivos integrados a essa tecnologia crescia. Os desenvolvimentos fotovoltaicos desaceleraram durante 1980-2000, que estava enraizado nas estratégias de independência política e energética. No entanto, a partir de 2000, a tecnologia acelerou, impulsionada pela considerável redução de custos e grandes melhorias na eficiência das células comerciais. Isso levou ao advento da nova geração de células e à implantação avançada da tecnologia. A linha do tempo histórica do desenvolvimento da tecnologia é ilustrada na Figura 2, (GORJIAN; SHUKLA, 2020).

Figura 2.3 - Os principais marcos na história do desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica

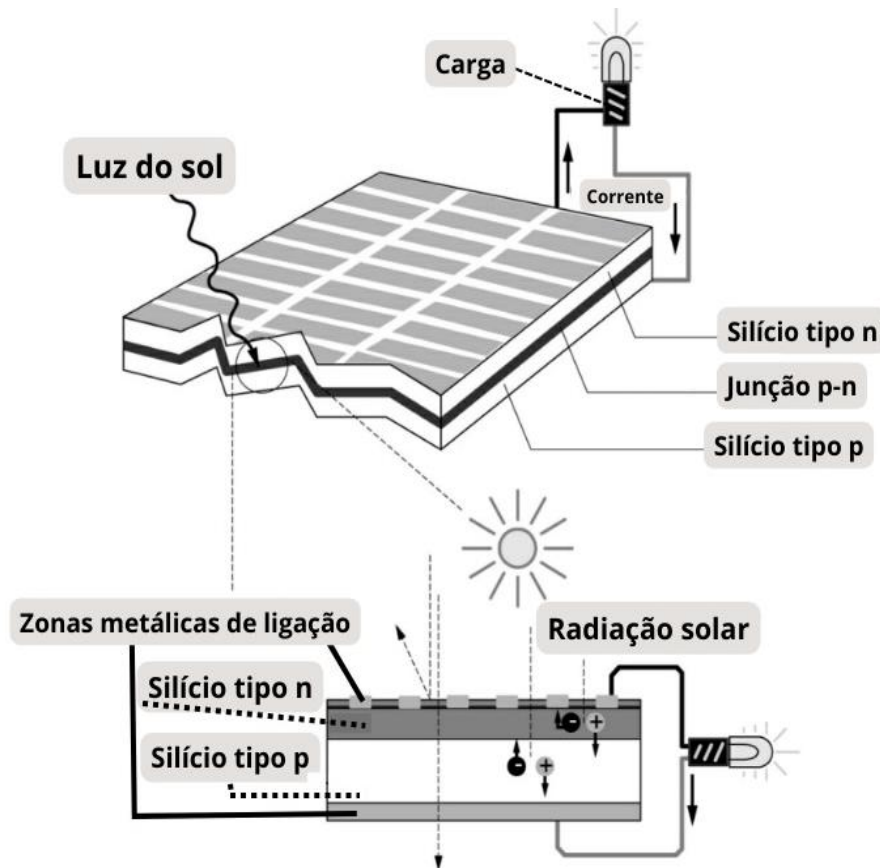


Fonte: adaptado de Gorjian; Shukla, (2020, p.18)

O aproveitamento da energia solar pode ser realizado empregando um painel fotovoltaico, devido a um fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico. A energia é gerada

pela luz solar quando atinge diretamente os painéis de materiais semicondutores (silício). Esses materiais contêm células menores, dispostas em duas camadas, uma positiva e outra negativa. Quando a energia do sol chega, o material semicondutor faz com que os elétrons se movam entre as duas camadas, com uma quantidade de energia cinética inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz incidente, gerando uma corrente elétrica contínua. No entanto, grande parte da luz que incide sobre uma célula é perdida antes que possa ser convertida em corrente elétrica, e as eficiências de conversão de um painel solar variam de 10 a 15%, podendo chegar a 30%. É mostrado na Figura 2.4 o esquema operacional de um módulo fotovoltaico, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

Figura 2.4 - Esquema de funcionamento de um painel fotovoltaico.



Fonte: adaptado de ZILLES et al., (2012, p.25)

O sistema solar fotovoltaico é composto por três subsistemas básicos: o subsistema gerador, o subsistema de condicionamento de energia e, quando necessário, uma unidade de armazenamento. Enquanto o primeiro subsistema é composto por painéis fotovoltaicos em diversos arranjos, cabeamento elétrico e estruturas de suporte, o segundo pode ser composto por conversores cc-cc, pontos de máxima potência (MPPT), inversores, controladores de carga,

entre outros dispositivos de proteção e controle. O terceiro inclui as baterias e/ou outras formas de armazenamento. Esses sistemas podem ser conectados à rede ou autônomos, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos são capazes de atender às comunidades isoladas e desconectadas do sistema nacional de distribuição de energia. A energia solar geralmente pode ser aproveitada em locais onde é impossível explorar outras fontes, como hidrelétricas ou eólicas, devido à simplicidade do sistema e abundância da fonte de luz, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

Portanto, essa tecnologia tem potencial para melhorar a qualidade de vida dessas populações mais isoladas, gerando novas oportunidades econômicas, melhores condições de trabalho e maior acesso à informação. Além disso, outra vantagem de um sistema fotovoltaico é que ele quase não gera resíduos sólidos, líquidos ou gasosos durante a operação, exceto a água utilizada na limpeza esporádica dos painéis. E ainda, a operação desses sistemas não produz ruídos e nem exige o uso de qualquer fonte de energia não renovável, (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

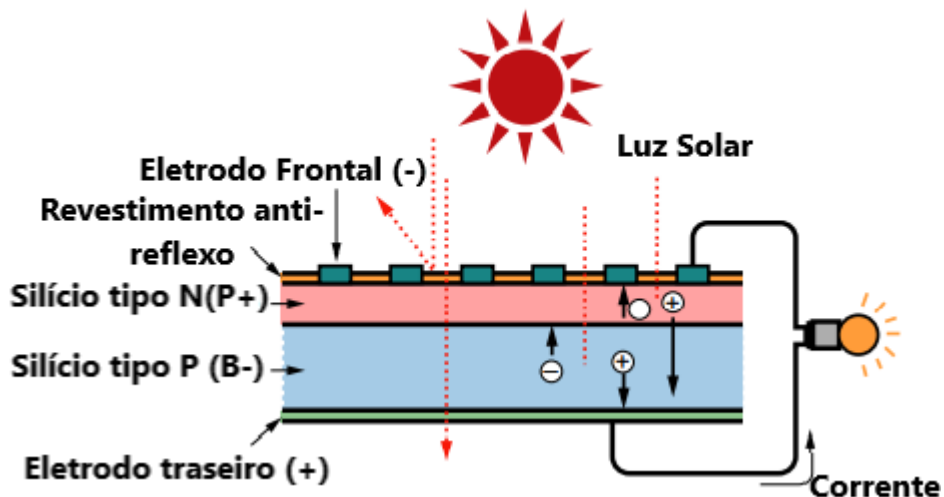
O efeito fotovoltaico é um processo no qual a luz é convertida em eletricidade. Foi experimentado pela primeira vez em 1839 por Henri Becquerel quando ele emergiu uma folha de platina (Pt) revestida com uma fina camada de cloreto de prata em uma solução eletrolítica e, em seguida, iluminou a folha enquanto estava conectada a um contra eletrodo. Na tecnologia fotovoltaica, a energia elétrica de corrente contínua (CC), indicada por watts (W) ou quilowatts (kW), é gerada a partir de materiais semicondutores à medida que recebem fótons em um processo de iluminação. Funcionalmente, os elementos fotovoltaicos individuais, principalmente conhecidos como células solares, incluem uma junção p-n em um material semicondutor onde ocorre a absorção de luz. As células solares nunca mais precisam ser recarregadas para produzir eletricidade, como acontece com uma bateria. Portanto, a geração de energia elétrica continua enquanto a luz for lançada em uma célula solar. Uma vez que a iluminação é interrompida, a geração de eletricidade também é interrompida, (GORJIAN; SHUKLA, 2020).

Uma célula solar é tão simples quanto um diodo semicondutor em que o projeto e a fabricação cuidadosa, tornaram possível obter e usar a energia fotônica transmitida pela luz

radiante do sol para gerar energia elétrica de maneira eficiente. A física chave de uma célula solar convencional simples é demonstrada na Figura 2.5. (GORJIAN; SHUKLA, 2020)

Primeiro, o incidente solar é entregue na superfície superior de uma célula solar. Um dos contatos elétricos do diodo que é formado por uma grade metálica permite que a luz chegue ao semicondutor e fique entre as linhas da grade para ser absorvida e conseqüentemente produzir uma corrente elétrica. Para melhorar a quantidade de luz transmitida no processo, uma camada antirreflexo pode ser usada entre as linhas de grade. À medida que um semicondutor do tipo n se torna adjunto a um semicondutor do tipo p formando a junção metalúrgica, o diodo semicondutor é formado. Outra camada metálica presa à superfície traseira das células solares forma o outro contato elétrico do diodo. (GORJIAN; SHUKLA, 2020)

Figura 2.5 - Efeito fotovoltaico em uma célula solar



Fonte: adaptado de Gorjian; Shukla, (2020, p.16)

2.4 RADIAÇÃO SOLAR

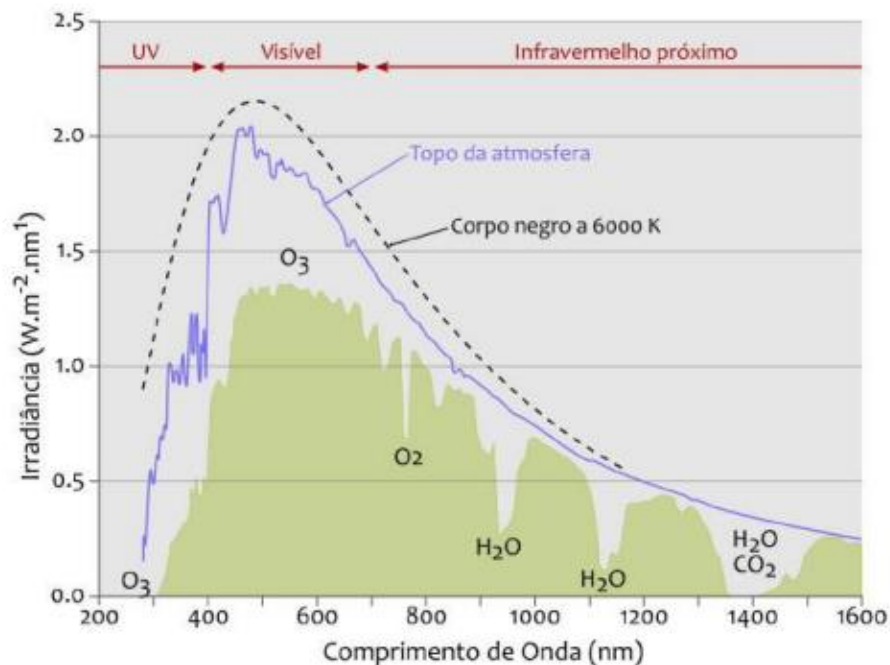
No espaço, o espectro solar é mais parecido com a radiação de um corpo negro e cobre diferentes comprimentos de onda. No entanto, a superfície da Terra absorve a luz solar selecionada, regulada pela atmosfera em um determinado comprimento de onda. A luz solar compreende fótons, partículas minúsculas que carregam as ondas eletromagnéticas originadas do sol e viajando pelo espaço. Todos os fótons que chegam a uma célula solar podem ser convertidos em eletricidade, exceto aqueles com níveis de energia mais baixos. Para uma conversão de energia bem-sucedida, aqueles com níveis de energia mais altos precisam

diminuir seu conteúdo de energia para a energia do intervalo, utilizando a termalização dos transportadores fotogerados, (GORJIAN; SHUKLA, 2020).

A curva de irradiância espectral solar visto na Figura 2.6 cobre uma ampla faixa de comprimentos de onda e forma a distribuição da radiação extraterrestre. No entanto, a atmosfera atenua várias partes do espectro e regula a radiação solar entregue à superfície da Terra pela eliminação dos raios X, (GORJIAN; SHUKLA, 2020).

A massa de ar é definida como o parâmetro atmosférico que geralmente tem forte influência no espectro solar. Depende diretamente da distância mais curta que os raios solares percorrem pela atmosfera ao atingir a superfície da Terra. Portanto, à medida que os ângulos do sol se aproximam do horizonte, a intensidade solar que atinge o solo torna-se enfraquecida devido à maior massa de ar no caminho dos raios. A irradiância solar é a taxa de energia radiante por unidade de área durante um período de tempo produzida a partir do sol. As unidades de irradiância solar são W/m^2 . O ápice da intensidade solar na superfície da Terra é geralmente assumido como $1kW/m^2$, que varia por um conjunto de fatores, como nebulosidade e condições climáticas, bem como mudanças sazonais. (GORJIAN; SHUKLA, 2020)

Figura 2.6 - Espectro eletromagnético da radiação solar



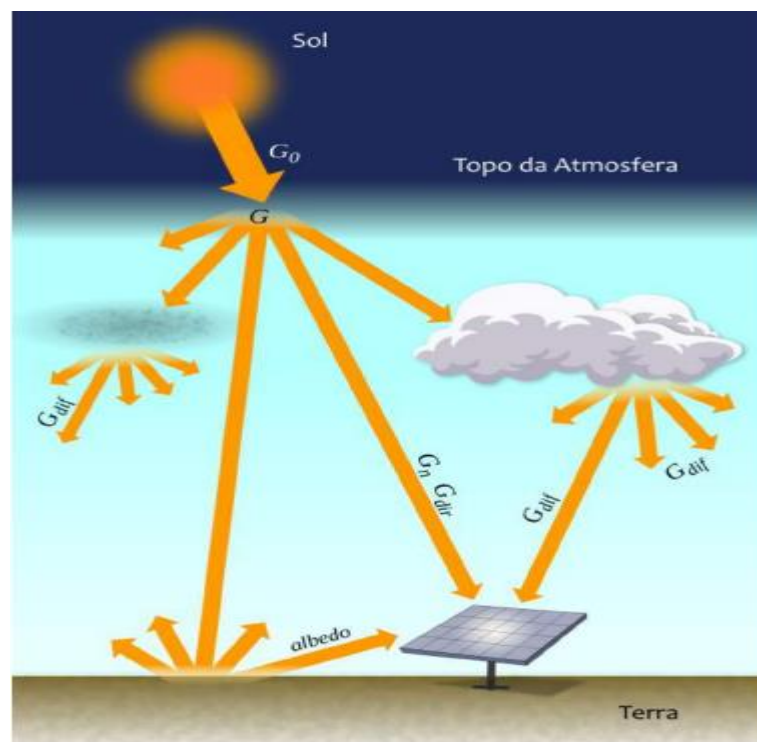
Fonte: ABES, (2017)

Informações detalhadas sobre a disponibilidade de radiação solar em qualquer local são essenciais para o projeto e avaliação econômica dos sistemas fotovoltaicos. A quantidade média

de radiação solar que incide em uma superfície normal aos raios do sol fora da esfera atmosférica da Terra, a insolação extraterrestre, na distância média terra-sol é chamada de constante solar, I_0 . Recentemente, novas medições descobriram que o valor da constante solar é de $1366,1 \text{ W/m}^2$. Ao entrar na atmosfera terrestre, parte da radiação solar é difundida pelo ar, moléculas de água e poeira dentro da atmosfera. A quantidade de radiação solar refletida, espalhada e absorvida depende da distância percorrida pela radiação solar, níveis de partículas de poeira e vapor d'água presentes na atmosfera. (MOUKHTAR et al., 2020)

A irradiância solar que incide em uma superfície é composta por suas componentes direta e difusa. A irradiância solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e partículas presentes na atmosfera. Pode ser mostrada na Figura 2.7 a irradiância no momento que atinge a atmosfera e seu espalhamento. (PEREIRA, 2017)

Figura 2.7 - Componentes da irradiância solar



Fonte: PEREIRA, (2017, p.19)

Segundo o autor Pereira, (2017) a terminologia adotada para os tipos de irradiâncias é a seguinte:

Irradiância extraterrestre (G_0): é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera ou (G_{TOA}).

Irradiância direta normal (G_n): também conhecida como DNI, é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.

Irradiância difusa horizontal (G_{dif}): é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).

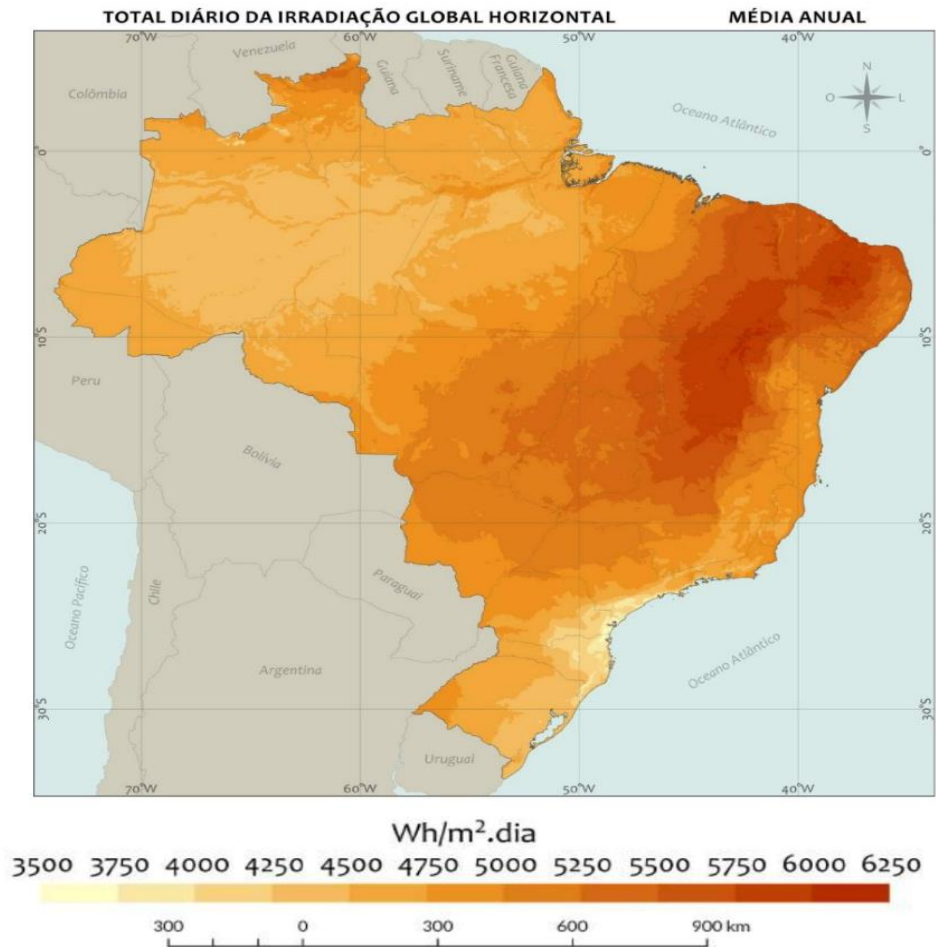
Irradiância direta horizontal (G_{dir}): é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal (DNI) e o cosseno do ângulo zenital solar.

Irradiância global horizontal (G): é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é dada pela soma $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n * \cos(\theta_z)$ onde θ_z é o ângulo zenital.

Irradiância no plano inclinado (G_i): é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra.

A integral da irradiância no tempo é definida como irradiação solar (Wh/m²) ou energia radiante incidente acumulada em um intervalo de tempo. No caso da integral ao longo de um dia, a simbologia adotada é H_0 , H_n , H_{dif} , H_{dir} , H e H_i , respectivamente, (PEREIRA, 2017).

Os dados de irradiação solar no Brasil estão ilustrados nas Figuras 2.8, 2.9, como também na Tabela 2.1. Podem ser consultados no Atlas Brasileiro de Energia Solar, por meio dessas informações é viável projetar a potência necessária do sistema fotovoltaico a ser instalado em qualquer parte do país.

Figura 2.8 - Mapa dados totais diários da irradiação no Brasil. (média anual)

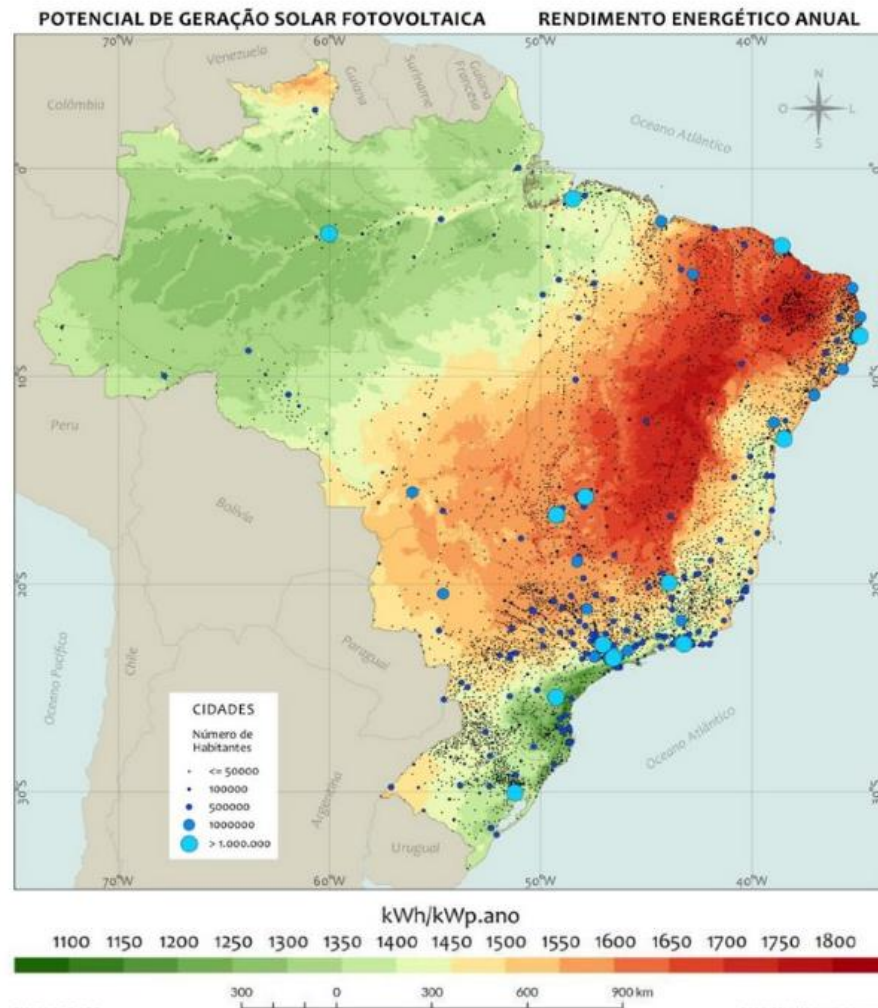
Fonte - PEREIRA, (2017, p. 36)

Tabela 2.1 - Médias mensais dos totais diários de irradiação global para cada região do Brasil

Região		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Norte	P90	6,8	6,3	4,9	4,9	9,0	6,9	7,5	9,6	7,0	5,8	6,5	6,4	5,5
	P10	-6,4	-5,7	-5,2	-4,2	-3,9	-3,9	-6,4	-6,3	-9,0	-5,3	-7,1	-6,7	-5,9
Nordeste	P90	5,0	6,3	5,5	5,1	6,7	6,0	6,7	8,2	7,3	4,5	5,1	4,8	5,1
	P10	-5,1	-4,8	-4,4	-5,2	-5,2	5,2	-4,9	-6,3	-6	-5,4	-4,8	-4,4	-4,8
Centro-Oeste	P90	4,0	3,9	4,2	4,0	6,2	6,8	6,1	8,5	4,9	3,9	3,6	4,2	4,6
	P10	-3,8	-3,2	-3,7	-4,1	-3,5	-4,8	-5,5	-4,3	-4,0	-3,8	-3,0	-3,6	-3,0
Sudeste	P90	5,6	4,9	4,4	4,1	5,0	5,6	7,2	6,5	4,9	4,3	5,0	6,1	4,0
	P10	-5,5	-4,5	-5	-4,3	-4,4	-4,7	-4,8	-5,0	-4,1	-4,6	-4,9	-4,9	-3,8
Sul	P90	3,3	3,6	3,8	3,4	4,3	4,1	3,5	-4,2	4,2	3,3	3,9	3,9	3,2
	P10	-2,9	-3,3	-4,1	-3,3	-3,8	-4,1	-3,9	3,5	-4,3	-4,5	-3,8	-4,7	-3,1
Médio	P90	4,9	5,0	4,6	4,3	6,2	5,9	6,2	7,3	5,7	4,4	4,8	5,1	4,5
	P10	-4,7	-4,3	-4,5	-4,2	-4,2	-4,5	5,1	-5,2	-5,5	-4,7	-4,7	-4,9	-4,1

Fonte - adaptado de PEREIRA, (2017, p. 44)

Figura 2.9 - Potencial de geração solar fotovoltaica (rendimento energético anual)



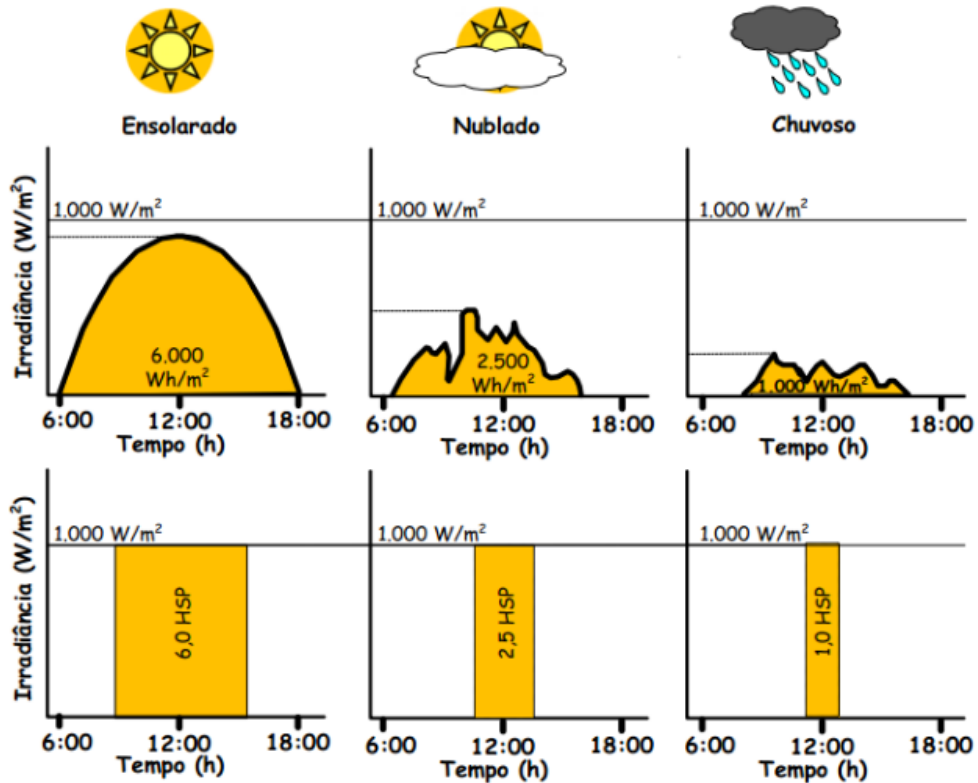
Fonte - adaptado de PEREIRA, (2017, p. 59)

Para as estimativas de produção de energia fotovoltaica, é usual ignorar alguns efeitos da irradiância instantânea e trabalhar com as totalidades convertidas em intervalos de horário. O número de Horas de Sol Pleno (HSP), é uma grandeza que reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer igual a 1 kW/m^2 , de modo que a energia acumulada ao longo do dia seja equivalente à disponibilizada pelo Sol naquele determinado local, mostrada na Figura 2.10, (PINHO; GALDINO, 2014).

O valor de HSP pode ser calculado de acordo com a Equação (2.2).

$$HSP = \frac{\text{Irradiância do Local}[\text{kWh/m}^2]}{1 [\text{kWh/m}^2]} \text{ [h]} \quad (2.2)$$

Figura 2.10 - Perfis de radiação solar diárias com valores equivalentes de HSP



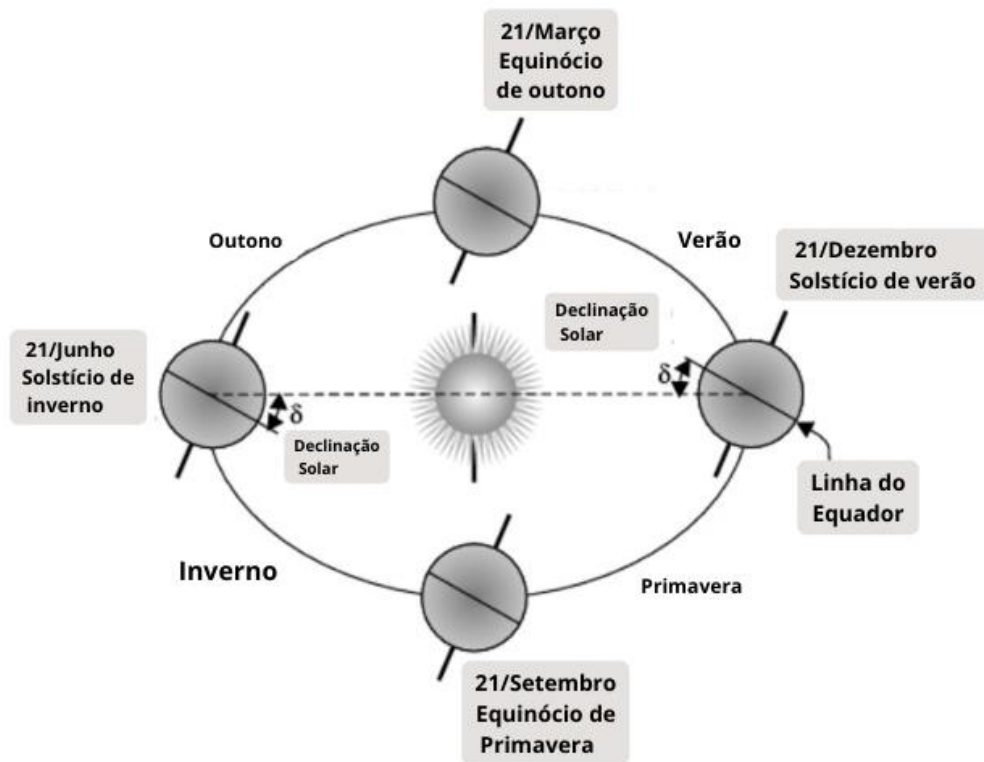
Fonte - PINHO; GALDINO, (2014, p. 301)

2.5 CAPTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR

Nesta seção, vamos compreender o modo como os raios solares chegam à terra e como isso afeta a maneira de instalação dos módulos solares. Algum conhecimento sobre a incidência dos raios solares em nosso planeta é necessário para que os módulos sejam instalados corretamente, fazendo-os captar a energia solar da melhor maneira possível, (VILLALVA, 2015).

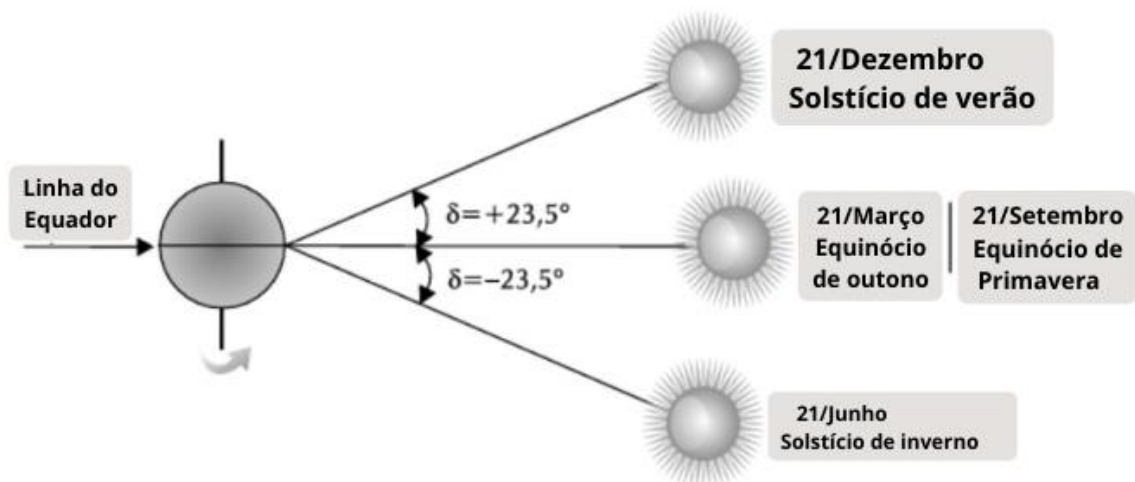
Em cada ponto do planeta a radiação direta incide no solo com uma inclinação diferente. Essa inclinação varia de acordo com a posição da Terra e do sol no espaço. A declinação solar é o ângulo dos raios solares com relação ao plano do equador. Esse ângulo é consequência da inclinação do eixo de rotação da Terra e varia ao longo do ano de acordo com a posição do sol. (VILLALVA, 2015). As posições da Terra podem ser observadas na Figura 2.11. Já na Figura 2.12 mostra o significado do ângulo de declinação, tendo a Terra como referência e mostrando a posição aparente do sol, (VILLALVA, 2015).

Figura 2.11 - O ângulo de declinação solar variando ao longo do ano de acordo com a posição da Terra em sua órbita em torno do Sol



Fonte - adaptado de Villalva, (2015, p. 55)

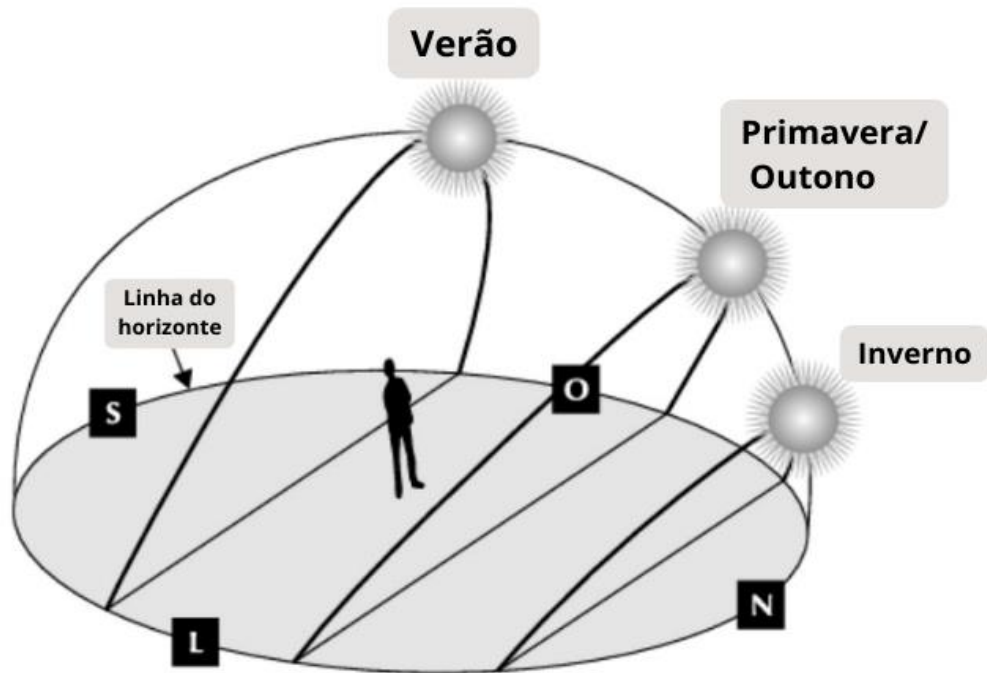
Figura 2.12 - O ângulo de declinação solar é máximo no início do inverno e do verão e nulo no início do outono e da primavera



Fonte - adaptado de Villalva, (2015, p. 55)

Devido à existência do ângulo de declinação solar, o Sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano, como pode ser observado na Figura 2.13, (VILLALVA, 2015).

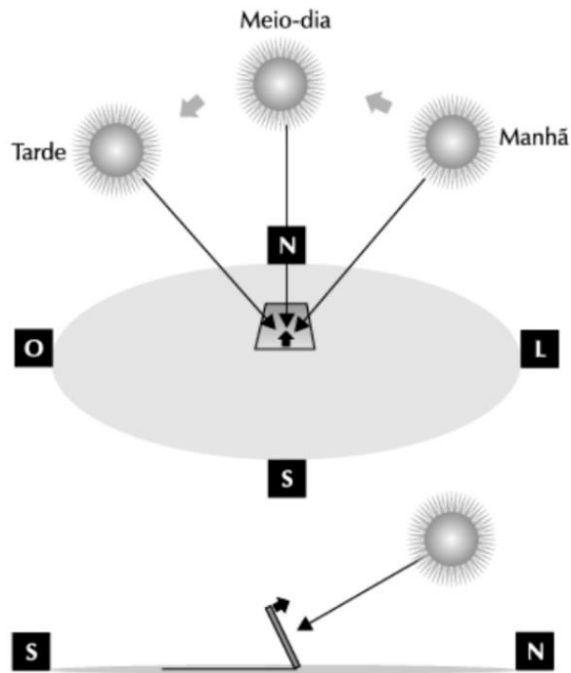
Figura 2.13 - A trajetória do movimento aparente do Sol é diferente ao longo do ano



Fonte - adaptado VILLALVA, (2015, p. 56)

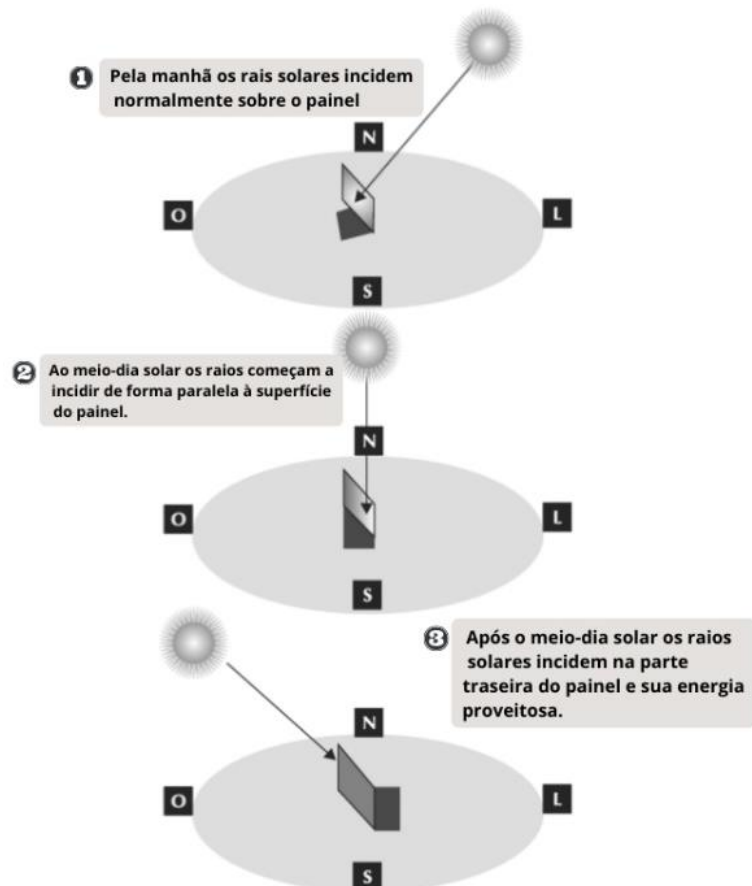
A instalação correta de um módulo solar fotovoltaico deve levar em conta o movimento diário do sol. A melhor maneira de instalar um módulo solar fixo é orientá-lo com sua face voltada para o norte geográfico, Figura 2.14. Essa orientação melhora o aproveitamento da luz solar ao longo do dia, pois durante todo o tempo o módulo tem raios solares incidindo sobre sua superfície, com maior incidência ao meio-dia solar, quando o módulo fica exatamente de frente para o sol, ou seja, com ângulo azimutal zero. A forma incorreta em que a orientação azimutal do módulo solar está representada na Figura 2.15

Figura 2.14 - Orientação azimutal correta do módulo solar, com sua face voltada para o norte geográfico.



Fonte – Villalva, (2015, p. 51-52)

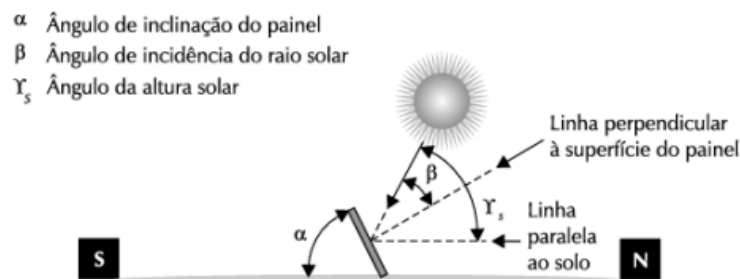
Figura 2.15 - Módulo solar com orientação azimutal incorreta



Fonte - adaptado de Villalva, (2015, p. 51-52)

Os raios solares incidem sobre a superfície do módulo com o ângulo de inclinação β , definido em relação à reta perpendicular do módulo. Em cada dia do ano, conforme a altura solar r_s varia, o módulo recebe os raios solares com uma inclinação β diferente. O melhor aproveitamento da energia solar ocorre quando os raios incidem perpendicularmente ao módulo, com ângulo $\beta = 0$. Ou seja, significa que para máxima captação de energia solar a inclinação do módulo deve ser ajustada diariamente para adequar-se ao valor da altura solar, conforme Figura 2.16.

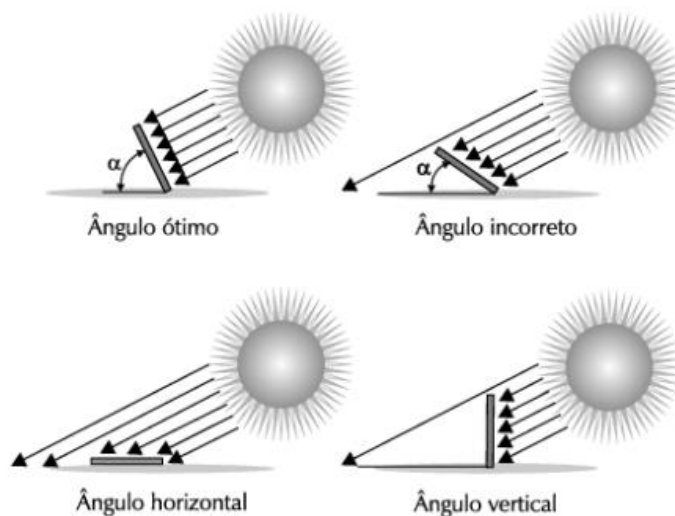
Figura 2.16 - Ângulo de inclinação do módulo e ângulo de incidência dos raios solares



Fonte - Villalva, (2015, p. 57)

Em demais casos, Figura 2.17, os módulos são instalados nas posições horizontal e vertical. A inclinação horizontal privilegia a produção de energia no verão, enquanto a inclinação vertical privilegia no inverno. Não existe um consenso geral sobre o melhor método de escolher o ângulo de inclinação para a instalação de um módulo solar. A recomendação é não se instalar módulos com ângulos de inclinação inferiores a 10° para evitar o acúmulo de poeira sobre as placas, (VILLALVA, 2015).

Figura 2.17 - Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia



Fonte - Villalva, (2015, p. 58)

3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Em ambos os casos, podem operar a partir apenas da fonte fotovoltaica ou combinados com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A utilização de cada uma dessas opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos. Cada um deles pode ser de complexidade variável, dependendo da aplicação em questão e das restrições específicas de cada projeto, (PINHO; GALDINO, 2014).

Sistemas autônomos ou *off-Grid* são muito populares, especialmente em países em desenvolvimento, devido à ausência de uma rede elétrica confiável ou interrupções prolongadas de eletricidade. Esses sistemas também são amplamente utilizados em áreas remotas. Eles têm múltiplas aplicações, incluindo, mas não se limitando a, aplicações residenciais ou de serviços (centros de saúde, escola, condomínio), sistemas de iluminação pública, equipamentos de rodoviária, bombeamento de água, locais de telecomunicações, campos de refugiados, dispositivos de controle de tráfego (semáforos), (JIEB; HOSSAIN, 2021).

A tecnologia solar oferece uma excelente solução alternativa para esses casos devido aos altos custos de expansão da rede elétrica. Essa tecnologia é mais eficaz do que construir novas subestações e linhas de transmissão. Os sistemas fotovoltaicos *off-Grid* são mais viáveis, pois o diesel ou outros derivados de petróleo para operar pequenos geradores podem ser financeira e ambientalmente caros, (JIEB; HOSSAIN, 2021).

Embora os módulos fotovoltaicos não produzam energia à noite, os sistemas fotovoltaicos *off-Grid* podem garantir energia confiável durante todo o ano devido aos sistemas de armazenamento de energia (geralmente baterias) que são dimensionados com base na importância das cargas. Por exemplo, sites de telecomunicações têm dispositivos muito críticos para receber e enviar sinais em áreas remotas. Esses dispositivos devem ser alimentados com energia confiável, independente de quaisquer condições atmosféricas, como neve, nuvens ou tempestades. Portanto, este tipo de sistema fotovoltaico e armazenamento de energia é superdimensionado e substituído com mais frequência do que qualquer outra aplicação para garantir um fornecimento contínuo e confiável, (JIEB; HOSSAIN, 2021).

O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica opera em paralelo com a rede de eletricidade. Diferentemente do sistema autônomo, o sistema conectado é empregado em locais já atendidos por energia elétrica. O objetivo do sistema fotovoltaico conectado à rede é gerar

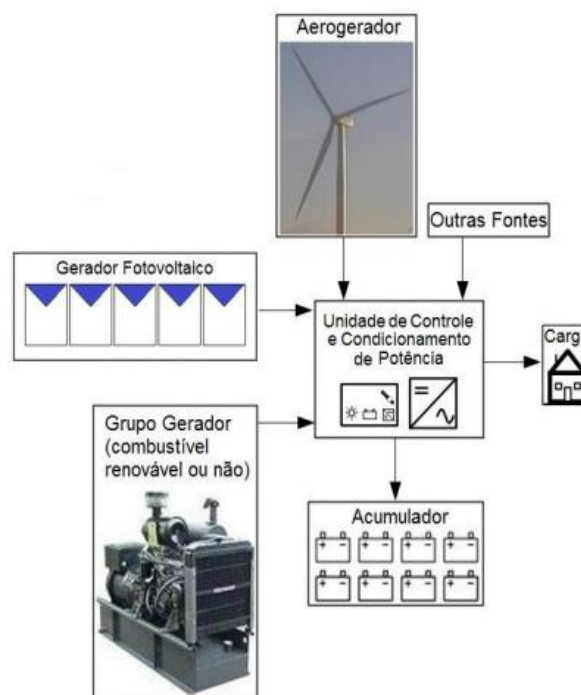
eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou eliminar o consumo da rede pública, ou mesmo gerar excedente de energia, (VILLALVA, 2015).

A energia injetada na rede por esses sistemas é convertida em créditos por meio do sistema de compensação de energia elétrica. O sistema de compensação de energia será considerado na Seção 3.2.

Um sistema fotovoltaico ligado à rede geralmente não contém uma bateria de backup, pois toda a energia excedente é enviada para a rede elétrica. Um sistema fotovoltaico híbrido, Figura 3.1, é um sistema ligado à rede, mas contém um outro sistema de armazenamento de energia da bateria (BESS - *Battery Energy Storage System*) para armazenar a energia excedente. (JIEB; HOSSAIN, 2021)

Muitas vezes apelidados de “sistemas de armazenamento solar plus”, estes sistemas contêm três fontes de energia para qualquer carga: a rede elétrica, os painéis solares fotovoltaicos e o banco de baterias. No sistema em questão, a energia solar é priorizada como fonte de energia, seguida da rede elétrica e do BESS. Se a energia solar não estiver disponível, a rede elétrica, ou o BESS, são ponderados em termos de custos. Se o uso da energia da rede for mais barato, a energia é consumida da rede e se a energia da rede for cara (por exemplo, nos horários de pico), o BESS será usado como fonte de energia. (JIEB; HOSSAIN, 2021)

Figura 3.1 - Esboço de sistema híbrido



3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída de energia elétrica é caracterizada pelo uso de geradores descentralizados, instalados próximo aos locais de consumo. O modelo distribuído opõe-se ao modo tradicional de geração de energia elétrica que é baseado em grandes usinas construídas em locais distantes dos consumidores, (VILLALVA, 2015).

A modalidade de geração distribuída inclui parques de geração construídos em áreas abertas e também pequenos geradores conectados ao sistema elétrico e instalados dentro de zonas urbanas densamente povoadas. Esses geradores podem ser instalados em residências e telhados de empresas, escolas e centros comerciais, constituindo micro usinas e miniusinas de geração de eletricidade conectadas ao sistema elétrico nacional, (VILLALVA, 2015).

Essas pequenas usinas são conectadas diretamente às redes de distribuição de baixa tensão, sem a necessidade de instalação de transformadores ou linhas de distribuição de eletricidade. Além de fornecerem energia para o consumo local, por estarem conectadas ao sistema elétrico, também contribuem com a geração de eletricidade de todo o país, (VILLALVA, 2015).

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, ou cogeração, qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se do micro e da minigeração distribuidoras de energia elétrica, inovações que aliam economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade, (ANEEL, 2022).

Com o objetivo de reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração; compatibilizar o sistema de compensação de energia elétrica com as condições gerais de fornecimento de energia (Resolução Normativa nº 1.000/2021) e aumentar o público-alvo; e melhorar as informações na fatura, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015 revisando a Resolução Normativa nº 482/2012, (ANEEL, 2022).

É permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (kW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras, (ANEEL, 2022).

Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. De acordo com as regras, o prazo de validade dos créditos é de 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos foi denominado “autoconsumo remoto”, (ANEEL, 2022).

3.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMERCIAIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

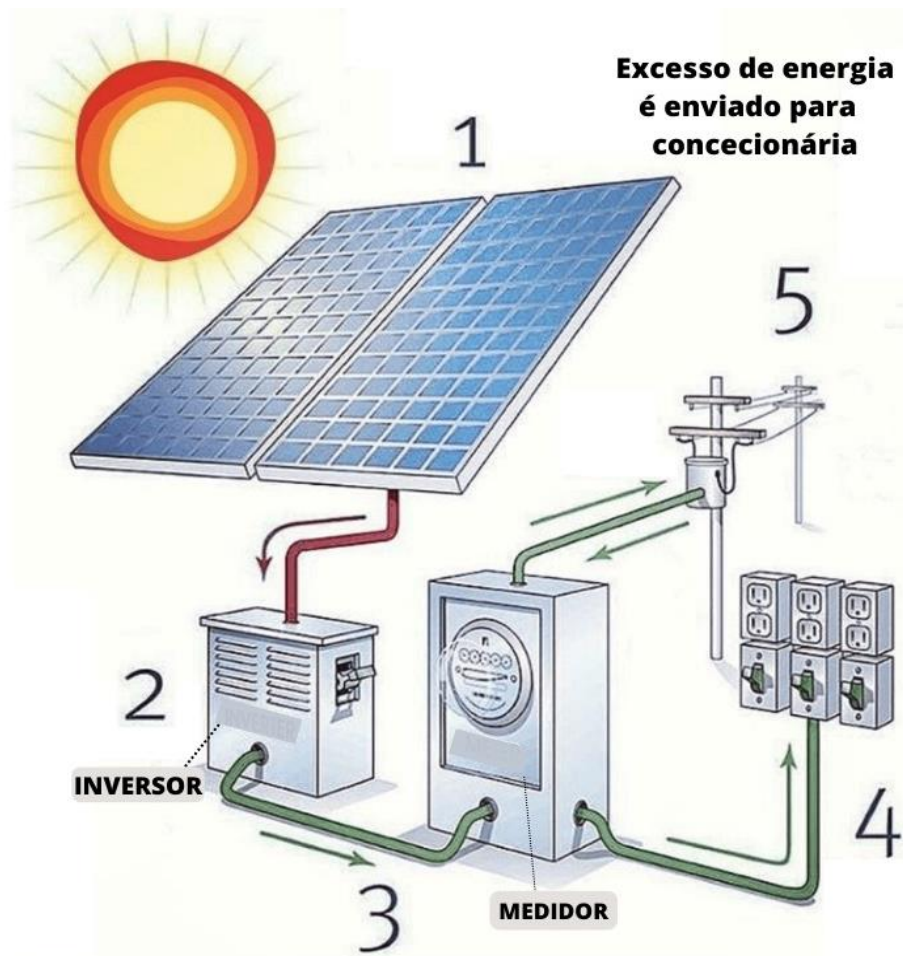
Os sistemas fotovoltaicos interconectados (PV) tornaram-se a aplicação mais econômica dos sistemas de energia renovável. Conectado à rede e interativo com a concessionária são outros termos usados para descrever os sistemas de energia renovável interconectados à rede elétrica da concessionária. Antes dos incentivos e da produção em massa, as aplicações fotovoltaicas eram limitadas a instalações remotas onde a energia elétrica não estava disponível e a carga era pequena. Os sistemas fotovoltaicos também foram usados para aplicações de satélite e espaciais onde o custo não era um fator decisivo. Subsídios na forma de descontos de serviços públicos e créditos fiscais de investimento reduziram os custos e forneceram incentivos ao investimento para aplicações residenciais e comerciais de pequeno porte. Problemas técnicos com muitos sistemas de geração distribuída conectados à rede elétrica foram resolvidos ou mitigados. O aumento da demanda reduziu o custo dos módulos fotovoltaicos, e os custos dos equipamentos para o equilíbrio do sistema também caíram devido à fabricação ampliada, (PRICE, 2018).

A confiabilidade do sistema aumentou significativamente nos últimos 10 anos. Nas décadas de 1970 e 1980, os sistemas solar e eólico tinham a fama de não serem confiáveis. Os inversores interconectados à rede elétrica falhavam com frequência, causavam distorção harmônica e criavam um fator de potência ruim. Era verdade que os componentes dos primeiros inversores não eram tão confiáveis quanto os dispositivos semicondutores de hoje, (PRICE, 2018).

Os primeiros designs também não filtravam a distorção adequadamente. Hoje, os fabricantes de inversores oferecem garantias de 10 anos, 97% de eficiência, fatores de potência de 99% e menos de 4% de distorção harmônica total. A eficiência fotovoltaica aumentou para cerca de 14% para módulos policristalinos e 20% para módulos de alto desempenho monocristalino e dupla face. As garantias de desempenho do módulo fotovoltaico agora são fornecidas por 20 a 25 anos, (PRICE, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, Figura 3.2, são projetados para fornecer potência fotovoltaica máxima diretamente na rede elétrica da concessionária. Alguns sistemas incorporam bateria de reserva, além da interconexão com a concessionária, mas os sistemas híbridos não são tão econômicos. Os sistemas de armazenamento ainda são um componente caro e requerem manutenção regular. A beleza de um sistema simples conectado à rede é o aspecto livre de manutenção, sem partes móveis ou problemas eletroquímicos. A rede elétrica serve como meio de armazenamento, (PRICE, 2018).

Figura 3.2 - Esboço de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte - adaptado de Solls, (2018, <https://solls.com.br/energia-solar/>)

De acordo com Pinho; Galdino, 2014 os componentes básicos de um sistema fotovoltaico são:

1. Módulos Fotovoltaicos: um módulo fotovoltaico é construído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Normalmente as células são conectadas em série para produzir tensões maiores, (VILLALVA, 2015).

Os raios solares incidentes sobre as placas são diretamente convertidos em energia elétrica pelo conjunto de células fotovoltaicas.

2. Inversor Fotovoltaico: O inversor é projetado para converter tensão e corrente CC em tensão e corrente CA que está em sincronismo com a frequência, tensão e corrente da rede elétrica. Existem muitos tipos e designs de inversores usados para sistemas de energia fotovoltaica, (PRICE, 2018).

3. Energia Solar Distribuída: a eletricidade gerada pelo sistema é distribuída para o imóvel através do quadro geral, sendo utilizada durante o dia. Nesse período é gerada energia com excedente, que é contabilizada pelo medidor da concessionária e compensada à noite, quando a geração é menor. Ao final do mês, a concessionária calcula o valor da fatura de energia através da diferença entre energia gerada e energia consumida.

4. Energia Excedente: Nos meses em que a incidência de radiação solar for maior, e a geração superior ao consumo, conseqüentemente serão gerados créditos de energia. Tais créditos podem ser utilizados naqueles meses em que a ocorrência de radiação solar for inferior à média, para que no fim de um ano do sistema operando, o usuário não tenha mais custos com energia. Os créditos de energia elétrica gerados por mês têm um prazo para serem usados em até 5 anos após o mês de geração. Há modalidades em que o consumidor pode dividir a energia gerada para outras unidades consumidoras.

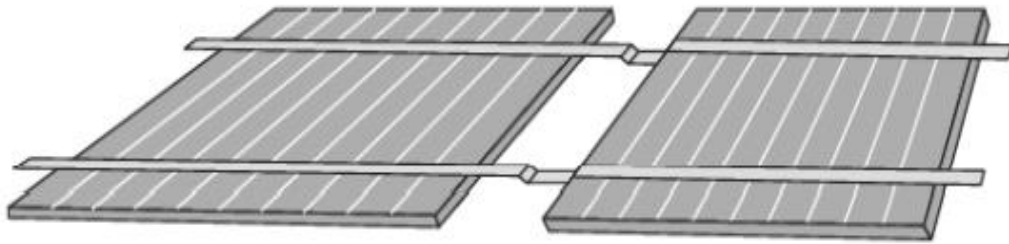
3.4 COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

3.4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A célula fotovoltaica é o dispositivo fotovoltaico básico. Uma célula sozinha produz pouca eletricidade, então várias células são agrupadas para produzir painéis, placas ou módulos fotovoltaicos. Os termos módulo, placa, ou painel, tem o mesmo significado e são usados indistintamente na literatura para descrever um conjunto empacotado de células fotovoltaicas disponíveis comercialmente, (VILLALVA, 2015).

Um módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Normalmente as células são conectadas em série para produzir tensões maiores. Está ilustrada na Figura 3.3 o modo de conectar células em série, os terminais superiores de uma célula são ligados ao terminal inferior da outra e assim sucessivamente, até formar um conjunto com a tensão de saída desejada. (VILLALVA, 2015)

Figura 3.3 - Conexões elétricas em série das células fotovoltaicas de um módulo

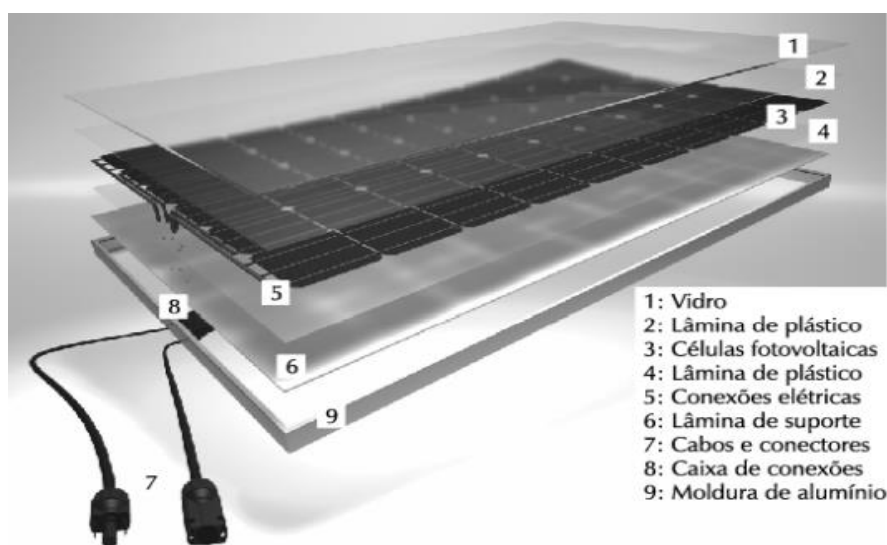


Fonte - Villalva, (2015, p. 74)

Em qualquer instalação solar fotovoltaica, o módulo solar fotovoltaico é a célula básica do sistema gerador. A quantidade de módulos conectados em série irá determinar a tensão de operação do sistema em CC. A corrente do gerador solar é definida pela conexão em paralelo de painéis individuais ou de *strings* (conjunto de módulos conectados em série). A potência instalada, normalmente especificada em CC, é dada pela soma da potência nominal dos módulos individuais, (RÜTHER, 2004).

A composição de um módulo solar fotovoltaico típico é mostrada na Figura 3.4. As células e suas conexões elétricas são prensadas dentro de lâminas plásticas. O módulo é recoberto por uma lâmina de vidro e por último recebe uma moldura de alumínio. Na parte traseira o módulo recebe uma caixa de conexões elétricas, a qual são conectados os cabos elétricos que normalmente são fornecidos junto com o módulo. Os cabos possuem conectores padronizados, que permitem a rápida conexão de módulos em série, (VILLALVA, 2015).

Figura 3.4 - Componentes de um módulo fotovoltaico

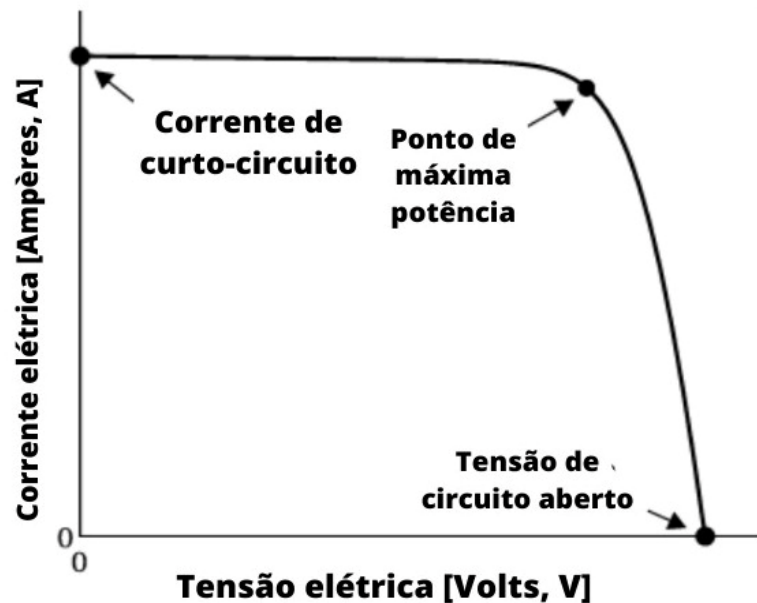


Fonte - Villalva, (2015, p. 76)

Um módulo fotovoltaico não se comporta como uma fonte elétrica convencional nem apresenta uma tensão de saída constante nos seus terminais. A tensão elétrica depende da sua corrente e vice-versa. O ponto de operação do módulo fotovoltaico, ou seja, o valor da tensão e da corrente nos seus terminais, depende do que está conectado aos seus terminais. Se conectarmos um aparelho que demanda muita corrente, a tensão de saída do módulo tenderá a cair. Por outro lado, se conectarmos uma carga que demanda pouca corrente, a tensão do módulo será mais elevada, tendendo a tensão de circuito aberto, (VILLALVA, 2015).

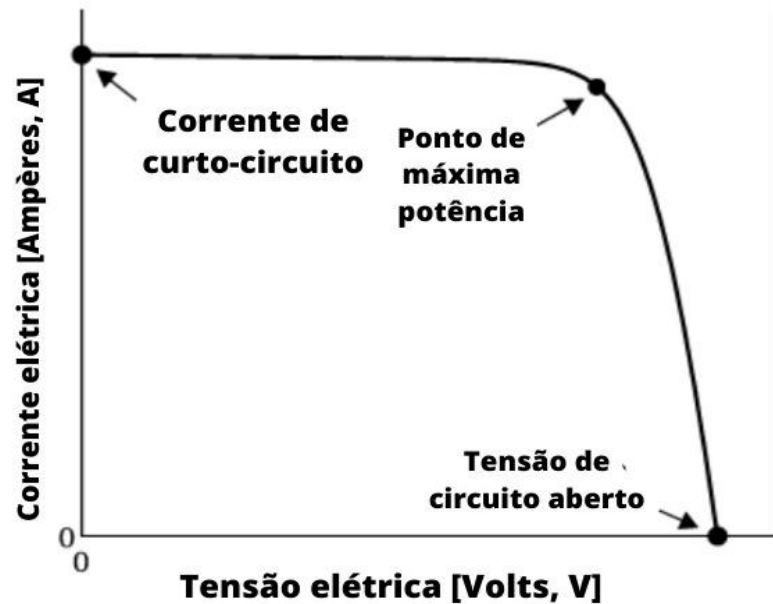
A relação entre a tensão e a corrente de saída de um módulo fotovoltaico é mostrada na curva I - V da Figura 3.5. Todos os módulos fotovoltaicos possuem uma característica semelhante. Para cada curva I - V existe uma curva P - V correspondente, como a da Figura 3.6 que mostra como a potência do módulo varia em função de sua tensão. Observando a Figura 3.5, nota-se a presença de três pontos de destaque na curva I - V: ponto de corrente de curto-circuito, ponto de máxima potência e ponto de tensão de circuito aberto, (VILLALVA, 2015).

Figura 3.5 - Curva característica I – V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico



Fonte – adaptado de Villalva, (2015, p. 77)

Figura 3.6 - Curva característica P – V de potência e tensão de um módulo fotovoltaico



Fonte - adaptado de Villalva, (2015, p. 77)

A corrente de curto-circuito é aquela que acontece quando colocamos em curto-circuito os terminais do módulo. Nesta situação não existe tensão elétrica e a corrente do módulo alcança o seu valor máximo. A tensão de circuito aberto é aquela que medimos na saída do módulo quantos seus terminais estão abertos, ou seja, quando não existe nada ligado a ele. Esta é a máxima tensão que o módulo pode fornecer. (VILLALVA, 2015)

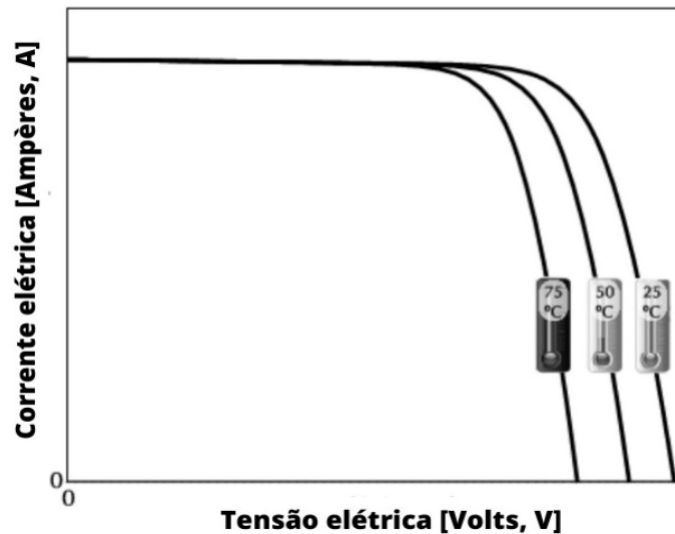
Existe um único ponto nas curvas I - V e P - V que corresponde à situação na qual o módulo fornece a potência máxima. Idealmente, deve-se operar o módulo neste ponto, pois nessa situação sua produção de energia é maior. (VILLALVA, 2015)

De maneira semelhante ao que ocorre com as células fotovoltaicas, o desempenho dos módulos fotovoltaicos é fundamentalmente influenciado pela irradiância solar e pela temperatura das células. (PINHO; GALDINO, 2014)

A corrente elétrica que o módulo fotovoltaico pode fornecer depende diretamente da intensidade da radiação solar que incide sobre suas células. A corrente máxima que o módulo pode fornecer varia proporcionalmente à irradiância. Com pouca luz, a corrente fornecida pelo módulo é muito pequena e sua capacidade de gerar energia é severamente reduzida. (VILLALVA, 2015)

A corrente fornecida pelo módulo não se altera com a temperatura. Uma consequência da variação sobre o módulo fotovoltaico é que, quando a temperatura aumenta, a potência fornecida pelo módulo diminui, pois, a potência é o produto da tensão e da corrente do módulo. Em temperaturas mais baixas, as tensões são maiores e em temperaturas mais altas as tensões são menores, conforme é mostrado na Figura 3.7. (VILLALVA, 2015)

Figura 3.7 - Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico



Fonte - adaptado de Villalva, (2015, p. 80)

Outro fator que afeta o desempenho dos módulos fotovoltaicos é o efeito do sombreamento. Este efeito acontece quando uma ou mais células recebem pouca ou nenhuma luz, impedindo a passagem da corrente elétrica das outras células. O mesmo efeito acontece em módulos conectados em série. Se um dos módulos de um conjunto estiver recebendo menos luz do que os demais, a corrente elétrica de todo o conjunto é reduzida e, conseqüentemente, o sistema produz menos energia. (VILLALVA, 2015)

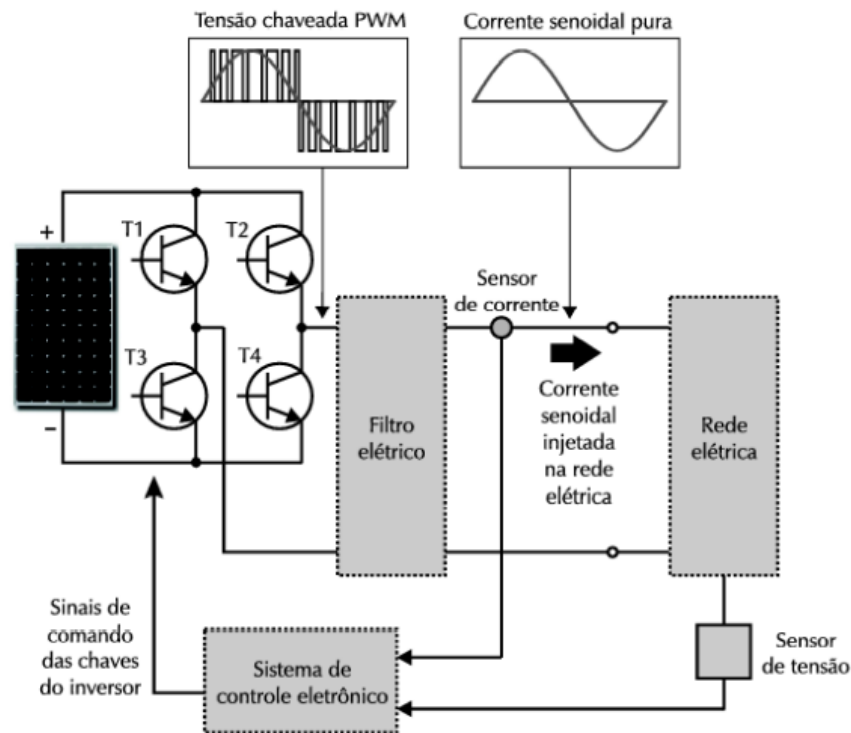
3.4.2 CARACTERÍSTICAS DOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS

A parte mais importante de qualquer sistema de energia renovável de corrente contínua é o inversor. Este dispositivo é conectado à rede sendo projetado para converter tensão e corrente CC em tensão e corrente CA que está em sincronismo com a frequência, tensão e corrente da rede elétrica. Um inversor também é chamado de inversor comutado por linha, porque é projetado para sincronizar com a rede. (PRICE, 2018)

Na ausência ou falha no fornecimento de eletricidade da concessionária de energia, o inversor para a conexão à rede desliga-se por duas razões: não foi projetado para operar sem a

rede elétrica e não deve, em hipótese alguma, continuar conectado a instalação elétrica, para a segurança de equipamentos que estão ligados à mesma rede ou de pessoas que manuseiam a instalação elétrica durante a manutenção. É mostrado na Figura 3.8 ilustra o funcionamento de um inversor CC-CA para a conexão à rede elétrica, (VILLALVA, 2015).

Figura 3.8 - Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica.



Fonte - Villalva, (2015, p. 159)

De acordo com a Figura 3.8, a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos passa por quatro dispositivos chaveados que recebem a energia em corrente contínua (onda quadrada). E ao passar por tais dispositivos, modula-se o sinal por Largura de Pulso (em inglês – PWM, *Pulse Width Modulation*). A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora, (PINHO; GALDINO, 2014).

Entre as principais características técnicas do inversor, destacam-se aquelas referentes aos seus parâmetros elétricos, importantes durante o processo de dimensionamento e seleção do inversor.

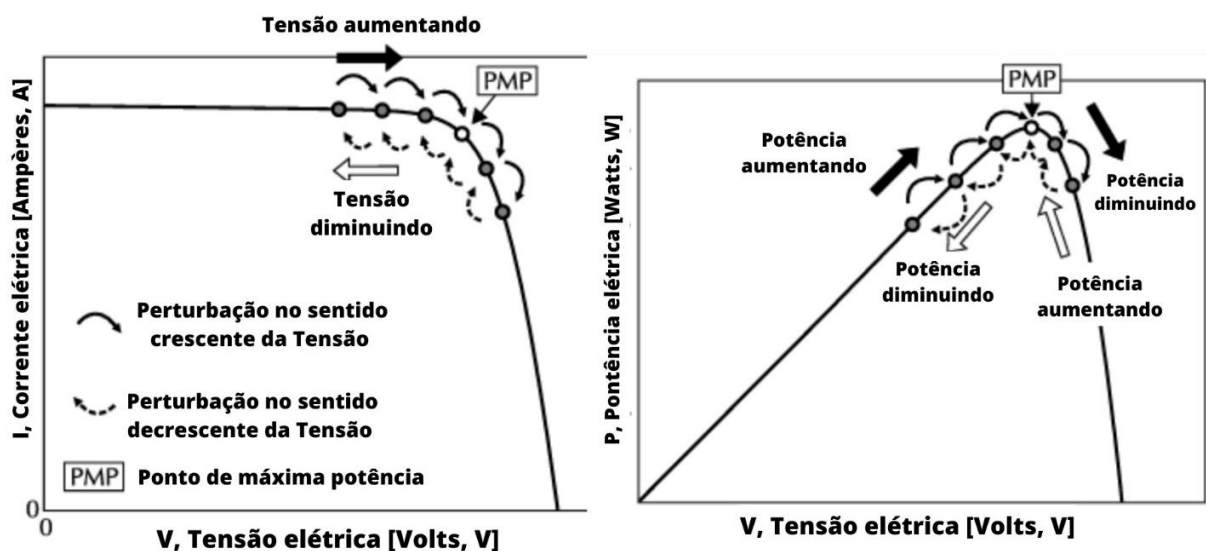
Os fabricantes divulgam as folhas de dados sobre os diversos modelos de seus inversores. O conteúdo e terminologia podem variar ligeiramente de acordo com o fabricante, mas de maneira geral, entre os dados mais relevantes, pode-se obter: (i) Potência nominal – P_N (W); (ii) Máxima potência na entrada CC – $P_{CCmáx}$ (W); (iii) Máxima tensão CC – $V_{CCmáx}$ (V);

(iv) Máxima corrente CC – $I_{CCmáx}$ (A); (v) faixa de tensão do seguidor do MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) $V_{MPPTmáx}$ (V) e $V_{MPPTmin}$ (V); (vi) Potência nominal CA – P_{CA} (W); (vii) Máxima potência na saída CA – $P_{CAmáx}$ (W); (viii) Máxima corrente na saída CA – $I_{CAmáx}$ (A); (xi) Frequência nominal – F_N (Hz); (x) Quantidade de entradas MPPT; (xi) Tipo de conexão; (xii) Eficiência máxima (%).

O MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), ou rastreamento do ponto de máxima potência, é um recurso presente em todos os inversores para a conexão de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. O sistema de MPPT tem o objetivo de garantir que os módulos operem instantaneamente em seu ponto de máxima potência, qualquer que seja ele, independentemente das condições de operação, (VILLALVA, 2015).

Devido ao fato das condições de operação dos módulos fotovoltaicos (temperatura e radiação solar) mudam aleatoriamente durante o funcionamento do inversor, a estratégia de MPPT é necessária nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede para maximizar constantemente a produção de energia, proporcionando o maior rendimento possível do sistema. Todos os inversores comerciais utilizam alguma variação do método de MPPT da perturbação e observação, conforme ilustrado na Figura 3.9, (VILLALVA, 2015).

Figura 3.9 - Funcionamento do sistema de MPPT com o algoritmo de perturbação e observação



Fonte – adaptado de Villalva, (2015, p. 167)

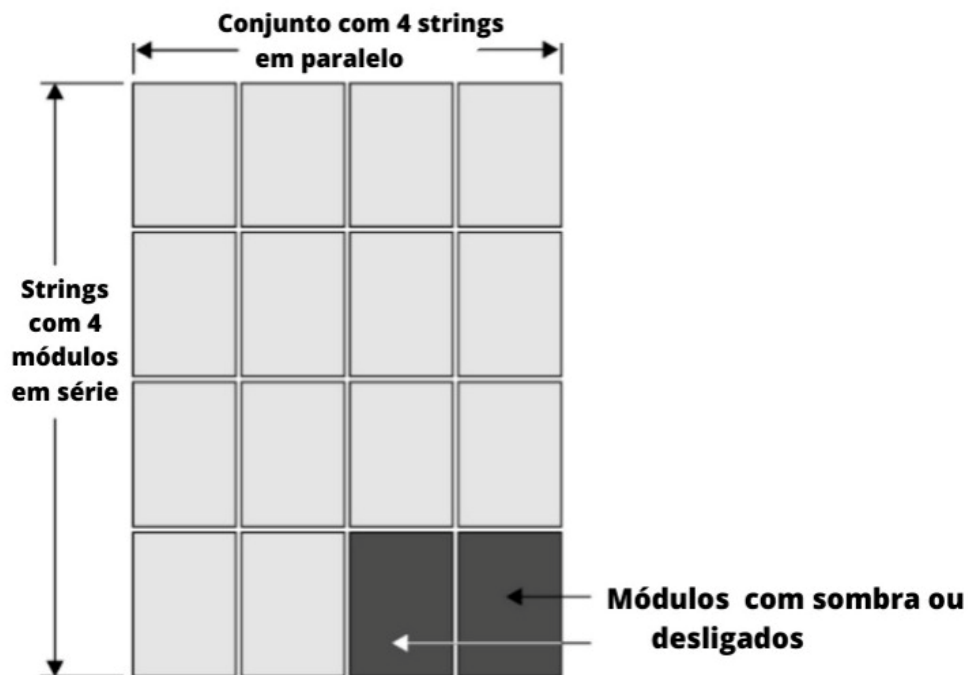
É observado na Figura 3.9 que o inversor aumenta a tensão de saída dos módulos. Com uma certa frequência, o inversor provoca uma mudança de tensão no sentido crescente, observando o aumento da potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos. Como o objetivo é

maximizar a potência, o inversor continua aumentando a tensão nesse sentido, pois nota-se que a potência aumenta, passo-a-passo, após cada perturbação.

Em um dado instante, quando o ponto de máxima potência do módulo é ultrapassado, a perturbação proporciona o efeito contrário da redução da potência. Neste momento, o algoritmo do inversor interrompe a tensão no sentido crescente devido à detecção de perturbação nesta e inicia a perturbação no sentido contrário, sempre observando o que acontece com a potência. Quando está nas proximidades do ponto de máxima potência, o algoritmo faz o inversor perturbar a tensão dos módulos fotovoltaicos, fazendo o ponto de operação se deslocar para cima e para abaixo e rodeia o joelho da curva $I \times V$ e o pico da curva $P \times V$, como é visto na Figura 3.9.

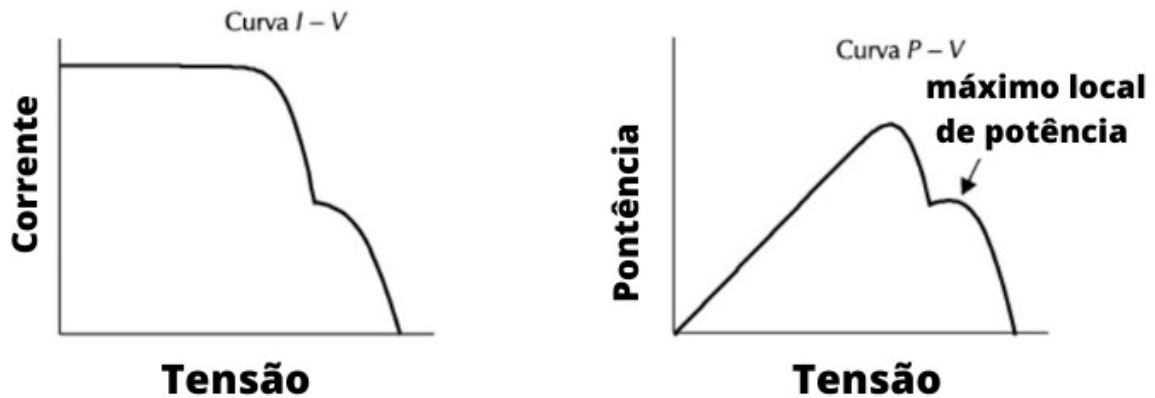
Uma situação de sombreamento parcial ao qual é submetido um conjunto de módulos fotovoltaicos 4×4 , com quatro módulos em série por *string*, e quatro *strings* paralelos pode ser destacada na Figura 3.10. É identificado na curva de potência, ilustrada na Figura 3.11, a presença de dois pontos de máximos, um global e um local. O algoritmo de MPPT não consegue distinguir esses dois pontos e pode fazer o sistema operar no máximo local, o que não corresponde à máxima potência que poderia ser extraída do conjunto com esta condição irregular de radiação solar.

Figura 3.10 - Conjunto de módulos fotovoltaicos com sombreamento parcial



Fonte – Adaptado de Villalva, (2015, p. 168)

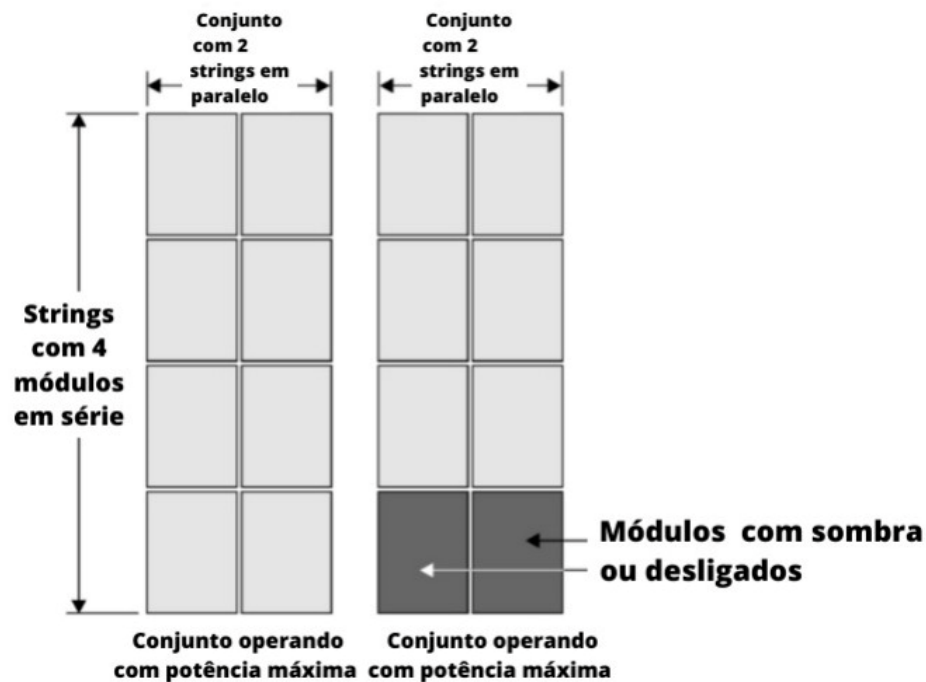
Figura 3.11 - Curva de potência conjunto de módulos fotovoltaicos com sombreamento parcial



Fonte - Adaptado de Villalva, (2015, p. 168)

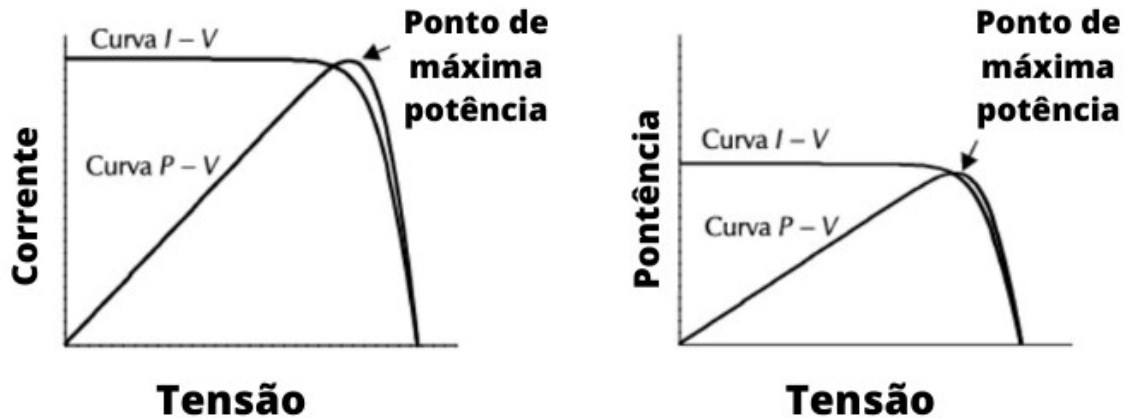
Uma estratégia para contornar o fenômeno do sombreamento parcial é utilizar mais de um rastreador MPPT, fazendo com que cada grupo de módulos solares seja conectado ao seu próprio rastreador. Desta forma, se um dos conjuntos estiver em condições inferiores de iluminação, os outros conjuntos não são afetados, como é ilustrado na Figura 3.12. Como é identificado na curva de potência, ilustrada na Figura 3.13

Figura 3.12 - Módulos fotovoltaicos em situação de sombreamento parcial com sistema de MPPT independentes



Fonte - Adaptado de Villalva, (2015, p. 169)

Figura 3.13 - Curva de potência conjunto módulos fotovoltaicos em situação de sombreamento parcial com sistema de MPPT independentes.



Fonte - Adaptado de Villalva, (2015, p. 169)

Uma função necessária e obrigatória em inversores usados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica é o recurso de detecção de ilhamento ou anti-ilhamento (*anti-islanding*). Tal procedimento é necessário para garantir a segurança de pessoas, equipamentos e instalações nas situações de interrupção do fornecimento de energia da rede elétrica pública. Na ocorrência de falhas da rede elétrica, ou desligamento intencional programado, o sistema de anti-ilhamento deve ser capaz de detectar rapidamente, com o uso de técnicas sofisticadas, a ausência de alimentação da rede elétrica e automaticamente desligar, ou desconectar, o inversor.

3.4.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

O correto dimensionamento e a adequada utilização de dispositivos de proteção contribuem para a minimização ou até mesmo a eliminação de falhas. O avanço tecnológico dos componentes de sistemas fotovoltaicos faz com que todos eles apresentem, além de robustez, dispositivos de proteção integrados. É o caso, por exemplo, dos dispositivos anti-ilhamento. Além dos dispositivos de proteção integrados aos equipamentos, a instalação de outros dispositivos de proteção externos deve ser prevista, como disjuntores, Dispositivos de Proteção Contra Surtos (DPS), sistemas de aterramento e Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), (PINHO; GALDINO, 2014).

Especificamente no caso de sistemas *on-grid*, a regulamentação ANEEL (Aneel, 2012c) exige, como padrão técnico, a instalação, após o medidor, de uma chave seccionadora sob carga, denominada de Dispositivo De Seccionamento Visível (DSV), utilizada para garantir a

desconexão da geração fotovoltaica durante procedimentos de manutenção de rede. (PINHO; GALDINO, 2014)

4 LEVANTAMENTO DE DADOS

4.1 AVALIAÇÃO TÉCNICA E LEVANTAMENTO DE DADOS

Para executar o dimensionamento do sistema fotovoltaico, foi selecionado o prédio comercial localizado na cidade de Tucuruí – PA, a Padaria Mega Pão. Para o dimensionamento deste sistema foi preciso realizar uma coleta precisa e cuidadosa dos dados e dos fatores que influem na geração, como as condições do local escolhido, o estado do telhado e se será necessário alterações em sua estrutura, e o possível potencial para a geração fotovoltaica. Para tal, é muito importante a descrição completa do local escolhido, assim como seus parâmetros de exposição, ângulos e a ocorrência de possível sombreamento e com base nisso, executar o projeto e a instalação do sistema de forma eficaz e otimizada.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DA INSTALAÇÃO

Com relação a caracterização do local onde serão instalados os módulos fotovoltaicos, o inversor fotovoltaico e os outros equipamentos essenciais para conversão e conexão com a rede elétrica, serão considerados os dados demográficos, as exposições disponíveis, o ângulo de inclinação do telhado, o ângulo de azimute, a área disponível e os obstáculos de sombreamento.

4.2.1 IDENTIFICAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

O edifício comercial na qual foi implantado o projeto está localizado na cidade de Tucuruí, mesorregião do sudeste do estado do Pará. A localização exata do edifício comercial pode ser vista na Tabela 4.1 e na Figura 4.1, a área possui as seguintes características: imóvel comercial, situado em perímetro urbano, contornado por imóveis de latitudes semelhantes, as ruas próximas do imóvel são asfaltadas e conta com pouco sombreamento dependendo da posição do sol durante o ano, configuração que maximiza a geração pelos módulos fotovoltaicos.

Tabela 4.1 - Dados do Estabelecimento

DADOS DA LOCALIZAÇÃO	
Nome	Panificadora Mega Pão
Cidade	Tucuruí - PA
Endereço	Av Veridiano Cardoso, N° 898 B, Quadra A, LT 18 – América Pub Conveniência.
CEP	68455-001
Latitude	3°46'40.44"S
Longitude	49°40'33.66"O
Altitude	82 m
Fonte dados climáticos	ATLAS BRASILEIRO

Fonte - elaborada pela autora

Figura 4.1 - Localização do estabelecimento através do Google Earth

Fonte - elaborada pela autora

4.2.2 EXPOSIÇÕES DISPONÍVEIS

O estabelecimento comercial selecionado possui três vertentes de telhado e direções e inclinações parecidas, posições 3, 4 e 5, assim como o prédio vizinho, posições 1 e 2. Ambas não possuem área e estrutura suficientes para a instalação dos módulos e possuem sombreamento em determinadas horas do dia. as disposições disponíveis do local, são mostradas na Figura 4.2, a posição 5 do telhado não será levada em consideração, o motivo será esclarecido no tópico 4.2.6.

Figura 4.2 - Exposições disponíveis no estabelecimento



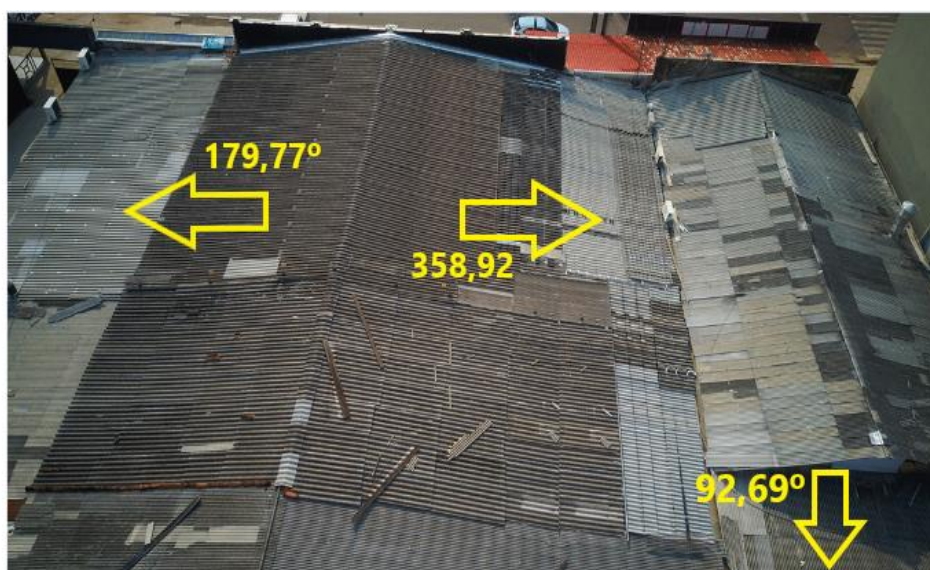
Fonte - elaborada pela autora

4.2.3 AZIMUTE DAS EXPOSIÇÕES

Como visto anteriormente, o ângulo azimutal é o ângulo de direção dos raios solares com relação ao norte geográfico e no decorrer do dia tem diferentes ângulos azimutais desde o nascer do sol até o poente.

O ângulo azimutal nos mostra qual é a melhor posição dos painéis solares no local, a serem instalados sob o telhado, para melhor eficiência de geração de energia. O telhado do local escolhido possui três águas, e cada uma delas terá seu ângulo azimutal. Os ângulos de cada exposição, são apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Ângulo azimutal das exposições disponíveis dos imóveis comerciais



Fonte - elaborada pela autora

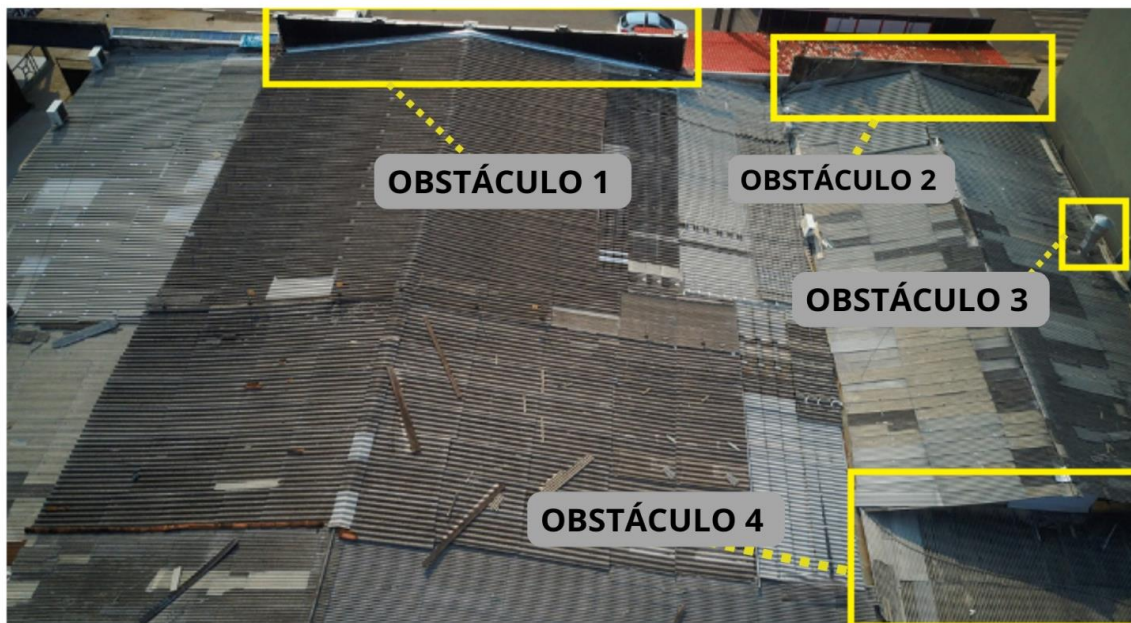
4.2.4 INCLINAÇÃO DAS EXPOSIÇÕES

As disposições dos módulos fotovoltaicos em relação ao sol são muito importantes para a geração de energia, pois aproveitar a direção correta dos módulos pode reduzir custos do projeto, tempo na instalação e elevar a eficiência dos módulos. A inclinação das águas dos telhados que serão utilizados na montagem é de 10° cada, que é satisfatório para equilibrar as perdas e permanecer com um percentual de perda em relação à melhor situação menor de 3%.

4.2.5 OBSTÁCULOS E SOMBREAMENTO

Qualquer obstrução que faça sombra pode afetar o sistema, no decorrer da visita técnica foi observado possíveis obstáculos de sombreamento que viessem comprometer a produção de energia pelos módulos. Os obstáculos notórios no telhado cedido para instalação dos módulos, são detalhados na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Possíveis obstáculos de sombreamento



Fonte - elaborada pela autora

4.2.6 ÁREA DISPONÍVEL

O local apresenta algumas áreas de sombreamento, como podemos ver no tópico anterior por conta desta situação, também pelo fato do espaço e estrutura do telhado da padaria não suportar os módulos fotovoltaicos, algumas posições dos telhados foram classificadas como indisponíveis para a instalação dos mesmos. Estes motivos foram cruciais para os proprietários do imóvel alugarem o telhado do empreendimento vizinho. As posições do telhado que não são convenientes à instalação, são mostradas na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Áreas indisponíveis



Fonte - elaborada pela autora

4.2.7 DADOS DE IRRADIAÇÃO DO LOCAL

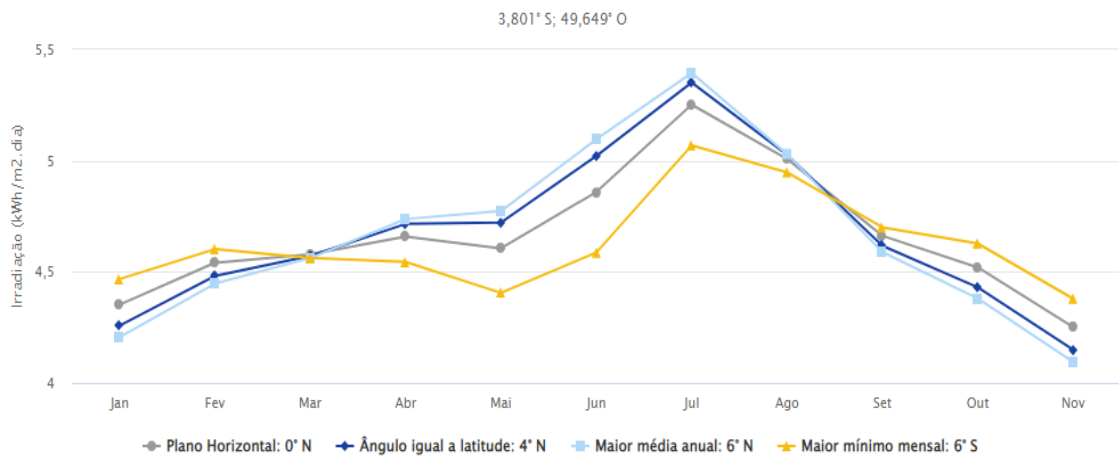
Para a instalação de um sistema fotovoltaico é fundamental saber qual é a média anual de radiação solar, dispomos de sites como o SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) e o CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) que fornecem essas informações gratuitamente.

Para dimensionar o sistema fotovoltaico foram utilizados os dados da CRESESB e para as coordenadas do local de instalação, obtivemos os seguintes resultados de irradiação solar mensal e anual do local escolhido ilustrados na Tabela 4.2 e na Figura 4.6.

Tabela 3.2 - Irradiação Solar da cidade de Tucuruí - PA

Ângulo	Inclinação	Irradiação Solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	4,35	4,54	4,58	4,66	4,61	4,86	4,96	5,25	5,01	4,66	4,52	4,25	4,69
Ângulo igual a Latitude	4° N	4,26	4,48	4,57	4,72	4,72	5,02	5,11	5,35	5,03	4,62	4,43	4,15	4,70
Maior média Anual	6° N	4,21	4,45	4,56	4,74	4,77	5,10	5,18	5,39	5,03	4,59	4,38	4,10	4,71
Maior mínimo Mensal	6° S	4,47	4,60	4,56	4,55	4,41	4,59	4,70	5,07	4,95	4,70	4,63	4,38	4,63

Fonte - CRESESB, (2022)

Figura 4.6 - Irradiação solar da cidade de Tucuruí - PA

Fonte - CRESESB, (2022)

4.2.6 LEVANTAMENTO DO CONSUMO NA RESIDÊNCIA

A fim de efetuar um dimensionamento apropriado do sistema fotovoltaico é indispensável conhecer o consumo do estabelecimento comercial, que se pretende abastecer. O levantamento do consumo de energia elétrica do local desde o primeiro mês de vínculo com a concessionária até o último mês antes do sistema fotovoltaico entrar em funcionamento, pode ser visto na Tabela 4.3. A soma do consumo do estabelecimento total foi de 46.182 kWh e uma média mensal de 5.773 kWh por mês.

Tabela 4.3 - levantamento de Carga

HISTÓRICO DE CONSUMO	
MÊS REFERENTE	CONSUMO (kWh)
Mai/21	3868
Jun/21	6748
Jul/21	6184
Ago/21	6165
Set/21	5790
Out/21	5622
Nov/21	6157
Dez/21	5648
TOTAL	46182

Fonte - elaborada pela autora

Com base nos dados de consumo vistos na Tabela 4.3, será viável projetar o sistema fotovoltaico para gerar o valor desejado, configurado segundo os fatores influenciadores para um bom desempenho do sistema.

5 PROJETO FOTOVOLTAICO

5.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

No presente capítulo, serão desenvolvidos o dimensionamento e a configuração básica do sistema fotovoltaico conectado à rede para o estabelecimento comercial avaliado em visita técnica, levando em conta os conjuntos formados pelo gerador fotovoltaico, o inversor e as proteções.

Portanto, para dimensionar de forma adequada os equipamentos que serão utilizados, é importante conhecer inicialmente a energia que se almeja produzir. Em seguida, realizar a projeção de produção do gerador. Após definido os passos anteriores, é viável fazer a escolha do inversor em conformidade para a conversão pretendida.

5.1.1 ESTIMATIVA DE POTÊNCIA NECESSÁRIA

Após o levantamento das informações essenciais para o dimensionamento do sistema fotovoltaico tais como, orientação dos módulos, disponibilidade do recurso solar, seguidamente, será feito o dimensionamento do sistema para ter conhecimento sobre o número de módulos fotovoltaicos necessários e o inversor apropriado entre outras informações importantes. Baseado no valor de consumo do estabelecimento, levantado no capítulo anterior, de acordo com Pinho e Galdino (2014), podemos calcular a potência do sistema que tenciona dimensionar. De acordo com a equação (5.1).

$$P_{FV} = \frac{\frac{C_m}{D} \times I}{G_{global} \times TD} \quad (4.1)$$

Em que

$P_{FV}(Wp)$ = Potência pico do gerador fotovoltaico (kWp)

C_m = Consumo mensal médio (kWh)

D = Quantidade de dias do mês

I_R = Irradiância de referência (kW/m²)

G_{global} = Irradiância diária média (kWh/m²)

TD = Taxa de Desempenho (PR - Performance Ratio)

Logo,

$$P_{FV} = \frac{\frac{5.773}{31} \times 1}{5,25 \times 0,75}$$

$$P_{FV} = \frac{186,226}{3,9375}$$

$$P_{FV} = 47,29 \text{ kWp}$$

Portanto, a potência de pico estimada que o gerador fotovoltaico requer para produzir toda a energia média consumida mensalmente pelo estabelecimento é de 47,29 kWp. Porém, para o estabelecimento em estudo, será traçado um valor médio de consumo obtido. O valor calculado será 10% inferior que o valor médio de consumo da residência por motivos de otimização.

Para o dimensionamento da potência do sistema, é importante ter o entendimento do sistema de compensação regulamentado na região. No sistema de Compensação de Energia (*net metering*) adotado pelo Brasil (Resolução Normativa ANEEL 482/2012), quando o sistema fotovoltaico gerar mais energia do que a demanda pela instalação consumidora, a energia excedente é entregue à rede elétrica e o medidor registra essa energia. O contrário ocorre quando a edificação consome mais energia do que a gerada pelo sistema fotovoltaico, fazendo com que, neste caso, o medidor registre o fluxo em seu sentido convencional, (PINHO; GALDINO, 2014).

A resolução da ANEEL 687/2015 menciona que carece ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para as unidades consumidoras do grupo B. O custo de disponibilidade é regulamentado pela resolução ANEEL nº414, que estabelece os seguintes valores mínimos de entrega de energia, conforme padrão de conexão com a rede: 30kWh, se padrão monofásico; 50 kWh, se padrão bifásico ou 100 kWh se padrão trifásico. Assim sendo, o estabelecimento por ser trifásico pagará todo mês o valor aproximado ao consumo de 100 kWh.

Levando em conta as informações mencionadas anteriormente, e utilizando a Equação (5.1) obtém-se:

$$P_{FV} = \frac{\frac{5196}{31} \times 1}{5,25 \times 0,75}$$

$$P_{FV} = \frac{167,613}{3.9375}$$

$$P_{FV} = 42,57 \text{ kWp}$$

O sistema fotovoltaico para o estabelecimento em questão será dimensionado para se ter uma potência de pico aproximadamente 42,57 kWp.

5.1.2 DIMENSIONAMENTO DO NÚMERO DE MÓDULOS

Os módulos usados neste projeto são do tipo monocristalino de 120 células da fabricante Trina Solar no modelo *Honey* TSM – DE08M com potência nominal de 375W. As especificações disponibilizadas pelo fabricante dos módulos são exibidas na Tabela 5.1.

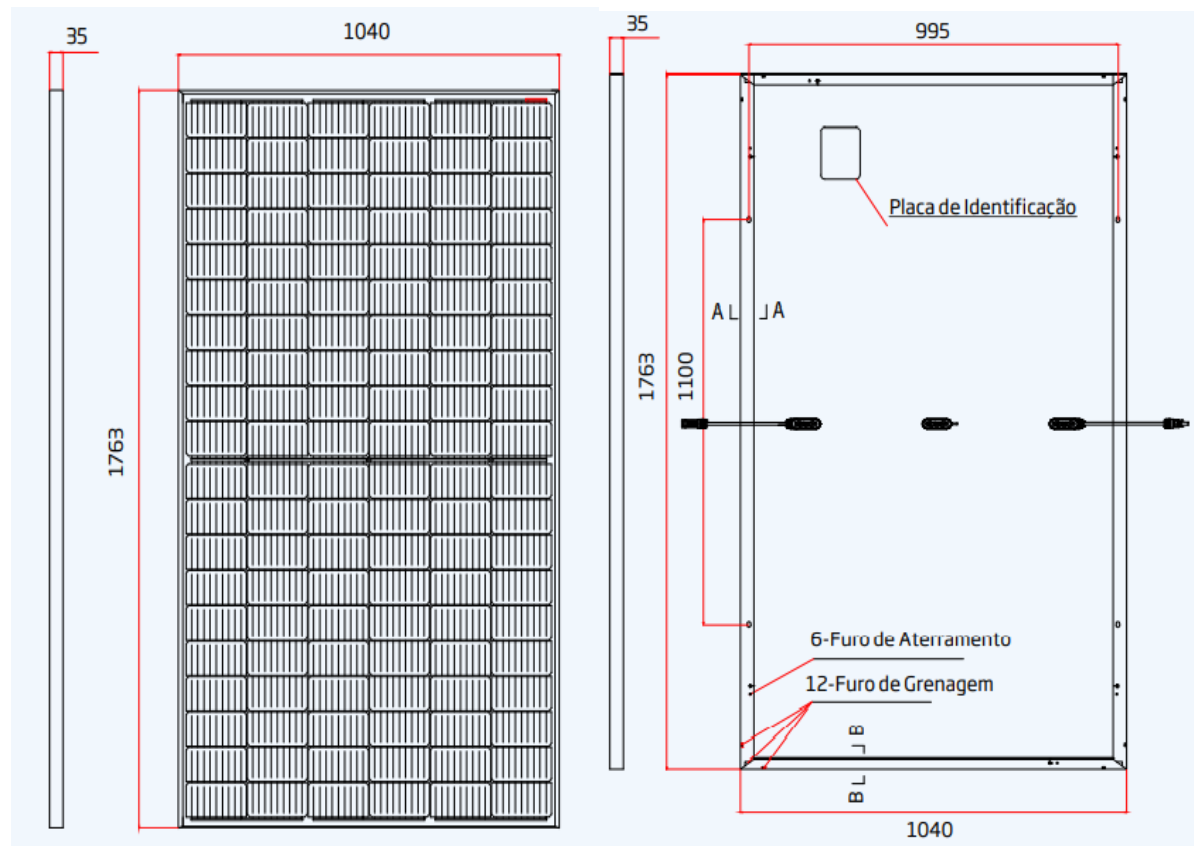
Tabela 5.1 - Especificações do módulo selecionado

Característica	Modelo TSM – DE08M
Potência de Pico em Watts - P_{Max} (Wp)	375
Tensão Máxima de Potência - P_{MPP} (V)	34.4
Corrente de Potência Máxima - I_{MPP} (A)	10.89
Tensão de Circuito Aberto - V_{OC} (V)	41.6
Corrente de Curto-Circuito - I_{SC} (A)	11.45
Eficiência do Módulo η_m (%)	20.5
Temperatura de Operação	-40°C ~ + 85°C
Tensão Máxima do Sistema	1500 V (IEC)
Tipo de Célula	Monocristalinas
Arranjo de Células	120 (6 x 20)
Dimensões do Módulo	1763x1040x35 mm
Coefficiente de Temperatura de P_{Max} (Wp)	-0.34% /°C
Coefficiente de Temperatura de V_{OC} (V)	-0.25% / °C
Coefficiente de Temperatura do I_{SC} (A)	0.04% / °C

Fonte - Trina Solar, (2020, <https://www.trinasolar.com/pt>)

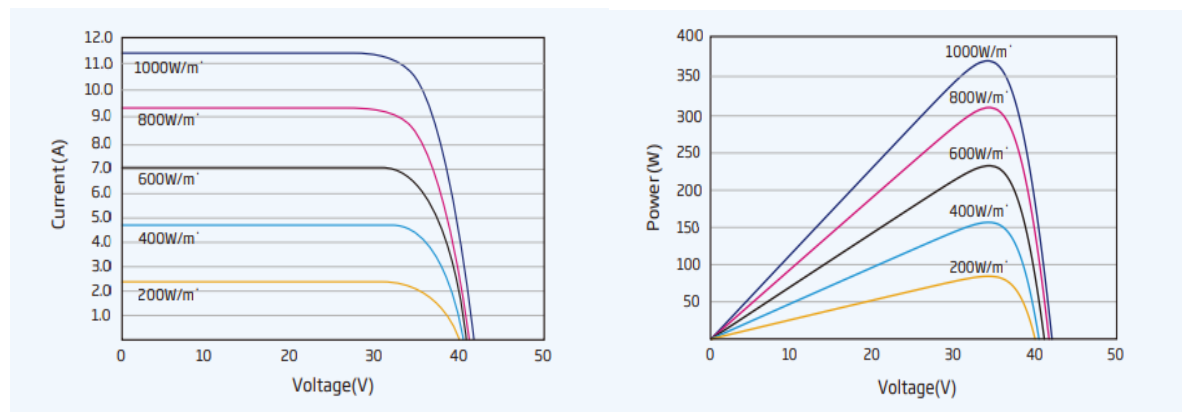
O módulo em questão possui peso de 20 kg, bom desempenho a baixa irradiação de 98%, garantia de 25 anos de entrega de energia e 12 anos de garantia do produto. As dimensões do módulo estão detalhadas na Figura 5.1 e na Figura 5.2 exibem as curvas características do módulo relacionados a circunstâncias de laboratório de temperatura e irradiância. Para mais informações sobre os módulos solares consultar o Anexo 01.

Figura 5.1 - Dimensões do módulo selecionado, vista frontal e traseira



Fonte - Trina Solar, (2020, <https://www.trinasolar.com/pt>)

Figura 5.2 - Curvas I – V e P – V de temperatura e irradiância do módulo selecionado



Fonte - Trina Solar, (2020, <https://www.trinasolar.com/pt>)

Tendo em vista o módulo escolhido que será usado no projeto, e conhecendo o valor da energia que se pretende produzir no estabelecimento através dos painéis fotovoltaicos, de acordo com Zille et al., (2012), é possível estipular a quantidade de módulos necessários através da Equação (5.2).

$$N_{Mfv} = \frac{P_{sistema}}{P_{Mfv}} \quad (5.2)$$

Em que:

N_{Mfv} = Número de módulos fotovoltaicos

$P_{sistema}$ = Potência instalada do gerador solar fotovoltaico

P_{Mfv} = Potência nominal do módulo solar a ser utilizado

Portanto, obtém-se:

$$N_{Mfv} = \frac{47,29 \times 1000}{375}$$

$$N_{Mfv} = 126.1066$$

Para o projeto proposto foi calculado cerca de 126 módulos fotovoltaicos, mas devido a questões de orçamento e espaço disponível para a instalação foram instaladas 120 placas solares.

5.1.3 ESCOLHA DO INVERSOR

Os inversores em um sistema fotovoltaico têm o propósito de adaptar as características da energia gerada pelos módulos as da rede elétrica convencional. Em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica os inversores têm como principais funções o rastreamento do Ponto Máximo de Potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), converter a corrente CC gerada pelo painel fotovoltaico em CA, desconexão e isolamento da rede elétrica em casos de emergência e enviar relatório de status, os inversores podem apresentar um painel de informação (display) com parâmetros de entrada e armazenamento das informações em *data-logger* ou envio para um computador (aplicação remota por link de dados ou transmissão por satélite).

Para satisfazer a demanda calculada com um gerador de 42,57 kWp, e levando em consideração como o modelo, o fabricante e o valor comercial do inversor, escolheu-se um modelo do tipo MAC 36KTL3-XL – Trifásico de 220V, do fabricante GROWATT.

Este modelo de inversor possui três rastreadores de ponto de máxima potência e todos os aspectos necessários para atender o sistema. As especificações elétricas do inversor escolhido, são mostradas na Tabela 5.2. Outras informações sobre o inversor, podem ser encontradas no Anexo 02.

Tabela 5.2 - Especificações do inversor MAC 36KTL3-XL

Característica	Modelo MAC 36KTL3-XL
Entrada (CC)	
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulos STC)	39000W
Máxima tensão CC	1100V
Tensão de partida	250V
Tensão nominal	360V
Faixa de tensão MPP	200V – 1000V
Número de rastreador MPP	3
Número de <i>strings</i> fotovoltaicas por MPP	4/4/4
Máx. corrente de entrada por rastreador MPP	52A/52A/52A
Máx. corrente de curto-circuito por rastreador MPP	55A/55A/55A
Saída (CA)	
Potência nominal de saída	30000W
Tensão nominal de saída (Faixa)	127/220V/ (101.6 – 139.7V)
Frequência de rede CA (Faixa)	50/60 Hz (46 ~ 54/56 ~ 64 Hz)
Corrente nominal de saída CA	78.8A
Máx. Corrente de saída	87.4A
Fator de potência	> 0.99
Fator ajustável de potência	0.8i-0.8c
THDI	< 3%
Tipo de conexão CA	3W + N + PE
Máxima eficiência	98.8%

Fonte - GROWATT, (2020, <https://br.growatt.com/products/mac-15-36ktl3-xl>)

5.1.4 DEFINIÇÃO DAS EXPOSIÇÕES

Como visto anteriormente, os módulos têm dimensões 1763× 1040 × 35 mm³ e por questões de orçamento e estrutura do local serão instaladas 120 unidades para gerar a potência de 45 kWp, com o intuito de atender o estabelecimento comercial.

Como mencionado no Capítulo 4, a área do estabelecimento não irá suportar a instalação de todos os módulos, os donos do estabelecimento comercial, estudado neste projeto, entraram em acordo com os donos do estabelecimento ao lado, que cederam o espaço do seu telhado para a instalação dos módulos. As exposições selecionadas, todas localizadas no estabelecimento vizinho, são apresentadas na Figura 5.3. Como é possível verificar, as exposições escolhidas foram organizadas em duas direções de telhado em três *strings*.

Figura 5.3 - Exposições para a instalação dos módulos



Fonte - elaborada pela autora

O espaço número 1 será sujeito com uma orientação de $179,77^\circ$ (azimute) com relação ao norte, e terá uma inclinação horizontal de 10° . Os módulos fotovoltaicos serão instalados em suportes de alumínio, com um ângulo de 10° e todos possuem a mesma posição.

O espaço número 2 será sujeito com uma orientação de $358,92^\circ$ (azimute) com relação ao norte, e terá uma inclinação horizontal de 10° . Os módulos bem como o espaço número 1 serão instalados em suportes de alumínio, com um ângulo de 10° .

5.1.5 PROTEÇÃO DO SISTEMA

Pelo lado CC, o quadro de proteção, chamado *string box*, já vem instalado de fábrica no próprio inversor, no qual realiza medições e o controle dos dados de entrada e saída de cada *string* do gerador fotovoltaico. E na saída em CA, está instalado uma *string box* do inversor até a rede da concessionária.

Segundo a norma brasileira em relação a sistemas fotovoltaicos, NBR 16690, presume que as instalações necessitam ter como características básicas a proteção contra choque elétrico, sobrecorrente, sobretensão, efeitos térmicos e incêndios do consumidor e a capacidade de seccionamento.

A parte CC é programada para reter surtos oriundos de descargas atmosféricas que possam refletir diretamente sobre os módulos fotovoltaicos e transportar-se até a entrada do

inversor. A proteção é integrada ao inversor e executada por Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS/1000Vcc/40kA), proteção contra polaridade reversa CC, proteção contra sobretensão CC. Este circuito é protegido por uma seccionadora e permite o desligamento da entrada do inversor para execução de serviço de manutenção.

O lado CA, a *string box* é composta por um disjuntor TRIPOLAR de 100A e quatro Dispositivos de Proteção contra Surto (DPS/275Vca/50kA/Classe II). Esta proteção faz parte do segundo estágio de absorção de surtos, sendo o primeiro de maior capacidade (Classe I), está localizado no quadro geral de entrada, próximo ao medidor de energia da concessionária. Demais informações se encontram no Anexo 02

O projeto terá um sistema de aterramento tanto do lado CC quanto do lado CA. O imóvel conta com malhas de aterramento no esquema TT, de acordo com a norma NBR 5410, ocasionado em uma resistência de aterramento de 5Ω . A instalação é composta com 1 haste de cobre de 1,5 metros de comprimento e 16 mm^2 de secção enterrada abaixo do quadro do disjuntor geral. Os cabos de aterramento dos módulos fotovoltaicos são ideais para áreas externas, a bitola para o aterramento entre a geração e da equipotencialização da estrutura de fixação é de 10 mm^2 e são interligados na caixa de proteção.

5.1.6 ESTRUTURAS DE APOIO

Os módulos fotovoltaicos serão agrupados por meio de suportes metálicos e *clamps* reguláveis em alumínio estrutural 6063-T6. Os suportes serão instalados diretamente sobre o espaço cedido do telhado do estabelecimento vizinho, grampos para telhado de fibrocimento e parafusos para armações de madeira. Algumas informações cedidas pelo fabricante: (i) Dimensionamento da estrutura segundo NBR 8800; (ii) Dimensionamento para suportar ventos de até 180km/h (NBR 6123).

5.1.7 CABEAMENTO

O cabeamento elétrico em corrente contínua e corrente alternada foi efetuado com cabo solar, preto para o negativo e vermelho para o positivo, com proteção UV, antichama, com isolamento XLPE 0,6/1kV de secção transversal de 6 mm^2 com capacidade de condução de corrente de 32A (em CC), e de 35 mm^2 com capacidade de condução de corrente de 89A (em CA), ambos com indicador específico de (+) para positivo e (-) para negativo, evitando quedas de tensão significativas e conseqüentemente perda de eficiência no rastreamento do ponto de máxima potência.

Os cabos empregados para as conexões do neutro devem ser obrigatoriamente de cor azul e os cabos utilizados para o aterramento devem ser obrigatoriamente de cor verde ou verde e amarelo, já os cabos usados para as conexões das fases deverão ser todos pretos, de acordo com a norma NBR 5410.

5.1.8 PONTO DE CONEXÃO

O ponto de conexão com a rede é o lugar onde é gerada a energia pelos módulos fotovoltaicos e convertida pelo inversor será injetada na rede elétrica. Sua disposição é de expressiva relevância para que possamos entender o sentido da corrente e direcionar a energia gerada da melhor forma.

O ponto de injeção da energia gerada será exatamente nas fases principais (L1, L2 e L3) situadas no quadro de distribuição principal localizado próximo ao quadro de medição geral, o ponto de conexão está localizado a aproximadamente 3 metros do mesmo, e a aproximadamente 6 metros do inversor que fornecerá a energia. Devido a instalação do sistema fotovoltaico, foi necessário realizar a troca do padrão de entrada junto a concessionária de bidirecional trifásico para *bidireccional* trifásico com disjuntor de 100A.

5.1.9 PADRÃO DE ENTRADA

A caixa de medição e proteção polifásica em material polimérico possui dimensões de 423 mm³ x 130 mm³ x 260 mm³ (comprimento, altura e largura), está instalada na fachada, no ponto de entrega caracterizado como o limite da via pública com a propriedade, atendendo aos requisitos de localização, facilidade de acesso e *layout*, em conformidade com as normas da concessionária NT.001.EQTL e NT.030.EQTL.

5.1.10 GERADOR FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico do projeto proposto é constituído por 1 gerador fotovoltaico com 120 módulos fotovoltaicos e 1 inversor. A potência total é de 42,57 kW_p para uma geração de 65.200,42 kWh por ano, distribuídos em uma área de 240m². A modalidade de conexão com a rede de alimentação em baixa tensão através de um circuito trifásico a quatro condutores, sendo três condutores FASE e um condutor NEUTRO, com tensão de atendimento em 220 V.

Um gerador de energia solar, conhecido como sistema solar fotovoltaico, é um conjunto de equipamentos capaz de transformar a energia proveniente da luz do sol em energia elétrica.

É um tipo de geração sustentável, e é um dos motivos que ao longo do tempo vem adquirindo vários adeptos a cada dia que passa. O gerador funciona de modo autônomo, sem a necessidade de nenhuma capacitação para o proprietário, o próprio equipamento efetua a desconexão com a rede elétrica em caso de alguma falha no sistema. Por sua configuração simples há uma série de aplicações para a energia.

O gerador é composto por:

- ❖ Módulos: São os que geram a energia em CC.
- ❖ Inversor: É responsável por converter a energia CC em CA e sincroniza com a rede da concessionária.
- ❖ Estrutura: Suporte para a fixação dos módulos.
- ❖ Cabeamentos: Cabos próprios para o uso externo, que conta com proteções.
- ❖ Conectores: Conexões importantes para assegurar a eficiência e longa vida útil do sistema e que também podem ficar expostos.
- ❖ Disjuntor CA: Possibilita o desligamento da energia que segue para a rede habilitando o equipamento para possíveis manutenções.
- ❖ Disjuntor CC: Propicia o desligamento da energia oriunda dos módulos habilitando o equipamento para possíveis manutenções.
- ❖ DPS CC: Efetua a proteção dos módulos e do inversor contra possíveis surtos de descargas atmosféricas.

O gerador é formado por 120 módulos fotovoltaicos monocristalino e apresenta uma vida útil aproximadamente de 25 anos e com degradação da produção por conta do tempo de 0,55% ao ano. Os dados do gerador estão exibidos na Tabela 5.3.

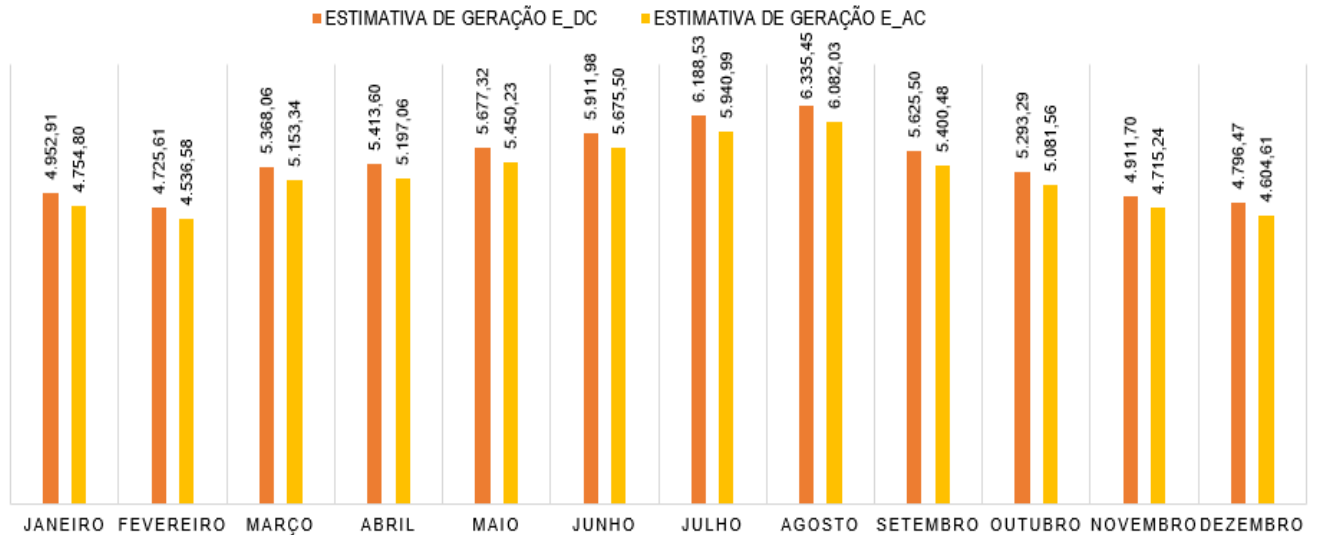
Tabela 5.3 - Dados do gerador fotovoltaico dimensionado

CARACTERÍSTICAS DO GERADOR FOTOVOLTAICO	
Número de módulos	120
Número de inversores	1
Potência nominal	45 <i>kWp</i>
Performance ratio	92,8%

Fonte - elaborada pela autora

As estimativas de geração de energia elétrica através do gerador fotovoltaico dimensionado, com rendimentos diários e mensais no período de um ano, estão apresentadas na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Estimativas de geração

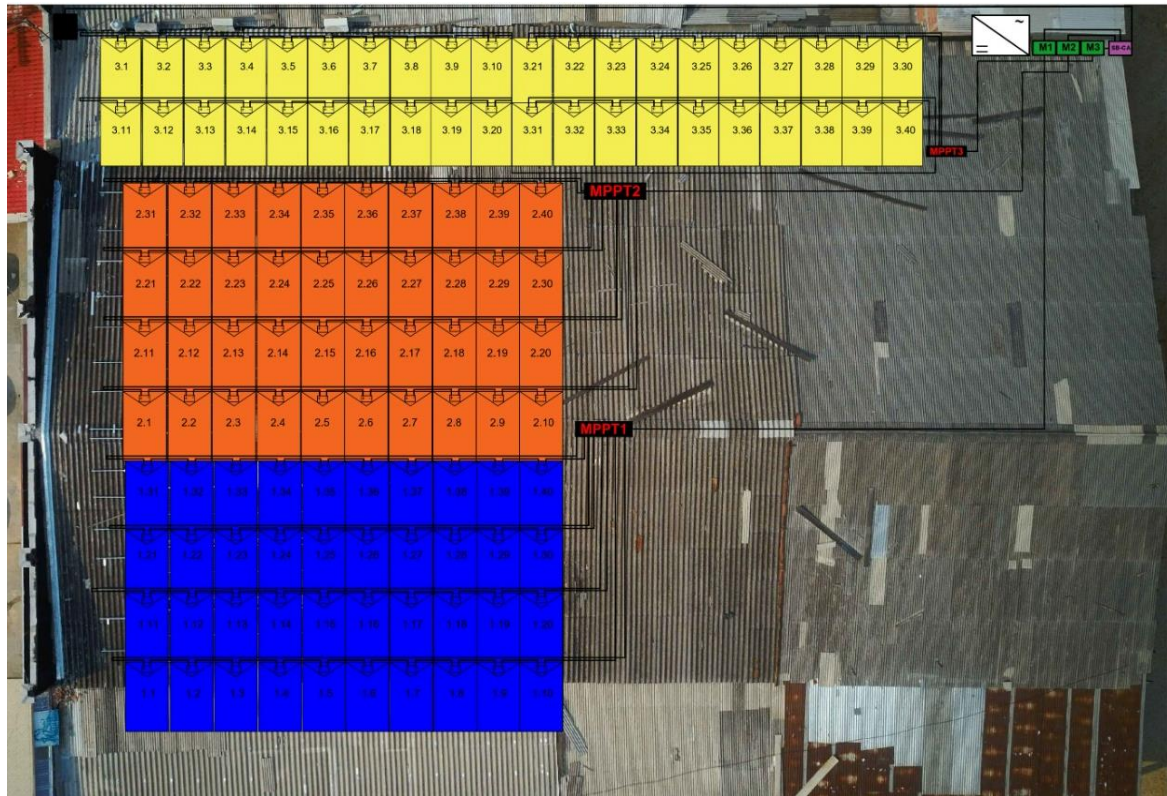


Fonte - elaborada pela autora

5.1.11 LAYOUT DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os módulos dispõem de posições estratégicas com orientação para o Norte e para Sul, com o intuito de potencializar a geração ao longo do ano. Este sistema fotovoltaico é formado, como citado anteriormente, por 120 módulos, possuindo 3 arranjos fotovoltaicos com 40 módulos em série em cada um dos arranjos. A configuração dos módulos pode ser observada na Figura 5.5.

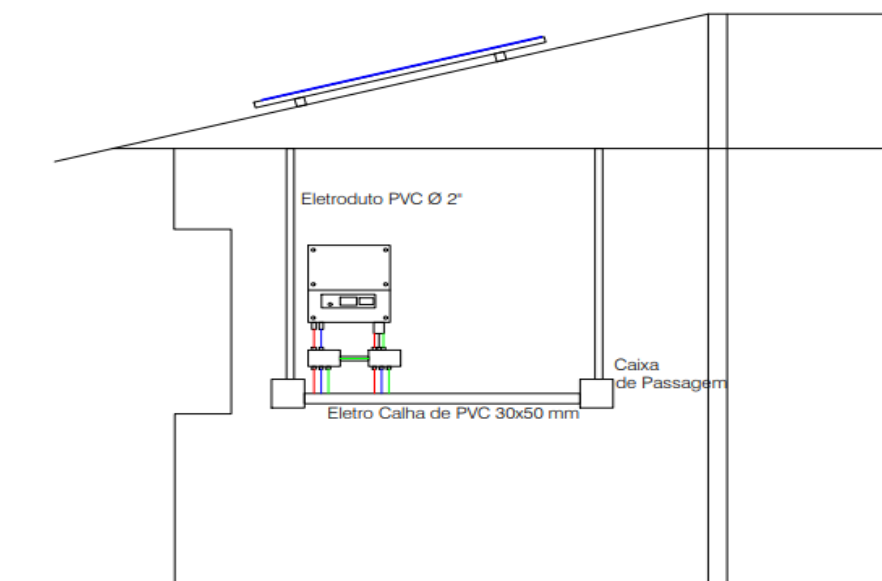
Figura 5.5 - Layout do sistema fotovoltaico



Fonte - elaborada pela autora

O *layout* da disposição do inversor fotovoltaico, é mostrado na Figura 5.6. O circuito elétrico do projeto é apresentado no Anexo 04.

Figura 5.6 - Layout do inversor fotovoltaico



Fonte - elaborada pela autora

5.1.12 DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA

O diagrama unifilar é um designer que se utiliza de simbologia singular para representar esquematicamente o sistema fotovoltaico. O diagrama é apresentado no Anexo 03, representa o esquema do sistema instalado no estabelecimento comercial desde a *strings* dos módulos, percorrendo pela *string box* até o inversor e em sequência pelas proteções CA até a integração na rede elétrica da concessionária de energia elétrica local.

6 RESULTADOS

6.1 CONEXÃO COM A REDE

O sistema fotovoltaico do estabelecimento comercial passou por todas as etapas de avaliação efetuadas pela concessionária de energia elétrica da região. Cada uma das etapas é regulamentada pela agência nacional de energia elétrica por meio das resoluções 1000/2021, 687/215 e 482/2012. As etapas 1,2 e 3 ocorreram de forma simultânea, sendo a etapa 1 e 2 a solicitação de aprovação do projeto pelo consumidor junto a concessionária. Após aprovação nas etapas 1 e 2, seguiu-se para a etapa 3, que é a solicitação de parecer de acesso, onde foi necessário o envio do projeto fotovoltaico completo, memorial técnico descritivo, diagrama de blocos, diagrama unifilar, entre outros documentos.

Após aprovação do projeto e o envio do parecer de acesso favorável, ocorreu a instalação completa do sistema, de acordo com o retratado no projeto. Após a conclusão da instalação, foi realizada a solicitação de vistoria, a qual é a última etapa de avaliação das instalações, onde é realizada a aprovação do ponto de conexão, troca do medidor convencional unidirecional para um bidirecional e validar que o local gera energia elétrica por meio de fonte renovável. Portanto, o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do estabelecimento comercial foi inserido no grupo de locais com geração distribuída. A imagem do medidor bidirecional instalado pela concessionária de distribuição de energia elétrica local no estabelecimento, pode ser visualizado na Figura 6.1.

Figura 6.1 - Medidor Bidirecional



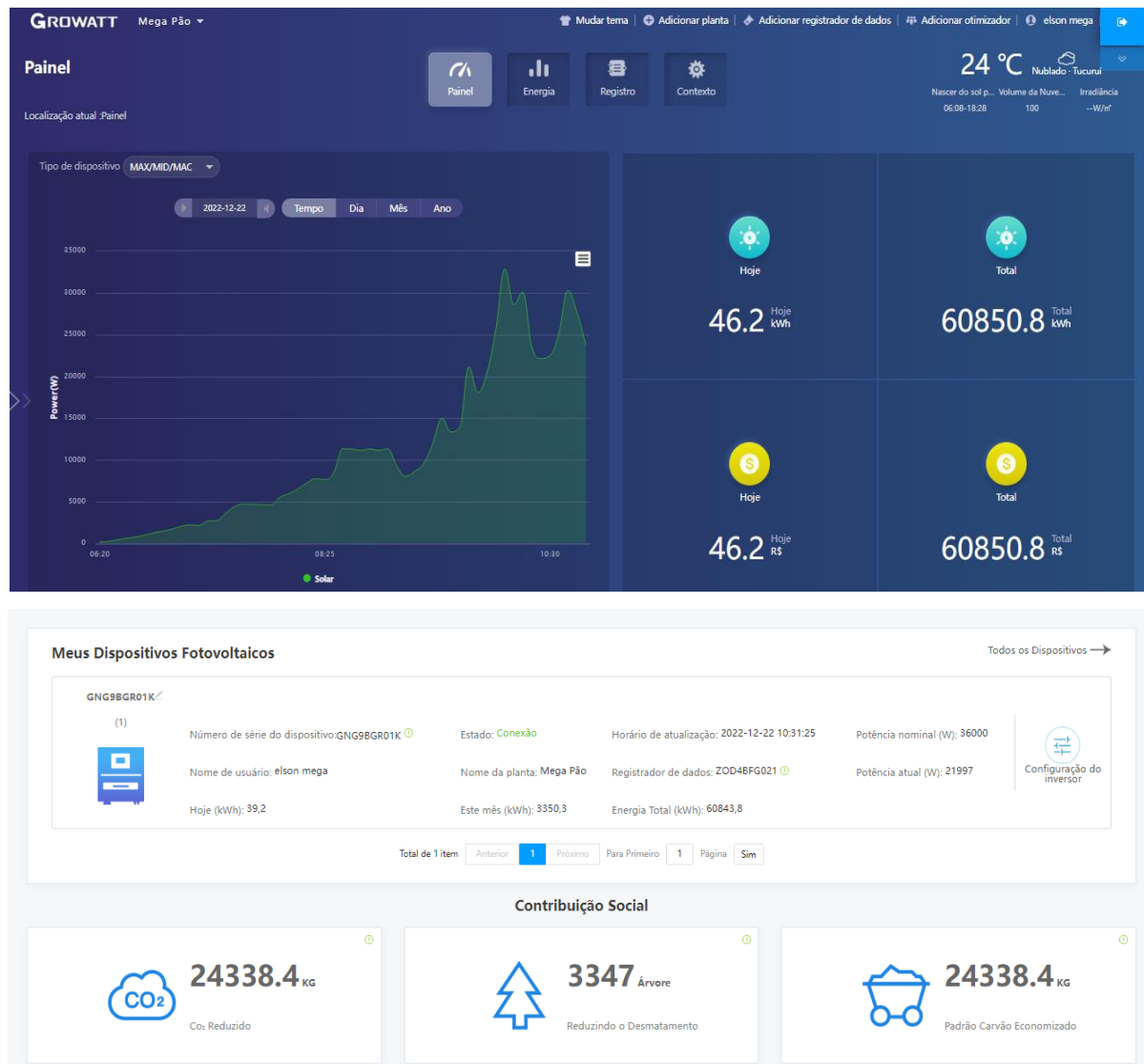
Fonte - elaborada pela autora

6.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO

O sistema de monitoramento para sistemas fotovoltaicos são dispositivos controlados por meio de softwares que acompanham a performance da instalação fotovoltaica. Tanto os proprietários, o fabricante e os responsáveis pela instalação do sistema podem observar a performance do mesmo de qualquer lugar do mundo em um aparelho conectado à internet.

O sistema utilizado para monitorar o gerador fotovoltaico deste projeto é o do fabricante GROWATT, mesma fabricante do inversor, que fornece os dados em tempo real e históricos, dados climáticos e observações baseadas no desempenho. O monitoramento pode ser feito via web, por aparelhos de celular ou tablet compatíveis com sistemas Android ou IOS. A interface do sistema de monitoramento pode ser observada na Figura 6.2.

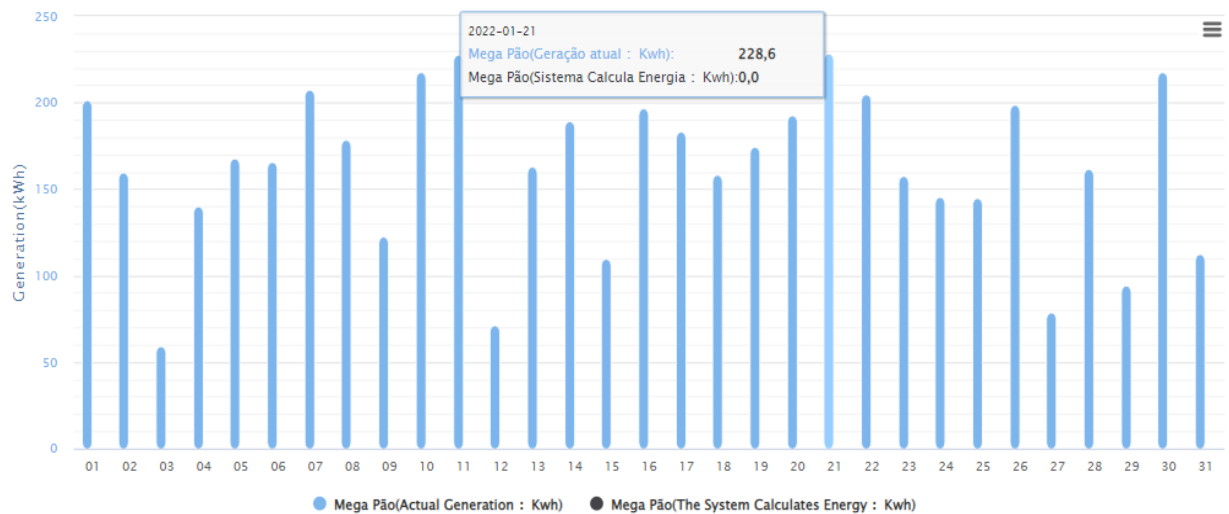
Figura 6.2 - Interface Web do sistema de monitoramento



Fonte - Shenzhen Growatt New Energy Co., Ltd Shineserver-3.6.0.0, (2022,
<https://server.growatt.com/?lang=pt>)

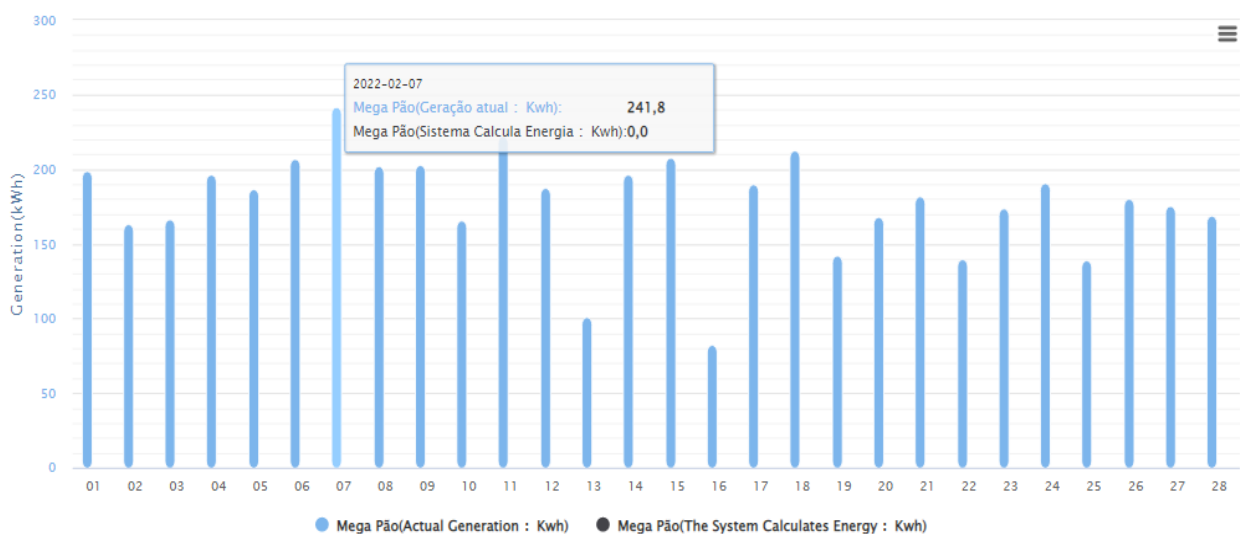
O sistema fotovoltaico do estabelecimento comercial possui pouco mais de 1 ano de funcionamento, desde o dia 29 de dezembro de 2022, mas infelizmente a geração só passou a ser contabilizada pela concessionária somente a partir do mês de fevereiro e assim os créditos foram sendo gerados por ela. A geração do primeiro mês de produção do sistema fotovoltaico, é ilustrada na Figura 6.3. Pode ser observado através da Figura 6.3, que o dia 21 do mês de janeiro foi o melhor dia de produção de energia no mês.

Figura 6.3 - Geração de Energia Elétrica no mês de janeiro



Fonte - Shenzhen Growatt New Energy Co., Ltd Shineserver-3.6.0.0, (2022, <https://server.growatt.com/?lang=pt>)

Figura 6.4 - Geração de Energia Elétrica no mês de fevereiro

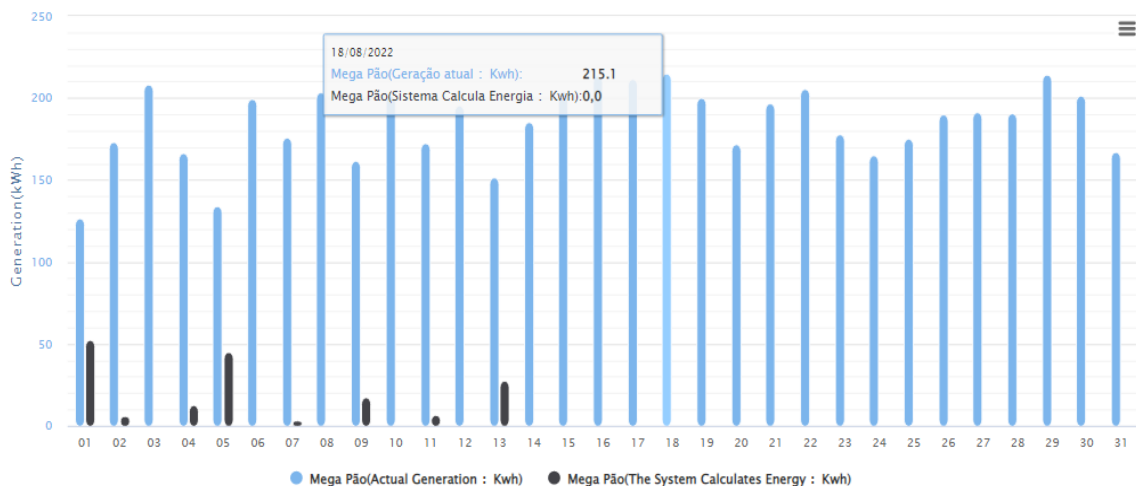


Fonte - Shenzhen Growatt New Energy Co., Ltd Shineserver-3.6.0.0, (2022, <https://server.growatt.com/?lang=pt>)

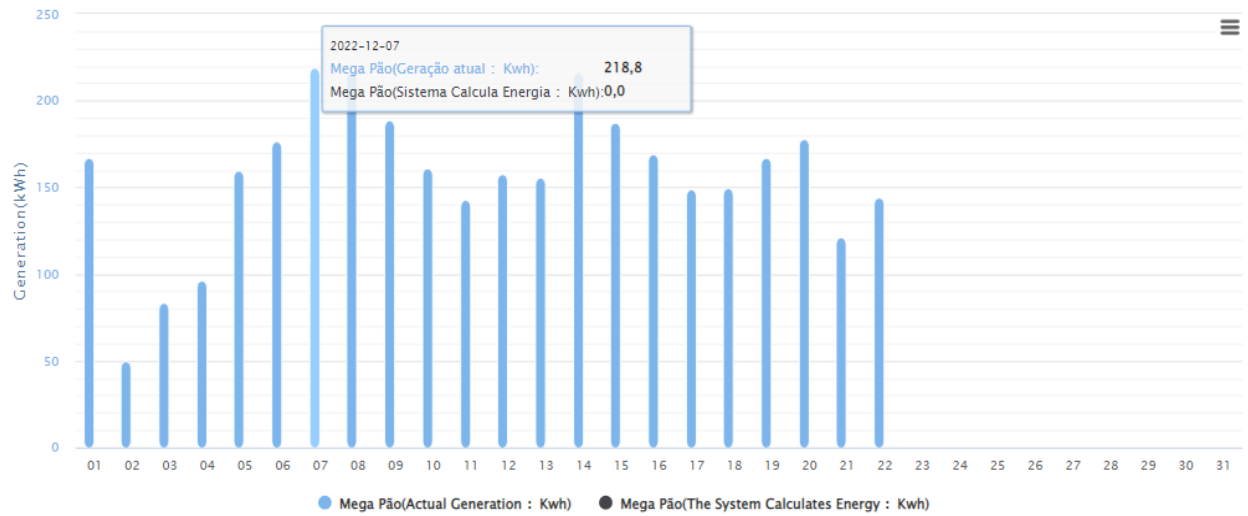
Como citado anteriormente, o mês de fevereiro foi o primeiro mês junto a concessionária que a geração de energia do sistema começou a ser aferida. De acordo com a Figura 6.4 o dia 07 de fevereiro foi o melhor dia de produção, totalizando no mês uma geração de 4994,6 kWh. E o valor da conta de energia que no mês anterior foi de R\$ 5.176,57 sofreu uma queda no mês de fevereiro para R\$ 391,47, uma economia por volta de 92%.

Segundo indicado na Tabela 4.2, o mês com maiores e menores índices de irradiação solar seriam o mês de agosto e dezembro respectivamente. Foi observado nas Figuras 6.5 e 6.6 o melhor mês de geração de energia elétrica foi o mês de agosto, com seu maior pico de geração no dia 18 de agosto, Figura 6.5. E o mês com geração mais baixa foi o mês de dezembro, com melhor pico de geração no dia 07 de dezembro. Infelizmente ocorreu um problema técnico e só foi possível coletar dados pelo sistema até o dia 22 de dezembro.

Figura 6.5 - Geração de Energia Elétrica no mês de agosto

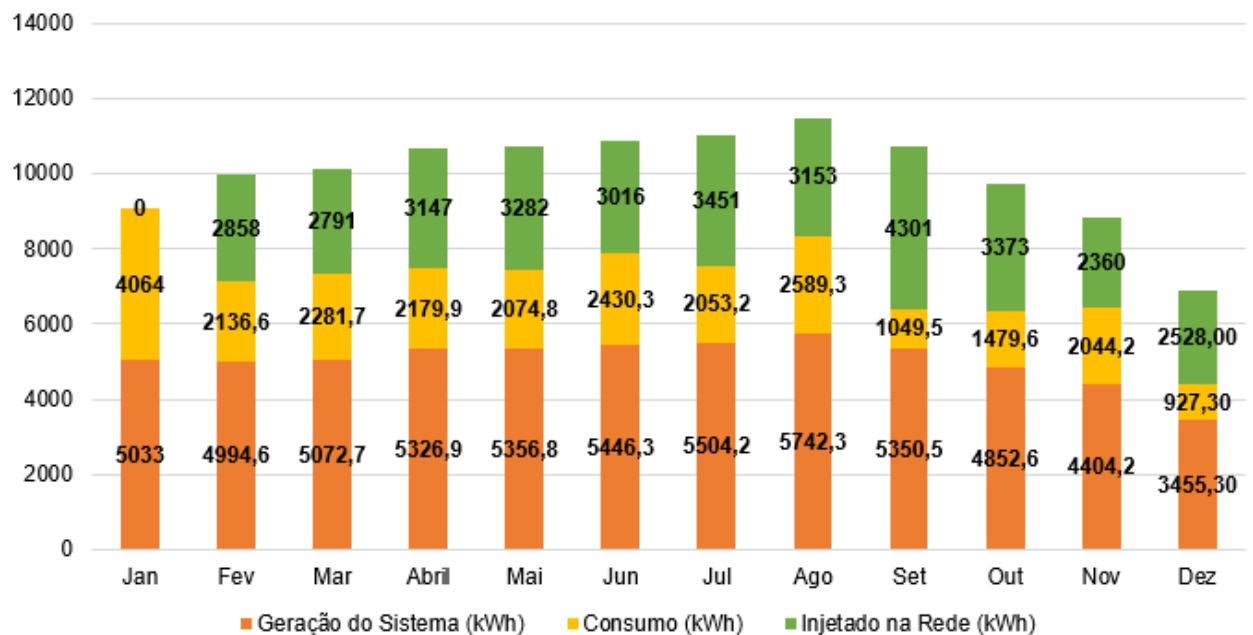


Fonte - Shenzhen Growatt New Energy Co., Ltd Shineserver-3.6.0.0, (2022, <https://server.growatt.com/?lang=pt>)

Figura 6.6 - Geração de Energia Elétrica no mês de dezembro

Fonte - Shenzhen Growatt New Energy Co., Ltd Shineserver-3.6.0.0, (2022, <https://server.growatt.com/?lang=pt>)

Com base nos dados mensais de geração de energia elétrica ao longo de 2022, foi possível chegar ao consumo anual de geração de energia do sistema, como apresentado na Figura 6.7. O resultado mostrado na Figura 6.7 de cor laranja, representa a geração mensal, o que está em amarelo o consumo da residência onde se encontra o sistema fotovoltaico, já o que está em verde, representa os créditos injetados na rede durante o mês.

Figura 6.7 - Geração de Energia Anual

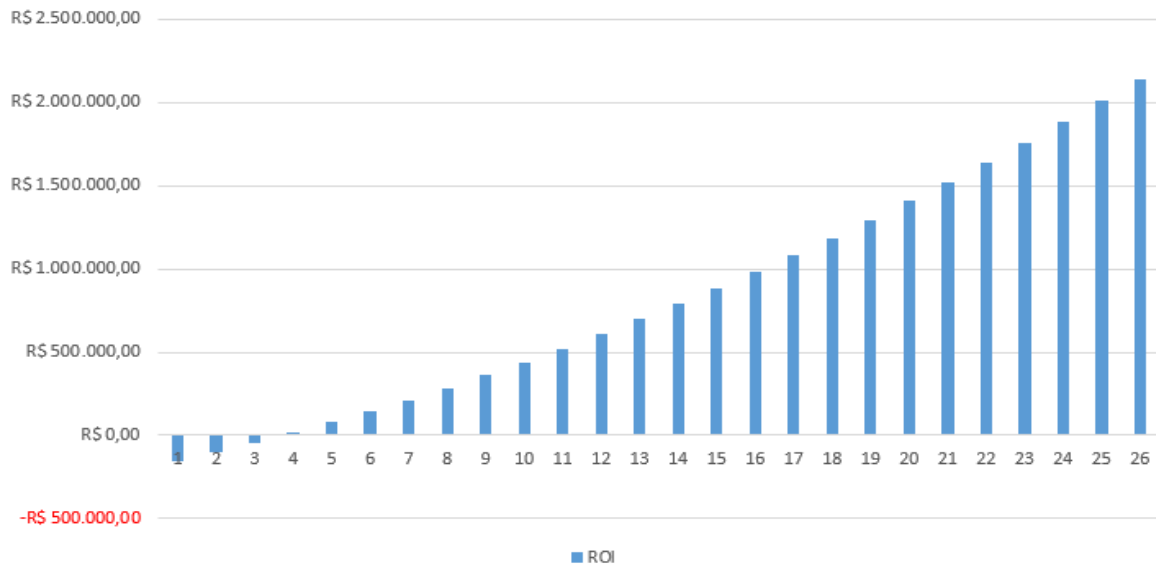
Fonte - elaborada pela autora

6.3 ROI DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O retorno do investimento feito no sistema fotovoltaico implantado pode ser estimado pelo ROI (*Return On Investment*). O ROI de energia solar é muito importante pois estima o ganho ao adquirir este tipo de investimento, e se o mesmo é rentável para os clientes ao longo dos anos.

Para o cálculo do ROI foi levando em consideração alguns fatores como a tarifa de energia e a variação da mesma ao longo dos anos, kWh produzido no ano. Graficamente a estimativa de quando o sistema fotovoltaico se torna rentável aos clientes, é ilustrado na Figura 6.8.

Figura 6.8 - Retorno do Investimento



Fonte - elaborada pela autora

6.4 BENEFÍCIO AO MEIO AMBIENTE

O sistema fotovoltaico é uma tecnologia renovável atrativamente econômica, onde tem um papel muito importante para um mundo mais sustentável. Este tipo de sistema traz inúmeros benefícios ao meio ambiente, como a redução da poluição por fontes poluentes como o carvão e de gases do efeito estufa, diminuição do desmatamento e o aumento do uso de recursos naturais. Alguns indicadores a respeito do impacto positivo gerado pelo sistema fotovoltaico implantado no estabelecimento comercial, através do sistema de monitoramento da *Growatt*, estão apresentados na Figura 6.9.

Figura 6.9 - Contribuição Social



Fonte - Shenzhen Growatt New Energy Co., Ltd Shineserver-3.6.0.0, (2022, <https://server.growatt.com/?lang=pt>)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado abordou todo o processo de validação de um projeto fotovoltaico em um estabelecimento comercial localizado no município de Tucuruí, configurado através do estudo das informações fornecidas pelos proprietários do estabelecimento necessários para facilitar o dimensionamento do sistema.

Após obter todos os dados necessários para a execução do projeto, foi viável dimensionar os equipamentos ideais para atender as necessidades do local. Após todo o processo de validação e vistoria da Equatorial Energia – PA (concessionária de Energia) no local de instalação do sistema fotovoltaico, ocorreu a conexão à rede. Durante a execução da obra surgiram alguns entraves no processo de execução do projeto, como a escolha do fornecedor com melhor custo-benefício, a dificuldade da concessionária em cumprir o prazo estipulado pela norma, como não ter contabilizado os créditos no primeiro mês de funcionamento do sistema e a questão do espaço no telhado do estabelecimento.

Embora tenha acontecido algumas adversidades ao longo do projeto, como mudanças no orçamento, difícil acesso ao telhado para a instalação dos módulos e algumas questões com prazos junto a concessionária de energia, o mesmo foi executado com êxito, e através do monitoramento feito ao longo de 12 meses o sistema fotovoltaico apresentou resultados bem próximos do esperado, com uma performance de 92,8%. Demonstrando assim que o projeto foi elaborado e executado de forma satisfatória e atendendo diariamente as demandas do estabelecimento comercial.

Os sistemas fotovoltaicos se apresentam cada vez mais em evidência e é esperado que o mesmo ajude no combate da degradação ambiental causada por fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis, ou mesmo renováveis, como as centrais hidrelétricas, cuja construção tem um grande impacto ambiental e as usinas termelétricas a diesel as quais são grandes emissoras de CO₂. Os impactos ao meio ambiente pelos sistemas fotovoltaicos são quase inexistentes, pois sua tecnologia é projetada para durar anos além de não emitirem gases poluentes. Os custos para que cada vez mais consumidores tenham acesso a essa tecnologia poderia ser reduzida por meio de investimentos na tecnologia da indústria nacional, para pesquisas que proporcionem menor custo de produção e facilidade de produção.

Para trabalhos futuros segue as seguintes propostas: (i) Estudo a respeito das novas regras para instalação de sistemas fotovoltaicos e seus impactos na qualidade da energia; (ii)

Estudo dos sistemas fotovoltaicos *off grid* no entorno do lago da hidroelétrica de Tucuruí - PA e seus benefícios para a qualidade vida para seus consumidores.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Ministério de Minas e Energia**. Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica: Disponível em <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>> Acesso em: 26 dez. 2022.

ANEEL. **Ministério de Minas e Energia**. Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica: **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015, Rio de Janeiro.

ANEEL. **Aneel Notícias**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-ultrapassa-marca-de-10-gw-em-micro-e-minigeracao-distribuida>> Acesso em: 26 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas em baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.

EPE. **Balanco Energético Nacional**. Maio de 2021. Fonte: Relatório Síntese: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-PublicacoesArquivos/publicacao-601/>> Acesso em: 26 dez. 2022.

GORJIAN, S., & Shukla, A. **Photovoltaic Solar Energy Conversion Technologies, Applications and Environmental Impacts**. Massachusetts: 2020, Academic Press.

HINRICHS, R. A., & Kleinbach, M. **Energy: Its Use and the Environment**. Boston: 2012, Cengage Learning.

JIEB, Y. A., & Hossain, E. **Photovoltaic Systems: Fundamentals and Applications**. Suíça: 2021, Springer.

MOUKHTAR, I., Dein, A. Z., Elbaset, A. A., & Mitani, Y. **Solar Energy: Technologies, Designer, Modeling and Economics**. Berlim: 2020, Springer.

NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 1988.

OLIVEIRA, J. F., & Trindade, T. C. **Sustainability Performance Evaluation of Renewable Energy Sources: The Case of Brazil**. São Paulo: 2018, Springer.

PEREIRA, E. B. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: 2017, INPE.

PINHO, J. T., & Galdino, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: 2014.

PRICE, G. D. **Renewable Power and Energy: Photovoltaics Systems**. Nova York: 2018, Momentum Press.

RATHORE, N., & Panwar, N. **Fundamentals of Renewable Energy**. Boca Raton: 2021, CRC Press.

RÜTHER, R.. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: 2004, Labsolar.

SOLLS. **Solls: Energia Limpa para o Planeta**. (20 de Julho de 2022). Fonte: Solls: Energia Limpa para o Planeta: <<http://solls.com.br/energia-solar/>> Acesso em: 26 dez. 2022.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: (2015), Érica.


VIRTUX. **Virtux Solar**. Disponível em: <<https://www.virtuxsolar.com/pet/>> Acesso em: 10 dez. 2022.

ZILLES, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A., & Oliveira, S. H. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: 2012, (Oficina de Textos).


ANEXOS

Anexo 1 – Datasheet do Pannel Solar TSM-DE08M(II) – 375W – Parte A

Mono Multi Soluções



MÓDULO MONOCRISTALINO DE 120 CÉLULAS



120 CÉLULAS
MONOCRISTALINAS

360-380W
FAIXA DE POTÊNCIA

20.7%
EFICIÊNCIA MÁXIMA


0~+5W
TOLERÂNCIA DE POTÊNCIA POSITIVA

Fundada em 1997, a Trina Solar é líder mundial no fornecimento de soluções para energia solar. Com presença local em todo o mundo, a Trina Solar é capaz de fornecer um serviço excepcional a cada cliente, em cada mercado e entregar produtos inovadores e confiáveis sendo uma marca forte e lucrativa. A Trina Solar agora distribui seus produtos PV para mais de 100 países em todo o mundo. Estamos comprometidos em construir colaborações estratégicas e mutuamente benéficas com instaladores, desenvolvedores, distribuidores e outros parceiros para que juntos possamos impulsionar a energia inteligente.

CERTIFICAÇÕES INTERNACIONAIS DO PRODUTO

IEC61215 / IEC61730 / IEC61701 / IEC62716 / ULL1703

ISO 9001: Sistema de Gestão da Qualidade
ISO 14001: Sistema de Gestão Ambiental
ISO 14064: Verificação de Emissões de Gases de Efeito Estufa ISO
45001: Sistema de Gestão da Saúde e Segurança no Trabalho



Trinasolar

PRODUTOS	FAIXA DE POTÊNCIA
TSM-DE08M(II)	360-380W

Alta Potencia

- Até 380W de potência com 20.7% de eficiência utilizando células "half-cut" e a tecnologia MBB de interconexão, melhorando o retorno do seu investimento
- Menor resistencia em série e excelente rendimento de coleta de corrente com a tecnologia MBB garantindo a alta potência


Alta Confiabilidade

- Resistência PID garantida pelo rigoroso controle de qualidade Trina Solar
- Resistente à ambientes ácidos, salinos e com amônia
- Performance mecânica: +5400 Pa/-2400 Pa dependendo do modo de instalação

Alta Geração de Energia

- Excelente IAM (modificador de ângulo de incidência) e ótimo desempenho a baixa irradiação, validado por certificadores internacionais
- O design exclusivo fornece produção otimizada de energia sob condições de sombreamento
- Baixo coeficiente de temperatura (-0,34%) e temperatura de operação

GARANTIA DE PERFORMANCE



Anos	Potência Garantida (%)
0	98.0%
25	84.8%

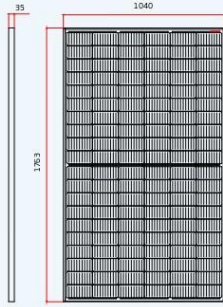
Fonte - Trina Solar, (2020, <https://www.trinasolar.com/pt>)

Anexo 1 – Datasheet do Painel Solar TSM-DE08M(II) – 375W – Parte B

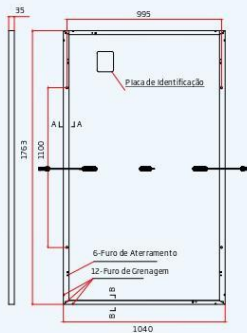


MÓDULO MONOCRISTALINO DE 120 CÉLULAS

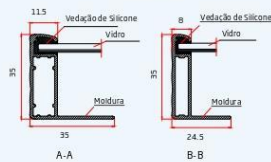
DIMENSÕES DO MÓDULO PV (mm)



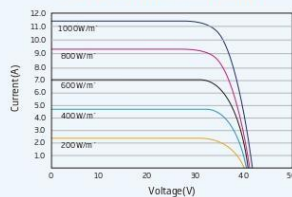
Vista Frontal



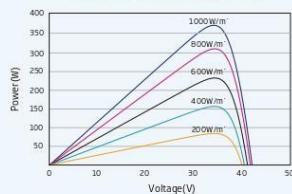
Vista Traseira



CURVAS I-V DO MÓDULO (370W)



CURVAS P-V DO MÓDULO (370W)



DADOS ELÉTRICOS (STC)

	360	365	370	375	380
Potência de Pico em Watts- P_{MAX} (Wp) *	360	365	370	375	380
Tolerância de Potência- P_{MAX} (W)	0 ~ +5				
Tensão Máxima de Potência- V_{MPP} (V)	33.6	33.9	34.2	34.4	34.7
Corrente de Potência Máxima- I_{MPP} (A)	10.70	10.76	10.82	10.89	10.96
Tensão de Circuito Aberto- V_{OC} (V)	40.7	41.0	41.3	41.6	41.9
Corrente de Curto-Circuito- I_{SC} (A)	11.24	11.30	11.37	11.45	11.52
Eficiência de Módulo η (%)	19.6	19.9	20.2	20.5	20.7

STC: Irradiância 1000W/m², Temperatura da Célula 25°C, Massa de Ar AM1.5
* Tolerância de medição: ± 3%.

DADOS ELÉTRICOS (NOCT)

	271	275	279	283	287
Potência Máxima Watts- P_{MAX} (Wp)	271	275	279	283	287
Tensão Máxima de Potência- V_{MPP} (V)	31.5	31.8	32.0	32.2	32.5
Corrente de Potência Máxima- I_{MPP} (A)	8.60	8.65	8.71	8.77	8.83
Tensão de Circuito Aberto- V_{OC} (V)	38.3	38.6	38.9	39.2	39.4
Corrente de Curto-Circuito- I_{SC} (A)	9.06	9.10	9.16	9.23	9.28

NOCT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

DADOS MECÂNICOS

Células Solares	Monocristalinas
No Células	120 cells (6 x 20)
Dimensões do módulo	1763 x 1040 x 35 mm (69.41 x 40.94 x 1.38 polegadas)
Peso	20.0 kg (44.1 lb)
Vidro	3.2 mm (0.13 pol.), Alta Transmissão, Vidro Reforçado com Revestimento Térmico Anti Reflexo
Material Encapsulante	EVA
Backsheet	Branco
Molde	Liga de Alumínio Anodizado de 35 mm (1.38 polegadas)
Caixa de Derivação	IP 68
Cabos	Cabo de Tecnologia Fotovoltaica de 4,0 mm (0,006 polegadas), Retrato: N 280mm/P 280mm (11,02/11,02 polegadas) Paisagem: N 1200 mm/P 1200 mm (47.24/47.24 polegadas)
Conector	MC4 EVO2/TS4*

*Consulte a folha de dados regional para obter o conector especificado

COEFICIENTES DE TEMPERATURA

NMOT (Temperatura Operacional do Módulo Nominal)	43°C (±2°C)
Coefficiente de Temperatura de P_{MAX}	- 0.34%/°C
Coefficiente de Temperatura de V_{OC}	- 0.25%/°C
Coefficiente de Temperatura do I_{SC}	0.04%/°C

(Não conecte o Fusível na caixa de Fusíveis com dois ou mais fios em conexão paralela)

GARANTIA

12 anos de Garantia do Produto
25 anos de Garantia de Entrega de Energia
2% de degradação do primeiro ano
0.55% atenuação anual de potência

(Favor consultar o documento de garantia para maiores detalhes)

LIMITES OPERACIONAIS

Temperatura Operacional	-40~ +85 °C
Tensão Máxima do Sistema	1500V DC (IEC)
Capacidade Máxima do Fusível	20A

CONFIGURAÇÃO DE EMBALAGEM

Módulos por Pallet: 31 unidades
Módulos por Container de 40': 806 unidades



CUIDADO: LEIA AS INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA E INSTALAÇÃO ANTES DE USAR O PRODUTO.
© 2020 Limitado a Trina Solar. Todos os direitos reservados. As especificações incluídas nesta folha de dados estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.
Número da versão: TSM_PT_2020_D

www.trinasolar.com

Anexo 2 - Datasheet Inversor GROWATT

MAC 25-36KTL3-XL

- 3 MPPT's
- Solução trifásica de 220V
- Diagnóstico inteligente
- Alta eficiência de até 98,8%
- Configuração de WIFI local
- Display OLED e botão de toque
- DPS tipo II em CC e AC



P O W E R
- I N G O
T O M O -
R R O W O

GROWATT



www.ginverter.com

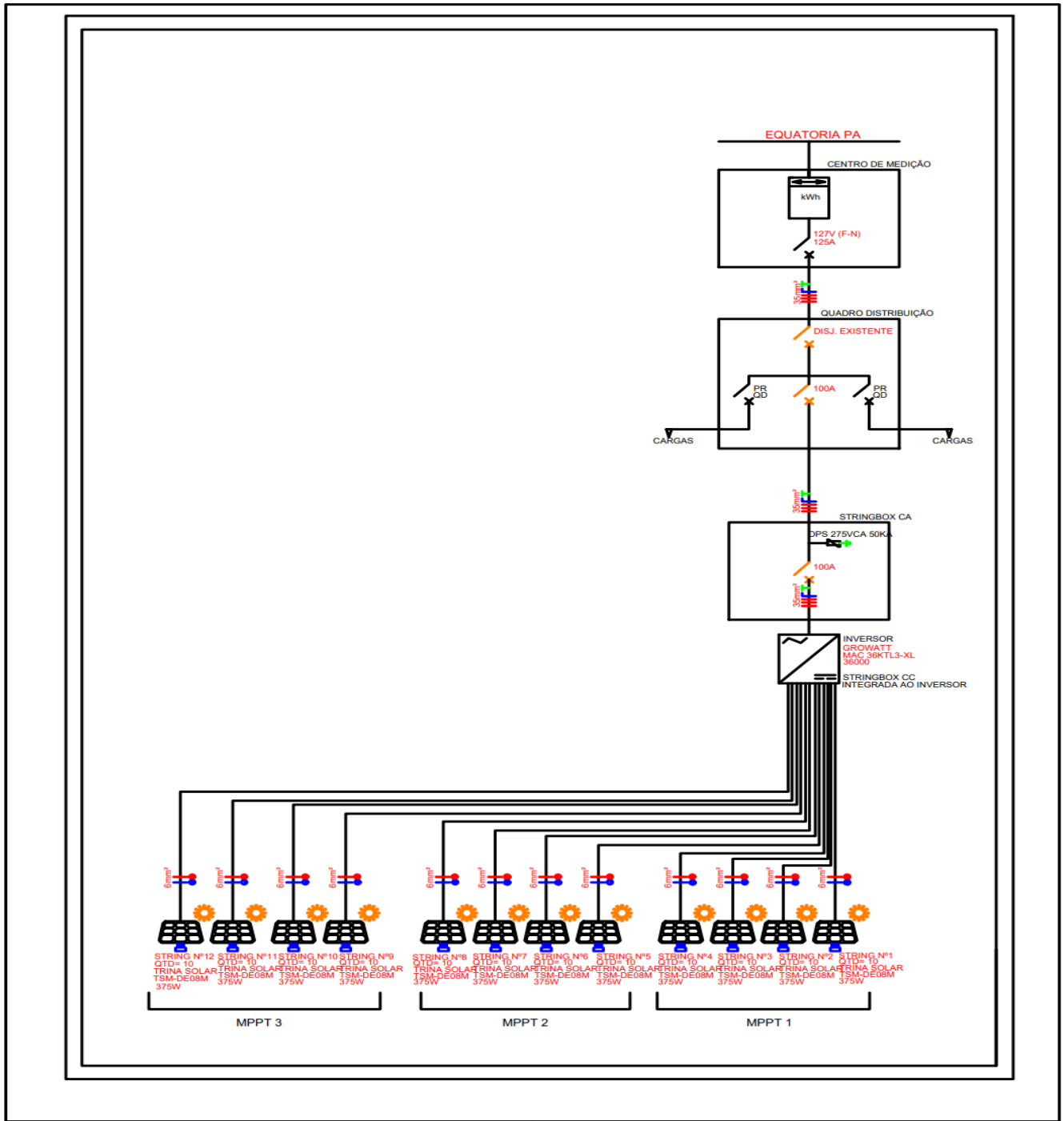
Fonte - GROWATT, (2020, <https://br.growatt.com/products/mac-15-36ktl3-xl>)

Ficha de dados	MAC 25KTL3-XL	MAC 30KTL3-XL	MAC 36KTL3-XL
Dados de entrada			
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	32500W	39000W	46800W
Máxima tensão CC		1100V	
Tensão de partida		250V	
Tensão nominal		360V	
Faixa de tensão MPP		200V-1000V	
Número de rastreador MPP		3	
Número de strings fotovoltaicas por MPPT		4/4/4	
Máx. corrente de entrada por rastreador MPP		52A/52A/52A	
Máx. corrente curto-circuito por rastreador MPP		55A/55A/55A	
Saída (CA)			
Potência nominal de saída	25000W	30000W	36000W
Tensão nominal de saída(Faixa)		127V/220V(101.6-139.7V)	
Frequência de rede CA(Faixa)		50/60 Hz(46-54/56-64Hz)	
Corrente nominal de saída CA	65.6A	78.8A	94.5A
Máx. Corrente de saída	73.0A	87.4A	94.5A
Fator de potência		>0.99	
Fator ajustável de potência		0.8i-0.8c	
THDI		<3%	
Tipo de conexão CA		3W+N+PE	
Eficiência			
Máx. Eficiência		98.8%	
Euro-eta		98.2%	
Eficiência MPPT		99.9%	
Dispositivo de proteção			
Proteção de polaridade reversa de CC		Sim	
Interruptor CC		Sim	
Proteção de surtos CC		Tipoll	
Monitoramento de resistência de isolamento		Sim	
Proteção de surtos CA		Tipoll	
Proteção de curto-circuito CA		Sim	
Monitoramento de rede		Sim	
Proteção anti-ilhamento		Sim	
Unidade de monitoramento de corrente residual		Sim	
Proteção AFCI		Sim	
Dados Gerais			
Dimensões (L/A/P)		680/508/281mm	
Peso		≤52kg	
Faixa de temperatura operacional		-25°C ... +60°C (>45°C Derating)	
Emissão de ruído		≤60dB(A)	
Altitude		4000m	
Consumo noturno		1W	
Topologia		Sem transformador	
Resfriamento		Ventilador de refrigeração	
Grau de proteção eletrônica		IP65	
Humidade relativa		0-100%	
Conexões CC		H4(OPT)	
Conexões CA		Terminal OI	
Características			
Exibição		OLED+LED/WIFI+APP	
Interfaces: Rs485/USB/WIFI		Sim/Sim/Sim	
Garantia: 5 Anos		Sim	
IEC61000-6/3,IEC62109-1/2,IEC62116,IEC61727, IEEET547, UL1741			

SHENZHEN GROWATT NEW ENERGY CO., LTD. 2nd & 3rd Floor, Building 4, Jiayu Industrial Zone, Xibianling, Shangwu Village, Shiyan, Baoan District, Shenzhen
T: + 86 755 2747 1900 F: + 86 755 2749 1460 E: info@ginverter.com

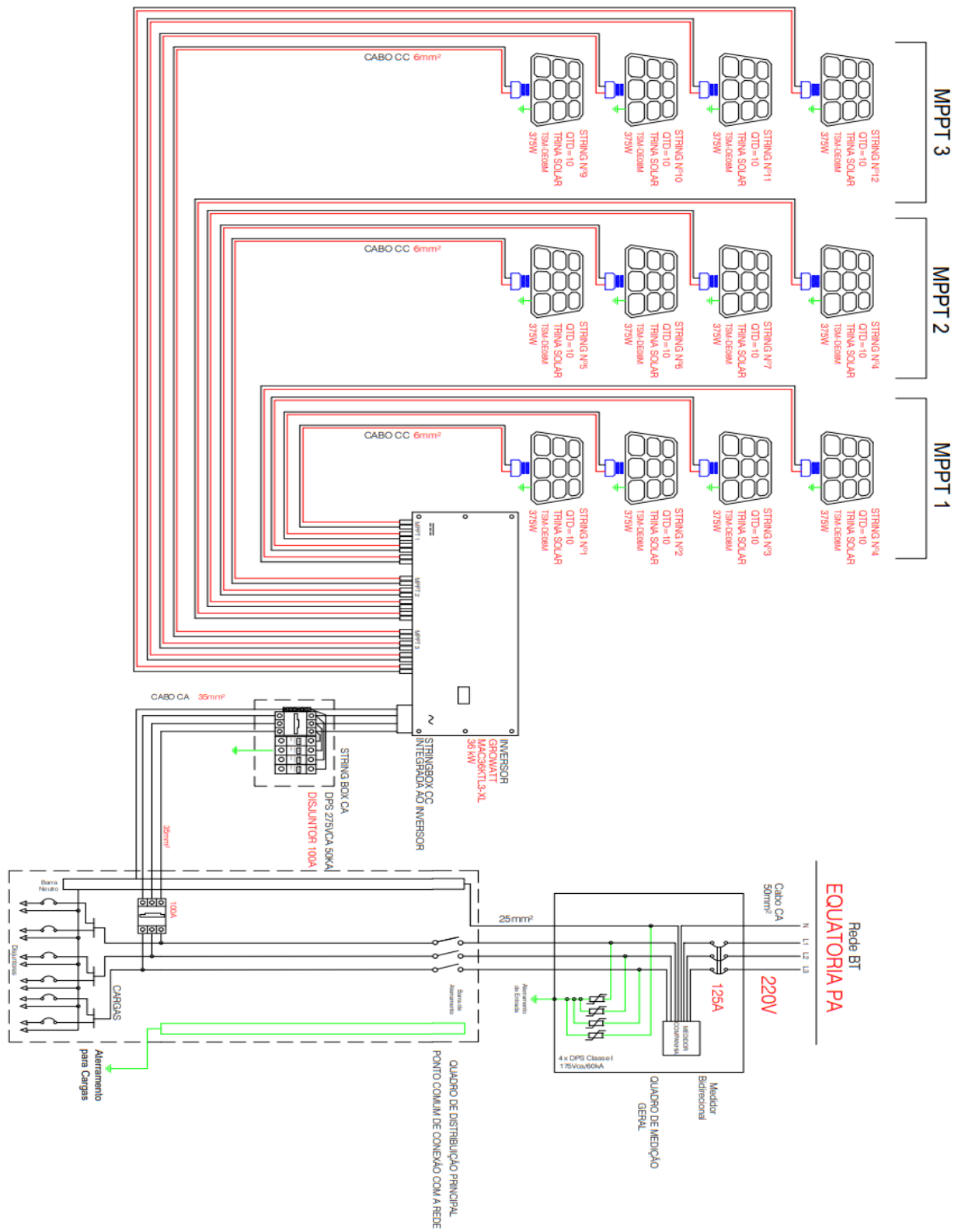
Fonte - GROWATT, (2020, <https://br.growatt.com/products/mac-15-36ktl3-xl>)

Anexo 3 – Diagrama Unifilar



<p>NOTAS</p> <ol style="list-style-type: none"> O PRESENTE PROJETO ATENDE AS NORMAS: ABNT NBR 5410:2004-INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO. RESOLUÇÃO NORMATIVA 687/2015 DA ANEEL, MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA. TODOS OS CONDUTORES SERÃO DE COBRE E CARACTERÍSTICAS DE ISOLAMENTO E ISOLAÇÃO CONFORME DIAGRAMA UNIFILAR E LISTA DE MATERIAIS CONFORME NBR 5410 TODOS OS RAMAIS ALIMENTADORES DE QUADROS TERÃO ISOLAMENTO - 0,6/1KV OS CONDUTORES DOS RAMAIS ALIMENTADORES DEVEM SER CONTÍNUOS SEM EMENDAS; TODOS OS CABOS DO TIPO CC POSSUEM PROTEÇÃO UV COM CERTIFICAÇÃO TÜV OS CONDUTORES DEVERÃO SER IDENTIFICADOS; 5.1 - FASE R E VCC+: VERMELHO. 5.2 - FASE S: BRANCO. 5.3 - FASE T E VCC-: PRETO. 5.4 - NEUTRO: AZUL CLARO. 5.5 - PE (TERRA): VERDE OU VERDE/AMARELO. 5.6 - RETORNO: AMARELO * PARA CONDUTORES DE SEÇÃO IGUAL OU SUPERIOR A 10,0MM², PODERÃO SER IDENTIFICADOS NAS EXTREMIDADES COM FITA ADESIVA NAS RESPECTIVAS CORES; 7. NA CAIXA DE MEDIÇÃO TERÁ A SEGUINTE MENSAGEM: "CUIDADO - GERAÇÃO DISTRIBUÍDA"; TODAS AS LIGAÇÕES COM EQUIPAMENTOS DEVERÃO SER FEITAS COM CONECTORES APROPRIADOS 	<p>Diagrama Unifilar do Sistema</p> <p>EMPRESA</p> <p>Projeto TCC</p> <p>RESPONSÁVEL TÉCNICO</p> <p>Lyandra Araújo da Silva</p> <p>INSTITUIÇÃO</p> <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ</p> <p>POTÊNCIA NOMINAL</p> <p>2257 kW</p> <p>DATA</p> <p>27/10/2021</p>
--	---

Anexo 4 – Circuito Elétrico



Fonte - elaborada pela autora