

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LUCAS DA CRUZ ROCHA

**ESTUDO DO POTENCIAL DE IMPLEMENTAÇÃO DE
USINAS FOTOVOLTAICAS NO *CAMPUS* DE SÃO
CARLOS DA UFSCAR**

SÃO CARLOS -SP
2024

LUCAS DA CRUZ ROCHA

**ESTUDO DO POTENCIAL DE IMPLEMENTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS NO
CAMPUS DE SÃO CARLOS DA UFSCAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes

São Carlos-SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the lower half of the page. It is intended for entering cataloging data.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

▪
▪

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Lucas da Cruz Rocha, realizado em 09/09/2024:

Profª. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes
DEQ - UFSCar

Profª. Dra. Fernanda Perpétua Casciotori
DEQ - UFSCar

Profª. Dra. Adriana Paula Ferreira
DEQ - UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Aparecido Avelino Rocha, que nos deixou em Agosto/2023.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de finalizar mais este ciclo, pois até aqui Ele me ajudou. Agradeço à minha mãe, Maria de Jesus, e ao meu pai, Aparecido Avelino Rocha, por toda a confiança que, às custas de uma enxada, permitiram que eu estudasse.

Agradeço a Cláudio Fernandes, Ana Ribeiro, André Ribeiro, Lucas Ribeiro, Eduardo Rodrigues, Aline Massarotto Rodrigues e Guilherme Conrado Oliveira, pessoas importantes em minha vida, por sempre zelarem pelo meu bem.

Agradeço a Marcelo Takata, Sandra Takata e Meline Gabriele, que, nos momentos em que me senti mais sozinho e perdido, me acolheram, estenderam a mão e me fizeram avançar.

Também agradeço aos amigos de graduação, Nathalia Martins, Pedro Cavalcante, Diana Wendy Ré Estanislau, Mayara Tiemi Fuziwara e Yuri Mitsuoka, pelo suporte durante a caminhada e por todos os ensinamentos, sem os quais jamais teria chegado até aqui.

Agradeço a todos os professores que tive em minha trajetória e aos companheiros do IFSP que apoiaram meus estudos. Destaco um agradecimento especial à professora Martinha, que, há mais de 10 anos, me incentivou no caminho dos estudos.

Agradeço aos amigos dessa longa estrada da vida: Arnaldo Rodrigues Júnior, Henrique Mortari, Gian Barbosa, Luís Artur Cunha, Murilo Herrera e Alice Mortari.

Agradeço à Profa. Dra. Fernanda Perpétua Casciotori, à Profa. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes e à Profa. Dra. Rosineide Gomes da Silva Cruz pelas inúmeras oportunidades e por todo o suporte durante e ao término da graduação.

Por fim, agradeço também ao Prof. Dr. Walter Libardi, ao Prof. Dr. Douglas Barreto e ao Prof. Dr. Márcio Merino por toda a disponibilidade e auxílio neste trabalho.

EPIGRAFE

Tanto esforço e sacrificio só pra eu estudar
Eu me lembro o meu pai dizia: Filho
As tristezas que eu passei você não vai passar.
(Eu me lembro - Lázaro).

RESUMO

Com a crescente demanda energética do país, em um contexto de crise hídrica que o Brasil enfrenta nos últimos anos, devido a períodos de secas prolongadas, a energia solar ganha destaque, sendo objeto de estudo em diversos campos da ciência, sobretudo nas áreas de engenharia. Diante desse contexto, a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) tem buscado desde 2017, projetos e estudos que explorem a tecnologia e os benefícios do uso de energia solar, com a submissão de Projetos de Desenvolvimento Institucional (ProDin) em editais oferecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), aprovados e implementados nas dependências de diversos *campus*, principalmente em São Carlos. Este trabalho de conclusão de curso realizou um levantamento de dados referentes aos ProDin com foco em estratégias voltadas para o uso de sistemas fotovoltaicos. Dessa forma foi possível reunir informações relevantes para futuras integrações energéticas. Como metodologia de execução, foram consultadas referências sobre o assunto, utilizando recursos como pesquisas em relatórios e interação com as pessoas envolvidas no ProDin 11.985 e 11.512. Para análise desses dados, foram utilizados *softwares*, ferramentas estatísticas e planilhas do *Google Sheets*. Além disso, foram explorados os conceitos de radiação térmica e radiação atmosférica solar, temas complementares à disciplina de “Fenômenos de Transporte II”. Os principais marcos de execução foram a coleta de dados sobre: a área disponível para instalação de painéis solares com base na localização geográfica; média anual de horas de sol; consumo energético da universidade; perfil de consumo e demanda; e tratamento dos dados coletados. Como resultado deste trabalho foi possível obter os dados necessários e realizar simulações e análises técnico-econômicas de implementação de sistemas fotovoltaicos nos telhados de departamentos do Centro de Ciências Exatas (CCET).

Palavras-chave: energia fotovoltaica; energia solar; fontes renováveis; módulo fotovoltaico.

ABSTRACT

Amid Brazil's increasing energy demand and persistent hydric crisis characterized by prolonged droughts, solar energy has emerged as a vital area of study within various scientific fields, particularly in engineering. Since 2017, the Federal University of São Carlos (UFSCar) has actively engaged in projects that explore the potential of solar energy technology and its benefits, submitting Institutional Development Projects (ProDin) to calls by the National Electric Energy Agency (ANEEL). These projects have been successfully approved and implemented across multiple campuses, especially in São Carlos. This thesis presents a comprehensive data survey on ProDin, concentrating on strategies for the utilization of photovoltaic systems. The methodology involved extensive literature reviews, research report analyses, and interactions with stakeholders from ProDin 11.985 and 11.512. Data analysis was conducted using statistical software and Google Sheets, while also examining concepts of thermal radiation and solar atmospheric radiation as complementary subjects to the course "Transport Phenomena II." Key data collected included the available area for solar panel installation based on geographic location, annual average sun hours, university energy consumption, consumption profiles, and data processing methodologies. The findings provided crucial insights for technical and economic simulations regarding the implementation of photovoltaic systems on the rooftops of departments in the Center for Exact Sciences (CCET)..

Keywords: photovoltaic energy; solar energy; renewable sources; photovoltaic module.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Consumo de energia elétrica no Brasil ao longo dos anos.	04
Figura 2: Fotografias de usinas fotovoltaicas instaladas na área norte da UFSCar.	08
Figura 3: Aplicabilidade da energia solar.	09
Figura 4: Representação do ângulo zenital.	14
Figura 5: Representação esquemática dos componentes da irradiância solar.	15
Figura 6: Piranômetro de termopilha (a) e piranômetro de fotodiodo (b)	16
Figura 7: Representação do efeito fotovoltaico dentro de uma célula fotovoltaica	18
Figura 8: Representação esquemática de um painel fotovoltaico	19
Figura 9: Curva de corrente tensão de um módulo comercial	20
Figura 10: Comparação entre GHI para condições de céu claro e nublado pelas horas do dia.	22
Figura 11: Influência do efeito do ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico.	24
Figura 12: Representação da Potência (P) em função da Tensão com efeito da temperatura.	26
Figura 13: Representação de fluxo de caixa em diagrama.	30
Figura 14: Representação de fluxo de caixa em quadro.	30
Figura 15: Fluxograma das etapas do trabalho de graduação.	33
Figura 16: Consumo de energia elétrica em kWh em 2017, 2018, 2019, 2022 e 2023.	36
Figura 17: Consumo de energia elétrica em MWh em 2023 no horário de ponta e fora de ponta.	36
Figura 18: Demanda contratada vs Demanda consumida em 2023 em Ponta e Fora de Ponta	37
Figura 19: Perfil energético da UFSCar em 2018.	38
Figura 20: Consumo de energia (MWh/ano) da UFSCar nos anos de 2017, 2018, 2019, 2022 e 2023.	37
Figura 21: Localização da UFSCar no <i>Google Earth</i> TM .	39
Figura 22: Estimativa da área de telhado por meio do <i>Google Earth</i> TM	40

Figura 23: Usina de geração de energia fotovoltaica em sistema de cobertura metálica no estacionamento do HU-UFSCar (Ebserh).	42
Figura 24: Exemplo de usina fotovoltaica da USP São Carlos.	42
Figura 25: GHI média anual (W/m^2) ao longo dos anos de 1987 a 2023.	43
Figura 26: Comparativo da Radiação Solar Média nos anos de 2020, 2021 e 2022 para as radiações GHI e GHI <i>Clearsky</i>	45
Figura 27: Comparação entre a radiação média anual (W/m^2) por hora entre GHI e GHI <i>Clearsky</i>	47
Figura 28: Comparação de geração de energia por usina fotovoltaica presente na UFSCar, entre um dia sem nuvens (a) e um dia com nuvens (b)	48
Figura 29: Localização do DEQ para utilização no PVsyst™.	50
Figura 30: Captura de tela PVsyst™ com informações sobre temperatura, orientação e inclinação.	52
Figura 31: Captura de tela PVsyst™ com informações sobre o módulo fotovoltaico.	53
Figura 32: Captura de tela PVsyst™ com informações sobre o envelhecimento	54
Figura 33: Estimativa de geração de energia elétrica (kWh) no DEQ por mês, a partir da simulação no PVsyst™.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Determinação do ângulo inclinação do módulo em função da latitude.	25
Quadro 2: Valores utilizados para estimativa do CEE no ProDin 11.985.	29
Quadro 3: Preço médio de kits fotovoltaicos em função da potência.	29
Quadro 4: Informações geográficas de alguns departamentos.	41
Quadro 5: Valores de GHI (kWh/m ² /dia) por fonte de dados.	49
Quadro 6: Valores de Temperatura nos anos de 2019, 2020, 2021 e 2022.	51
Quadro 7: Energia gerada por simulação para os departamentos do CCET.	56
Quadro 8: Fluxo de caixa para a simulação de instalação de um módulo 370 Wp no DEQ	57
Quadro 9: Cálculo de VPL e Payback para a simulação de instalação de um módulo 370 Wp no DEQ	58

LISTA DE SIGLAS

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
CCET - Centro de Ciências Exatas
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz
DEBE - Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva
DEciv - Departamento de Engenharia Civil
DEE - Departamento de Engenharia Elétrica
DEFMH - Departamento de Educação Física e Motricidade Humana
DEP - Departamento de Engenharia de Produção
DEMa - Departamento de Engenharia de Materiais
DEMec - Departamento de Engenharia Mecânica
DL - Departamento de Letras
DM - Departamento de Matemática
DC - Departamento de Computação
DCAm - Departamento de Ciências Ambientais
DEs - Departamento de Estatística
DQ - Departamento de Química
DF - Departamento de Física
EVA - Etileno-Vinil-Acetato
FAI - Fundação de Apoio Institucional ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite
GSA - Global Solar Atlas
IMS - Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System
IRENA - International Renewable Energy Agency
MERRA-2 - Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NREL - National Renewable Energy Laboratory

NSRDB - National Solar Radiation Database

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PEE - Programa de Eficiência Energética

ProDin - Projeto de Desenvolvimento Institucional

PU - Prefeitura Universitária

PSM - Physical Solar Model

RALIE - Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica

SeGEF - Secretaria Geral de Gestão do Espaço Físico

SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

TIR - Taxa Interna de Retorno

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

Unicamp - Universidade Estadual de Campinas

USP - Universidade de São Paulo

USE - Unidade Saúde Escola

VAE - Valor Anual Equivalente

VPL - Valor Presente Líquido

LISTA DE ABREVIações

Jan. Janeiro

Fev. Fevereiro

Mar. Março

Abr. Abril

Mai. Maio

Jun. Junho

Jul. Julho

Ago. Agosto

Set. Setembro

Out. Outubro

Nov. Novembro

Dez. Dezembro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 ENERGIA SOLAR NO BRASIL	2
2.1.1 Histórico e Potencial	2
2.1.2 Demanda de Energia no Brasil	3
2.1.3 Sistema on-grid e off-grid	5
2.1.4 Energia fotovoltaica na UFSCar	6
2.2 CONCEITOS DE RADIAÇÃO	9
2.2.1 Fundamentos de Radiação Térmica	9
2.2.2 Transferência de calor por radiação e efeito fotovoltaico	11
2.2.3 Tipos de Radiação Solar	12
2.2.4 Medição e coleta de dados	15
2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	17
2.3.1 Células Fotovoltaicas	17
2.3.2 Painel Fotovoltaico	18
2.3.3 Eficiência na conversão de Energia	20
2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM O RENDIMENTO	21
2.4.1 Irradiação Solar	21
2.4.2 Orientação e Ângulo de Inclinação	22
2.4.3 Temperatura	25
2.5 LEGISLAÇÃO	26
2.5.1 Resolução Normativa	26
2.5.2 ABNT e NR	27
2.6 FATORES ECONÔMICOS	28
2.6.1 Estimativa de Custos	28
2.6.2 Fluxo de Caixa	30
2.6.3 Valor Presente Líquido	31
2.6.4 Payback (Tempo de Retorno)	31
2.7 IMPACTO AMBIENTAL	31
2.7.1 Geração de Energia	32
2.7.2 Tempo de Vida e Descarte	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	33
3.2 COLETA DE DADOS E ANÁLISE FINANCEIRA	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 ENERGIA ELÉTRICA - UFSCAR	35
4.1.1 Consumo e Demanda	35
4.1.2 Perfil Energético	37
4.2 INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	39
4.2.1 Características Geográficas	39
4.2.2 Dados de Incidência Solar	43
4.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS	49

4.3.1 Pré-Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	49
4.3.2 Fluxo de Caixa e Payback (Tempo de Retorno)	56
5. CONCLUSÃO	60
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Em 2022, a população mundial atingiu 8 bilhões de pessoas. É inegável que a demanda por tecnologias para atender esse contingente em suas necessidades mais básicas, como alimentação, educação e moradia, é de extrema importância. (ONU NEWS, 2022). Para que essas necessidades básicas sejam atendidas, é necessário o uso de energia elétrica. No entanto, o esgotamento de recursos não renováveis é uma preocupação na atualidade.

O planeta Terra sofre com alterações climáticas provocadas pela ação antrópica nos ecossistemas, ocasionadas muitas vezes pela extração de recursos e pelo desgaste da camada de ozônio. No contexto dos desafios de desenvolvimento enfrentados pelo Brasil e pelo mundo, a Organização das Nações Unidas (ONU) estipula 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). É importante destacar que a ONU pretende obter resultados favoráveis para a agenda de 2030 (ONU, 2024).

Dentre esses objetivos, destaca-se principalmente o objetivo número 7, que é o de garantir energia limpa e acessível. Este objetivo visa assegurar o acesso a fontes de energia viáveis, sustentáveis e modernas para todos. Em um mundo com 8 bilhões de pessoas, é necessário uma fonte de energia com potencial para atender essa demanda. Diante disso, este trabalho de conclusão de curso busca explorar o potencial energético da energia solar, de modo a contribuir para o cumprimento deste objetivo (ONU, 2024).

Inserido no projeto de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), intitulado "Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos Orgânicos para Produção de Biogás e Integração com Energia Fotovoltaica: Impulsionando a Transição Energética Sustentável na UFSCar", este trabalho consiste em um compilado de análises relevantes para a continuidade do projeto, com foco na avaliação técnica e econômica do sistema fotovoltaico.

Além disso, nos últimos anos, a UFSCar participou de diversos editais, submetendo vários Projetos de Desenvolvimento Institucional (ProDin), nos quais angariou fundos para o investimento em energia fotovoltaica no *campus* São Carlos. Por isso, este trabalho faz parte de uma série de pesquisas e análises com o objetivo de auxiliar na transição energética.

Os objetivos deste trabalho foram avaliar técnica e economicamente um sistema de geração de energia fotovoltaico, por meio da estimativa do uso de energia na UFSCar. Isso incluiu a coleta de dados sobre a área disponível para a instalação de painéis solares, a localização geográfica, a média anual de horas de sol, o consumo energético da universidade, o perfil de consumo e a demanda.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

No Brasil e no mundo, a matriz energética é diversificada; no entanto, a maioria das fontes ainda não é renovável. As energias renováveis têm sido motivo de discussão no Brasil nos últimos anos. Com o esgotamento das fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural, associado aos efeitos climáticos adversos decorrentes de seu uso e produção, as energias renováveis ganham destaque (VILLALVA, 2012).

As fontes renováveis de energia são aquelas que podem ser consideradas inesgotáveis ou que se renovam com o tempo, como a energia hidrelétrica, eólica, oceânica, geotérmica, de biomassa e solar. Usualmente, as fontes renováveis de energia são associadas ao conceito de fontes limpas, que geram impactos ambientais de menor relevância após sua extração e utilização (VILLALVA, 2012).

A matriz elétrica do Brasil é composta, em sua maioria, por energia hidrelétrica. Segundo dados do relatório da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a matriz elétrica brasileira possui um potencial de geração de 232.348 MW, dos quais 47,3% provêm de fonte hidrelétrica, seguidos da energia solar, com 18,6%, e da energia eólica, com 13,2% (ABSOLAR, 2024).

A energia solar já se destacou no mercado e em pesquisas pela utilização de sistemas térmicos para aquecimento a partir da energia térmica do sol. No entanto, a energia solar também pode ser convertida em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, que transforma diretamente a energia da radiação solar em energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos (VILLALVA, 2012).

2.1.1 Histórico e Potencial

Em 2023, o Brasil ocupou o 6º lugar no ranking internacional dos maiores produtores de energia solar do mundo. Segundo dados adaptados pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), extraídos da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), o país possui uma capacidade instalada de 37,4 GW, ficando atrás apenas de países como China (609,3 GW), Estados Unidos (137,7 GW), Japão (87,1 GW), Alemanha (81,7 GW) e Índia (72,7 GW) (ABSOLAR, 2024).

Conforme o Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica (RALIE), a energia solar é o segmento da matriz energética brasileira com maior potencial de expansão, sendo cerca de 400% maior do que a energia eólica, a segunda

fonte com maior potencial até 2030. Prevê-se uma acumulação de aproximadamente 125.122,15 MW de potência oriunda da energia solar. O RALIE ainda prevê que a expansão ocorra principalmente nos estados das regiões Nordeste e Sudeste do país (ANEEL, 2024).

Além disso, de acordo com a ABSOLAR, a energia fotovoltaica no Brasil é consumida predominantemente pela classe residencial (48,38%), seguida pela classe Comercial e de Serviços (28,85%). Observa-se, portanto, que o setor público tem espaço para crescimento.

É inegável que a energia elétrica fotovoltaica atrai investimentos e possui potencial de expansão em território nacional. Em 2023, foram direcionados cerca de 11 bilhões em investimentos para o setor (GOV, 2024).

Os incentivos governamentais para a energia fotovoltaica iniciaram-se em 2003, com o programa Luz Para Todos, que tinha como objetivo principal o desenvolvimento e inclusão social, uma vez que existiam aproximadamente dois milhões de domicílios rurais não atendidos pelos serviços de energia elétrica. Desse modo, a utilização da energia fotovoltaica residencial ganhou espaço para desenvolvimento (GOV, 2024).

O potencial de utilização é imenso, uma vez que o país possui elevadas taxas de irradiação solar em todas as suas regiões. As regiões mais próximas da linha do Equador, como o Nordeste e o Centro-Oeste, possuem o maior potencial de aproveitamento, enquanto a região Sul, mais afastada, possui o menor potencial. É válido destacar que, apesar da menor quantidade de irradiação solar, a região Sul recebe mais irradiação do que países que utilizam energia solar em sua matriz energética, como a Alemanha (VILLALVA, 2012).

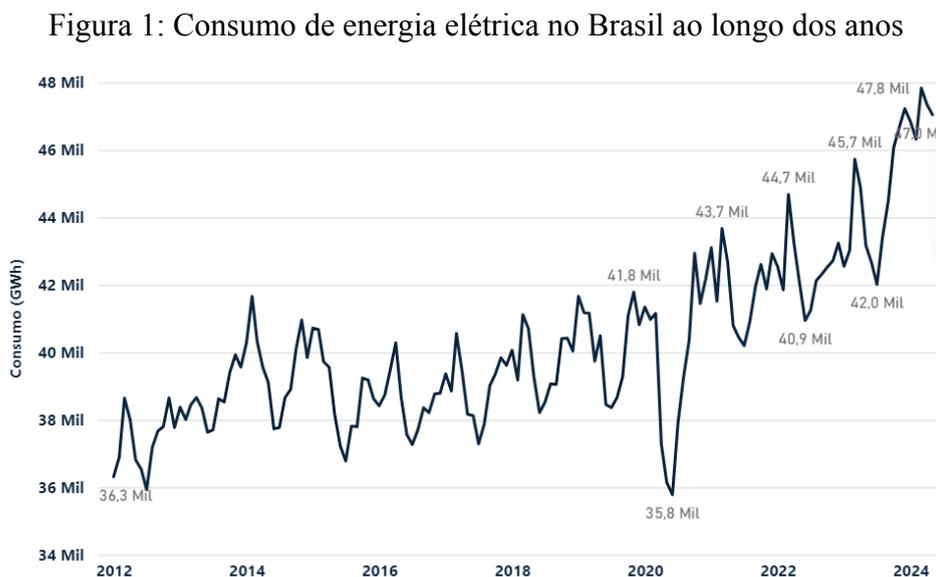
Apesar da quantidade considerável de irradiação solar, os principais obstáculos para a inserção da energia fotovoltaica como protagonista na matriz energética estão associados principalmente ao potencial hídrico não explorado no país, à ausência de regulamentação eficiente da energia fotovoltaica e aos incentivos econômicos do governo federal (VILLALVA, 2012). A partir de 2012, esse quadro começou a mudar significativamente, com regulamentações por meio de resoluções da ANEEL e a consideração do potencial fotovoltaico na matriz energética do país para 2020.

2.1.2 Demanda de Energia no Brasil

O Brasil é um país de grande extensão territorial (8.510.000 km²) e população (215,3 milhões de habitantes). Dessa forma, a demanda por energia elétrica é elevada. Em 2002, a crise energética conhecida como "apagão" foi ocasionada principalmente pela falta de oferta de energia elétrica em função da alta demanda (GOV, 2024).

Em 2012, o consumo de energia elétrica foi estimado em 36,3 mil GWh, enquanto em

2024 o consumo atingiu a marca de 47,8 mil GWh, evidenciando um aumento de aproximadamente 32%. Durante o auge do período pandêmico em 2020, houve uma queda no consumo de energia, uma vez que a classe industrial representa 30% da demanda energética e a classe comercial, 20% (EPE, 2024). A Figura 1 apresenta o consumo de energia elétrica no Brasil ao longo dos anos.



Fonte: Reprodução EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2024)

Desde então, o governo tem empreendido esforços para atender à demanda da população. Nesse contexto, a energia fotovoltaica destaca-se como uma das principais fontes limpas de energia, que podem ajudar a suprir as necessidades, além das fontes tradicionais (GOV, 2024).

Até 2012, as aplicações de energia fotovoltaica no país estavam relacionadas principalmente a sistemas elétricos em locais não atendidos pela rede elétrica convencional. Com a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da ANEEL, foram estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2024).

Segundo essa resolução, para microgeração, a definição adotada é a geração de energia elétrica com potência instalada de até 75 kW. Para minigeração, o padrão utilizado é para quando a potência instalada é superior a 75 kW. A resolução também define o sistema de compensação de energia, em que a energia gerada pelos consumidores pode ser injetada na rede de distribuição e posteriormente abatida do consumo de energia elétrica da rede. Desse

modo, incentiva-se o uso de fontes de energia renováveis, como a solar, na diversificação da matriz energética brasileira (VILLALVA, 2012).

A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da ANEEL, foi atualizada ao longo dos anos, sendo a mais recente a Resolução Normativa da ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Dentre as mudanças significativas, destacam-se as atualizações no cálculo do sistema de compensação de energia e os requisitos técnicos envolvidos nos projetos (ANEEL, 2024).

É importante destacar que a demanda de energia elétrica varia entre o horário de ponta e o horário fora de ponta. O horário de ponta é o período do dia em que a demanda por energia elétrica é mais alta e, conseqüentemente, o preço da tarifa é mais elevado. O horário fora de ponta compreende o período em que a demanda energética é menor, e o preço da tarifa, mais baixo (CPFL, 2024).

Segundo a Resolução Homologatória nº 3.183, de 4 de abril de 2023, o horário de ponta para a área de concessão da CPFL Paulista compreende o período entre as 18:00 e às 20:59. Por sua vez, o horário fora de ponta e o horário intermediário compreendem os demais horários dentro das 24 horas que compõem o dia (CPFL, 2024).

O consumo de energia é maior nas cidades do que no campo, especialmente em grandes capitais e metrópoles. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a região Sudeste é responsável por cerca de 50% do consumo da demanda energética do país. O estado de São Paulo é o maior consumidor do país, representando aproximadamente 30% da demanda brasileira nos setores industrial, comercial e residencial (EPE, 2024).

As universidades, como Unicamp, USP, UFSCar, entre outras, estão inseridas no setor de serviços públicos. Em 2023, esse setor foi responsável por 3,9% do consumo de energia elétrica do estado de São Paulo. Para efeitos comparativos, o setor de iluminação pública no mesmo período consumiu cerca de 1,94%, e o poder público, 2,12% (EPE, 2024)

2.1.3 Sistema *on-grid* e *off-grid*

Os principais sistemas fotovoltaicos são os sistemas *off-grid* e *on-grid*. Os sistemas *off-grid*, também chamados de sistemas fotovoltaicos autônomos ou isolados, têm independência em relação à rede elétrica pública, sendo ideais para locais remotos onde a rede elétrica não está disponível. Além disso, podem ser aplicados em iluminação pública, sinalização de estradas e alimentação de sistemas de telecomunicações (VILLALVA, 2012).

Esses sistemas utilizam baterias especiais para armazenar a energia gerada, sendo úteis para uso em dias nublados ou em períodos noturnos. Comparados aos sistemas *on-grid*, eles

possuem um custo inicial mais elevado e requerem atenção especial para evitar o esgotamento completo das baterias em períodos prolongados de baixa incidência solar. Os principais componentes de um sistema fotovoltaico *off-grid* são: módulo fotovoltaico, controlador de carga, bateria e inversor (VILLALVA, 2012).

Por sua vez, o sistema fotovoltaico *on-grid*, também chamado de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, tem como principal finalidade a geração de energia elétrica para consumo local, reduzindo ou até mesmo eliminando o consumo de energia da concessionária. Esses sistemas são vantajosos para a redução da conta de energia, pois quando o sistema gera mais energia do que o consumo, o excedente é enviado para a rede elétrica, podendo gerar remuneração ou créditos de energia por meio de uma política de compensação. Quando a energia gerada é menor que o consumo, a unidade que adota esse sistema não fica sem energia, pois, estando conectada à rede elétrica, a energia necessária será retirada da rede (VILLALVA, 2012).

O investimento inicial menor de um sistema *on-grid* está principalmente ligado à ausência da necessidade de baterias especiais para armazenamento da energia elétrica gerada. Dentre os principais componentes necessários estão: conjunto de módulos fotovoltaicos, sistemas de fixação, inversores para conexão à rede elétrica, quadros de distribuição e proteção da energia. A principal função do inversor é sincronizar o sistema elétrico com a infraestrutura pública, além de realizar a conversão da corrente contínua dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada. Em sistemas de microgeração e minigeração, como os utilizados por universidades, os inversores empregados são monofásicos com potência de até 5 kW (VILLALVA, 2012).

Considerando o cenário da UFSCar, os sistemas fotovoltaicos de interesse são os sistemas *on-grid*. O gasto com energia elétrica representa um percentual considerável das despesas orçamentárias da universidade (UFSCar, 2021). Assim, o sistema de compensação de energia torna-se atraente, pois a energia excedente injetada na rede é convertida em créditos de energia, que podem ser utilizados para abater o consumo de energia elétrica em períodos futuros, além de serem acumulados e posteriormente descontados da conta de energia elétrica.

2.1.4 Energia fotovoltaica na UFSCar

O *campus* de São Carlos da UFSCar possui uma área construída de mais de 205.006 m², atendendo 12.537 alunos em seus mais de 68 cursos presenciais. Devido a isso, a

demanda energética da universidade é elevada (SPDI, 2024). Diante desse cenário, desde 2017, a administração iniciou um processo de redução e otimização da conta de energia elétrica da universidade.

Por meio do Programa de Eficiência Energética (PEE), na chamada pública CPFL nº 001/2018, o coordenador do projeto, Prof. Dr. Walter Libardi, na época vice-reitor, conseguiu captar recursos para a aquisição de novos equipamentos para geração de energia através de painéis fotovoltaicos.

Os principais objetivos dos projetos ProDin estavam relacionados à maximização dos benefícios da energia economizada e à redução dos custos com consumo de energia elétrica. Para isso, as ações foram voltadas para promover a substituição do sistema de iluminação pela tecnologia LED e a instalação de usinas solares fotovoltaicas.

Dessa forma, os projetos submetidos conseguiram alcançar outros objetivos específicos, como o incentivo a estudantes e servidores à prática racional do uso de energia elétrica e a demonstração da importância de ações de eficiência energética.

Foram mais de 6 projetos submetidos, sendo 4 para o *campus* de São Carlos, 1 para o *campus* Araras e 1 para o *campus* Sorocaba. Neste trabalho, citamos dois projetos: o ProDin 11.512 e o ProDin 11.985.

O ProDin 11.512 obteve um investimento na ordem de R\$ 1.305.384,01 (um milhão trezentos e cinco mil trezentos e oitenta e quatro reais e um centavo) e, dessa forma, realizou a substituição de 11.400 lâmpadas tubulares e de bulbo por lâmpadas de tecnologia LED e a instalação de três usinas solares fotovoltaicas de 33,3 kWp no prédio da Unidade Saúde Escola (USE). O projeto foi executado pela Empresa Vitalis Energia (ProDin 11.512, 2022).

A energia gerada pela usina fotovoltaica no período de maio de 2020 a maio de 2021 foi registrada em 117.814 kWh, sendo que inicialmente havia sido prevista uma geração de 147.683 kWh. Com o projeto, a Universidade conseguiu atingir, no período referido, uma economia de energia de 486,029 MWh/ano, sendo que especificamente no horário de ponta, o resultado obtido foi de 119,35 kW (ProDin 11.512, 2022).

Por sua vez, o ProDin 11.985 realizou a troca de 15.000 lâmpadas tubulares e de bulbo por lâmpadas de tecnologia LED e instalou uma usina fotovoltaica com capacidade de 72,76 kWp. O investimento aprovado para a realização do projeto foi de R\$ 1.401.542,44 (um milhão, quatrocentos e um mil, quinhentos e quarenta e dois reais e quarenta e quatro centavos). A usina solar fotovoltaica foi instalada nos prédios de sala de aula da área norte, no mesmo local onde ocorreram as trocas de lâmpadas (ProDin 11.985, 2022).

A energia gerada pela usina fotovoltaica no período de setembro de 2020 a setembro de 2021 foi registrada em 105.084 kWh, sendo que inicialmente havia sido prevista uma geração de 110.139 kWh. Com este projeto, a Universidade conseguiu atingir, no período referido, uma economia de energia de 681,78 MWh/ano, sendo que especificamente no horário de ponta, o resultado obtido foi de 232,35 kW (ProDin 11.985, 2022).

Os resultados dos projetos refletiram diretamente no custo de energia da UFSCar, conforme explicitado em seus objetivos iniciais. Segundo o relatório de gestão de 2022, no ano de 2022, o *campus* São Carlos gerou aproximadamente 1 GWh de energia elétrica a partir dos sistemas fotovoltaicos. Esse valor representa cerca de 12,5% dos 8 GWh consumidos pela UFSCar no mesmo período, que geraram um custo total de R\$ 5.945.419,00 (ProDin 11.985, 2022).

É válido ressaltar que, no referido ano, houve o retorno das atividades presenciais no *campus* após o período pandêmico. Na Figura 2, são apresentadas fotografias da implementação das usinas fotovoltaicas obtidas por meio do ProDin.

Figura 2: Fotografias de usinas fotovoltaicas instaladas na área norte da UFSCar.



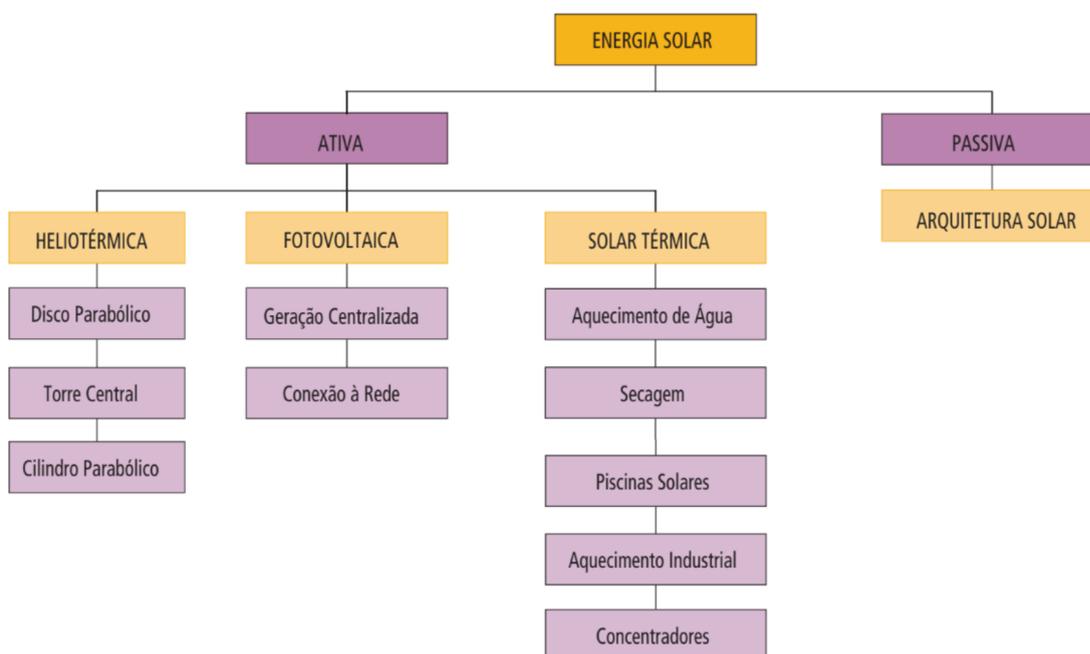
Fonte: Acervo Pessoal

Atualmente, diversas discussões e projetos de utilização de energia solar estão ocorrendo na UFSCar e áreas adjacentes, em grupos específicos formados por pessoas da Prefeitura Universitária (PU), Secretaria Geral de Gestão do Espaço Físico (SeGEF) e Fundação de Apoio Institucional ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FAI). Os temas são variados, abrangendo discussões acerca da adaptação dos telhados para a maximização da captação de energia, participação de editais da ANEEL com o envio de ProDin para a aquisição e instalação de painéis fotovoltaicos nas dependências do *campus* e hospital universitário.

2.2 CONCEITOS DE RADIAÇÃO

A energia solar possui diversas aplicações, principalmente nas áreas térmica e fotovoltaica. Por isso, é importante compreender as propriedades e conceitos de radiação para utilizá-la de acordo com sua melhor finalidade. A Figura 3 apresenta a utilização da energia solar em sua diversidade de aplicações.

Figura 3: Aplicabilidade da energia solar



Fonte: Adaptado - Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia, (Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético; 2007).

2.2.1 Fundamentos de Radiação Térmica

Na Engenharia Química, a aplicação da energia solar em sistemas térmicos é de extrema importância. No entanto, o fenômeno de transporte térmico associado à energia solar não deve ser confundido com o efeito fotovoltaico, como será abordado adiante.

Segundo Çengel e Ghajar (2012), a radiação é originada a partir da movimentação de campos elétricos e magnéticos gerados pela aceleração de cargas ou mudanças no fluxo de corrente elétrica. Dentro da engenharia química, a radiação térmica é objeto de estudo e, por definição, trata-se da radiação eletromagnética emitida a partir da transição de energia de moléculas, átomos ou elétrons dentro de uma substância.

Ainda de acordo com esses autores, dentro do estudo das propriedades da radiação, o fluxo de radiação que atinge uma superfície é denominado irradiação. Essa grandeza é representada por G . Todo corpo emite radiação, seja em menor ou maior intensidade, de acordo com suas características, de forma constante.

A irradiação pode ser absorvida, refletida ou transmitida pela superfície. A parte da irradiação que é absorvida por uma superfície é chamada de absortividade, representada por α . A parte que é refletida é denominada refletividade, representada por ρ . Finalmente, a parte que é transmitida é chamada de transmissividade, representada por τ . As Equações 1, 2 e 3 expressam matematicamente essas relações (ÇENGEL e GHAJAR, 2012):

$$\text{Absortividade: } \alpha = \frac{\text{Radiação Absorvida}}{\text{Radiação Incidente}} = \frac{G_{abs}}{G}; \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

$$\text{Reflexividade: } \rho = \frac{\text{Radiação refletida}}{\text{Radiação Incidente}} = \frac{G_{ref}}{G}; \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (2)$$

$$\text{Reflexividade: } \tau = \frac{\text{Radiação transmitida}}{\text{Radiação Incidente}} = \frac{G_{tr}}{G}; \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (3)$$

A refletividade está diretamente relacionada ao ângulo do raio incidente, mas também depende da direção do raio refletido. Sendo assim, é uma propriedade de natureza bidimensional. Ela pode ser classificada, na maioria dos casos, de duas formas: a primeira é conhecida como reflexão especular, quando o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência; a segunda é conhecida como reflexão difusa, na qual a radiação refletida é distribuída de forma igual em todas as direções (KREITH e BOHN, 2003).

Por sua vez, a absortividade é independente da temperatura da superfície, mas é fortemente afetada pela temperatura da fonte emissora. É importante ressaltar que a intensidade da emissividade de radiação de uma fonte depende da temperatura da superfície. A temperatura do Sol é estimada em 5.772 K, o que a torna uma excelente fonte emissora de radiação (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

O fenômeno de absortividade do material em função da temperatura depende das características do material. Por exemplo, metais tendem a aumentar sua absortividade com o aumento da temperatura da fonte, enquanto materiais não condutores elétricos tendem a ter uma redução na absortividade com o aumento da temperatura da fonte (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, a intensidade da radiação incidente sobre uma superfície, ou seja, a irradiação, é a somatória das frações absorvidas, refletidas e transmitidas, conforme a Equação 4 (INCROPERA, 2014).

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} = G \quad (4)$$

Para o estudo deste trabalho a parcela de Irradiação relevante é a parcela absorvida pela painéis fotovoltaicos, uma vez que energia absorvida é utilizada para excitar os elétrons no material fotovoltaico, gerando uma corrente elétrica. Em materiais convencionais a parcela de energia transmitida é perdida, no entanto em painéis com múltiplas camadas, parte da energia transmitida pode ser absorvida pelas demais camadas (VILLALVA, 2012).

2.2.2 Transferência de calor por radiação e efeito fotovoltaico

Como citado anteriormente, a energia solar, em sua forma de irradiação, possui duas aplicações práticas muito relevantes no campo da Engenharia, podendo ser utilizada para fins térmicos ou pelo efeito fotovoltaico.

A transferência de calor por radiação refere-se ao processo em que a energia térmica é emitida a partir de um corpo por meio de ondas eletromagnéticas e alcança outro corpo, sem a necessidade de um meio de propagação. O fluxo de energia emitido (W) é descrito pela Lei de Stefan-Boltzmann, desenvolvida a partir da consideração de um corpo negro, apresentada na Equação 5 (KREITH e BOHN, 2003).

$$W = \sigma T^4 \quad (5)$$

em que σ é chamada constante de Stefan-Boltzmann, com o valor aproximado de $5,6 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴, e T é a temperatura da superfície emissora em Kelvin.

Além disso, a eficiência do processo está relacionada à propriedade de emissividade do corpo emissor, mas principalmente ao fator de forma. O fator de forma é um parâmetro estabelecido para considerar o efeito das orientações das superfícies no processo de transferência. Assim como a reflexividade, ele pode ser classificado como difuso ou especular, sendo a forma difusa de maior interesse para a engenharia química. O fator de forma difuso representa a fração da radiação que deixa uma superfície e atinge diretamente a outra (KREITH e BOHN, 2003).

Na prática, a maioria das superfícies não se comporta como superfícies negras, mas sim como superfícies difusas ou cinzas. Por isso, é relevante analisar a transferência líquida de calor por radiação, que é utilizada para o aquecimento de sistemas térmicos. Para tal, a

energia total que deixa uma superfície por unidade de tempo e área, ou seja, a radiosidade, é considerada. Uma vez que todo corpo emite radiação e está apto a receber radiação, a transferência de calor líquida é representada pela Equação 6 (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

$$Q_{12} = R_{12} - R_{21} \quad (6)$$

Em que R_{12} é a radiação que deixa a superfície 1 e atinge a superfície 2 e R_{21} é a radiação que deixa a superfície 2 e atinge a superfície 1.

O resultado líquido da transferência de calor por radiação é responsável pelo aquecimento térmico utilizado. No próximo segmento deste trabalho, será explorada a relação entre o aumento da temperatura dos painéis fotovoltaicos e a transferência de energia térmica por radiação, uma vez que a fonte emissora é o Sol, ocorrendo como um efeito paralelo ao processo fotovoltaico que será detalhado a seguir (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

Enquanto a transferência de calor por radiação é um processo puramente térmico, o efeito fotovoltaico, foco deste trabalho, é um processo eletromagnético. Segundo Villalva (2012), o efeito fotovoltaico realiza a conversão direta da energia da luz em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a luz, na forma de radiação eletromagnética, incide sobre uma superfície composta por materiais semicondutores.

A luz penetra na célula fotovoltaica e sua energia é absorvida pelos fótons, que liberam elétrons e geram um campo elétrico composto por pares de elétrons e lacunas. Esse efeito, causado pela excitação dos elétrons, é potencializado pela estrutura das células fotovoltaicas, que será descrita mais adiante, em razão das junções das camadas P e N. Essas junções criam um caminho de separação entre os pares de elétrons e lacunas, gerando assim a energia elétrica (VILLALVA, 2012).

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel e tem uma relação estreita com o efeito fotoelétrico, descoberto por Albert Einstein em 1905. Graças ao método de fabricação de cristais de silício de Czochralski, desenvolvido em 1918, o Bell Labs conseguiu criar a primeira célula solar em 1954 (VILLALVA, 2012).

2.2.3 Tipos de Radiação Solar

O Sol pode ser considerado, a grosso modo, um corpo esférico de $1,39 \times 10^9$ m de diâmetro e massa aproximada de 2×10^{30} kg. Como abordado anteriormente, assim como todo corpo, ele é uma fonte emissora, e em decorrência da sua temperatura, emite energia de

radiação continuamente a uma taxa aproximada de $3,8 \times 10^{26}$ W (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

No entanto, em função da distância entre o Sol e o planeta Terra ser igual a $1,50 \times 10^{31}$ m, apenas $1,7 \times 10^{12}$ W atinge o nosso planeta (ÇENGEL e GHAJAR, 2012). Por definição, o fluxo de radiação que atinge a superfície e atmosfera terrestre é conhecido como irradiância solar total, representado por G , cujo valor é $1,373$ W/m² (VILLALVA, 2012).

A irradiação solar pode ser classificada a partir de suas componentes direta e difusa. Além disso, a influência de elementos presentes na atmosfera, como gases particulados, nuvens e poluição, afeta a intensidade da irradiação e sua direção, contribuindo para a classificação (PEREIRA et al., 2017).

A irradiância direta normal (G_n), conhecida como DNI (*Direct Normal Irradiation*), é a parte da irradiação solar que incide diretamente sobre a superfície terrestre, sem ser afetada pelos fatores atmosféricos. Sendo assim, ela é definida como a taxa de energia solar por unidade de área que incide perpendicularmente à superfície (PEREIRA et al., 2017).

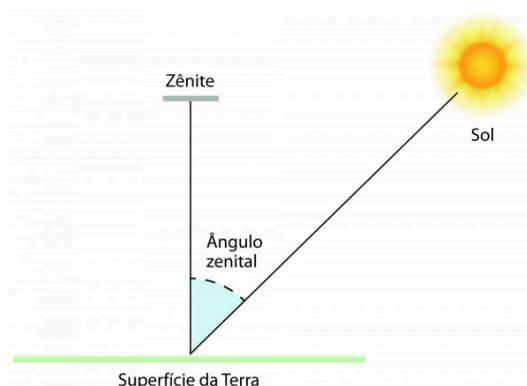
A irradiância difusa horizontal (G_{dif}), conhecida como DHI (*Diffuse Horizontal Irradiance*), é a parte da irradiação solar afetada pelos efeitos de difração da atmosfera sobre o feixe de luz incidente, que causam o espalhamento desse feixe. Portanto, é definida como a taxa de energia solar que incide sobre a superfície horizontal decorrente do espalhamento direto dos elementos da atmosfera, como moléculas e partículas (PEREIRA et al., 2017).

A irradiância direta horizontal (G_{dir}) é a parte do feixe solar que incide diretamente sobre a superfície. Matematicamente, é expressa pela Equação 7, onde Θ_z é o ângulo zenital (PEREIRA et al., 2017).

$$G_{dir} = G_n \cdot \cos(\Theta_z) \quad (7)$$

O ângulo zenital é o ângulo formado pela inclinação do Sol em relação à linha imaginária conhecida como zênite. Este ângulo é importante no cálculo da irradiação solar global, uma vez que é afetado pela altura solar e maximiza a intensidade solar quando seu valor é 0° (PEREIRA et al., 2017). A Figura 4 representa a formação do ângulo zenital.

Figura 4: Representação do ângulo zenital.



Fonte: Reprodução - Renan Alves, Canal CECIERJ, 2024.

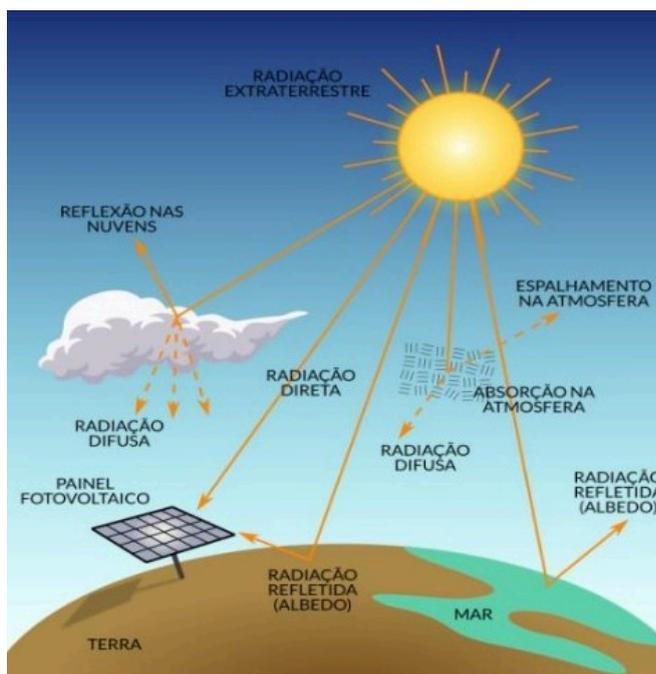
A irradiância global, conhecida como GHI (Global Horizontal Irradiance), é a somatória das radiações direta e difusa. Por definição, é a taxa total de energia solar que incide em um plano horizontal. Matematicamente, é expressa pela equação 8 (VILLALVA, 2012).

$$G = G_{\text{dif}} + G_{\text{dir}} \quad (8)$$

onde G_{dif} é a irradiância difusa horizontal e G_{dir} é a irradiância direta horizontal.

Outra irradiância relevante para o estudo de energia fotovoltaica é a irradiância de plano inclinado (G_i). Pela definição, ela representa a taxa de energia solar total incidente sobre um plano inclinado em relação à latitude em que ele está localizado na superfície terrestre. A irradiância de plano inclinado considera a orientação e o ângulo de inclinação do painel solar, o que pode influenciar significativamente a quantidade de energia capturada. A Figura 5 apresenta uma representação esquemática ilustrativa dos tipos de irradiação solar discutidos (PEREIRA *et al.*, 2017).

Figura 5: Representação esquemática dos componentes da irradiância solar.



Fonte: Reprodução - Instituto Solar, 2024.

A radiação refletida pode ser calculada por meio do albedo. Ele é definido como a medida da refletância de uma superfície, expressa como a razão entre a quantidade de radiação solar refletida e a quantidade total que incide sobre essa superfície. Apesar dos diversos componentes da irradiação solar, para a produção de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos, somente a irradiância horizontal global é relevante. Isso ocorre porque os percentuais das demais irradiações, que não estão inclusas no GHI, são muito pequenos em comparação ao da G_{dif} e da G_{dir} , a ponto de serem desprezíveis em cálculos de longos períodos. A irradiância solar na superfície terrestre atinge valores típicos na ordem de 1000 W/m^2 (VILLALVA, 2012).

2.2.4 Medição e coleta de dados

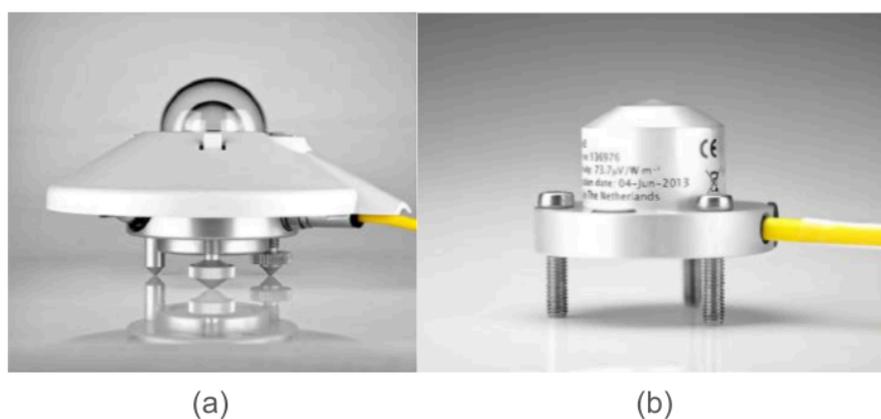
A captação e medição da intensidade da irradiação solar podem ser realizadas com o auxílio de alguns instrumentos específicos. Os mais comuns são sensores e sondas (VILLALVA, 2012).

O piranômetro de termopilha é um sensor que mede a irradiância solar e, por meio de uma termopilha, converte a energia térmica em energia elétrica. A termopilha é revestida com uma tinta preta especial para simular um corpo negro, de modo que toda a energia absorvida seja utilizada na transferência de calor, como descrito anteriormente. A partir da conversão da

energia solar em calor e, posteriormente, em diferença de potencial elétrico, essa diferença é proporcional à irradiância solar (PEREIRA *et al.*, 2017).

Outro instrumento relevante para a medição da irradiância solar é o piranômetro de fotodiodo. Este sensor, que possui uma célula semicondutora, converte diretamente a radiação solar em corrente elétrica, de forma proporcional. Diferente do piranômetro de termopilha, o piranômetro de fotodiodo é livre da inércia térmica, mas é mais sensível a ruídos e, portanto, mais afetado pelas condições climáticas, como céu claro ou totalmente nublado (PEREIRA *et al.*, 2017). O piranômetro de termopilha e o piranômetro de fotodiodo são apresentados na Figura 6:

Figura 6: Piranômetro de termopilha (a) e piranômetro de fotodiodo (b).



Fonte: Reprodução - PEREIRA *et al.*, 2017

A coleta de dados de irradiação solar é realizada por diversos laboratórios e organizações, tanto nacionais quanto internacionais. No Brasil, destacam-se algumas instituições. O Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), localizado em São José dos Campos no estado de São Paulo, realiza a coleta de dados por meio do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). O Atlas Brasileiro de Energia Solar foi idealizado por este laboratório e alimentado com dados coletados pela SONDA, com a participação de pesquisadores de diversas universidades (PEREIRA *et al.*, 2017).

Outra organização relevante no território nacional é o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), que recomenda o uso do programa SunData para o cálculo da irradiação solar diária e mensal em qualquer ponto do Brasil. Isso

fornece suporte para a simulação e o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Os dados do SunData são provenientes do LABREN (CRESESB, 2024).

No exterior, a *International Renewable Energy Agency* (IRENA), sediada nos Emirados Árabes Unidos, oferece suporte para a transição energética para fontes renováveis por meio da cooperação entre países. Inserindo as coordenadas geográficas, é possível obter informações e dados sobre a irradiância solar em diversos países (IRENA, 2024).

Outro órgão importante é o *Global Solar Atlas* (GSA), idealizado pelo *The World Bank* e pela *International Finance Corporation*. O GSA visa prover dados acessíveis sobre energia solar para o cálculo do potencial fotovoltaico, permitindo a inserção de coordenadas geográficas ou a seleção no mapa mundial (Global Solar Atlas, 2024).

Por fim, é válido destacar o *National Solar Radiation Database* (NSRDB), pertencente a cidade de Golden, no Colorado, nos Estados Unidos, que disponibiliza dados sobre os principais tipos de irradiação solar, como DHI, DNI e GHI, além de outras informações meteorológicas úteis para cálculos de potencial, como temperatura, pressão e ângulo zenital. (NSRDB, 2024).

O NSRDB também considera a influência das nuvens na coleta de dados, diferenciando as irradiações com base nas condições de céu limpo, como será abordado adiante neste trabalho. O NSRDB é modelado a partir do *Physical Solar Model* (PSM) do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e alimentado por diversos canais, como *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), *Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System* (IMS), *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e *Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2* (MERRA-2) (NSRDB, 2024).

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

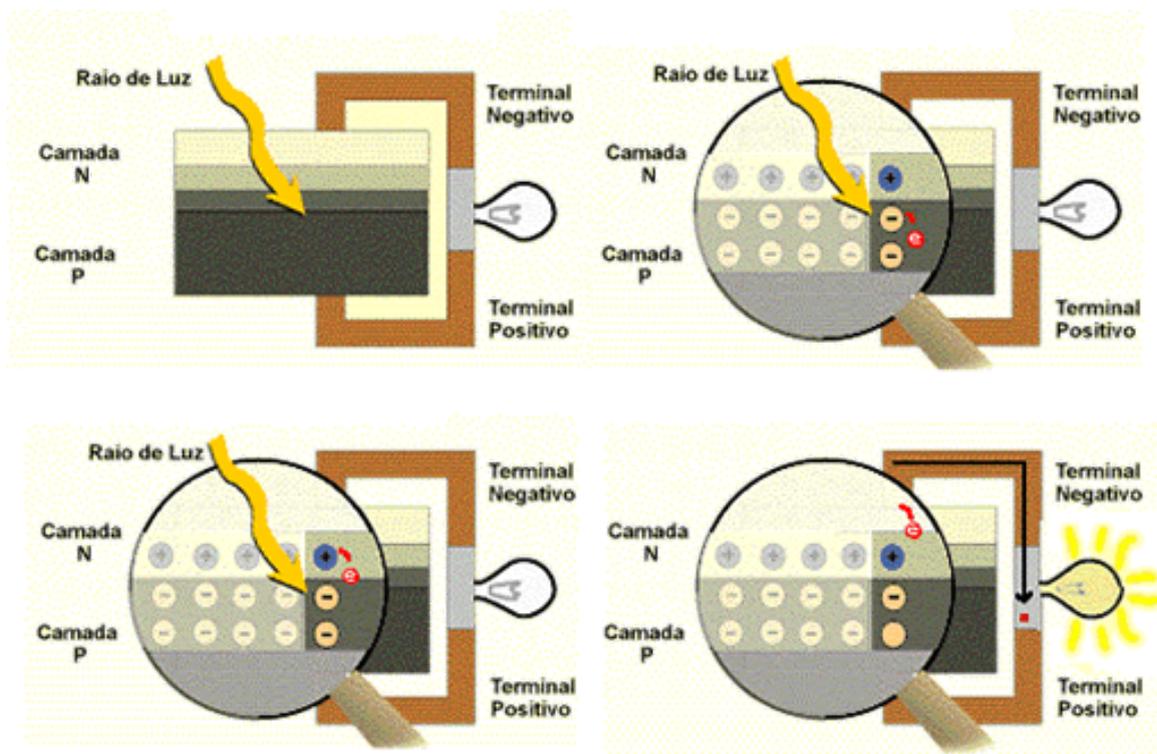
2.3.1 Células Fotovoltaicas

Como introduzido anteriormente, uma célula fotovoltaica é composta por uma junção de camadas de materiais semicondutores de tipo P e N. Em geral, o material da camada semicondutora N possui em sua estrutura um excesso de elétrons, enquanto o material da camada semicondutora P possui uma deficiência de elétrons (VILLALVA, 2012).

Devido a essa diferença de gradiente, durante o efeito fotoelétrico, os elétrons da camada N deslocam-se para a camada P, gerando assim um campo elétrico. Dessa forma, na camada P, forma-se o par elétron-lacuna e, após a união com a camada N, cria-se a junção semicondutora (VILLALVA, 2012).

Quando a junção semicondutora entra em contato com a energia solar, os elétrons excitados pela energia dos fótons são coletados por eletrodos metálicos em circuito fechado, gerando energia elétrica. Esse processo é ilustrado na Figura 7 (VILLALVA, 2012).

Figura 7: Representação do efeito fotovoltaico dentro de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Reprodução - CRESESB, 2024

A tecnologia envolvida na fabricação das células fotovoltaicas passou por diversas evoluções ao longo dos anos, e atualmente existem vários materiais empregados. Os mais comuns encontrados no mercado são silício monocristalino, silício policristalino e filme fino de silício (VILLALVA, 2012).

O silício é obtido a partir do quartzo, um material presente em abundância no território brasileiro, embora a purificação e fabricação das células não sejam realizadas no país. O material empregado e a tecnologia utilizada na fabricação das células afetam tanto a eficiência quanto o custo dos módulos comerciais (VILLALVA, 2012).

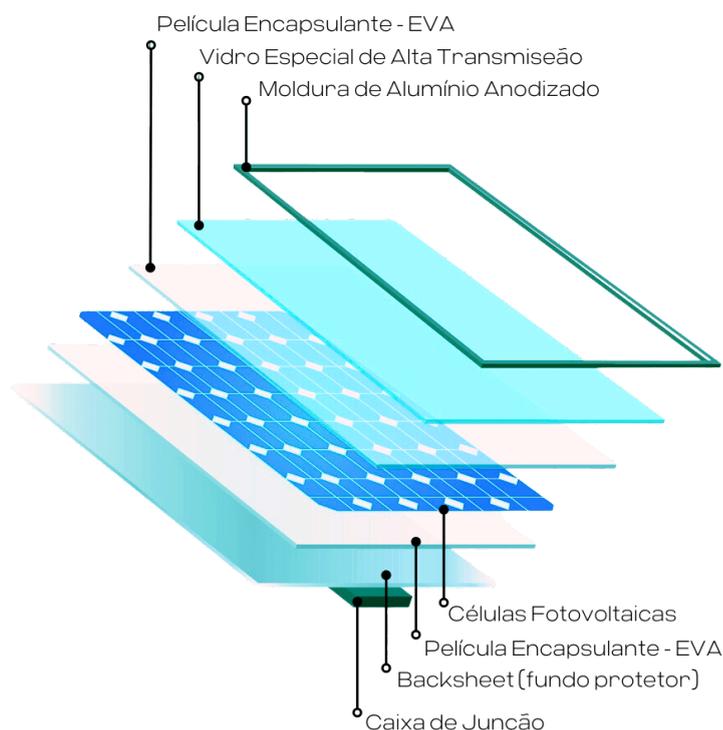
2.3.2 Painel Fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica produz energia elétrica; no entanto, a energia gerada por uma célula isolada é pequena e, muitas vezes, não é suficiente para atender à demanda necessária.

Para isso, são realizados agrupamentos de células para a constituição de painéis fotovoltaicos, também conhecidos como módulos ou placas, que são então comercializados. As células são agrupadas sobre uma estrutura que proporciona rigidez ao sistema, geralmente em série, com o objetivo de aumentar a tensão (VILLALVA, 2012).

A fabricação de um painel consiste em prensar as células e seus componentes dentro de lâminas plásticas, geralmente etileno-vinil-acetato (EVA), para garantir o isolamento elétrico, e recobri-las com lâminas de vidro temperado com baixo teor de ferro. Por fim, adiciona-se uma lâmina plástica multicamada, composta por poliéster, e uma moldura de alumínio ou poliuretano. As conexões elétricas do módulo são inseridas na parte traseira, com cabos elétricos padronizados, permitindo realizar mais conexões se necessário (VILLALVA, 2012). A Figura 8 apresenta a representação de um painel fotovoltaico.

Figura 8: Representação esquemática de um painel fotovoltaico



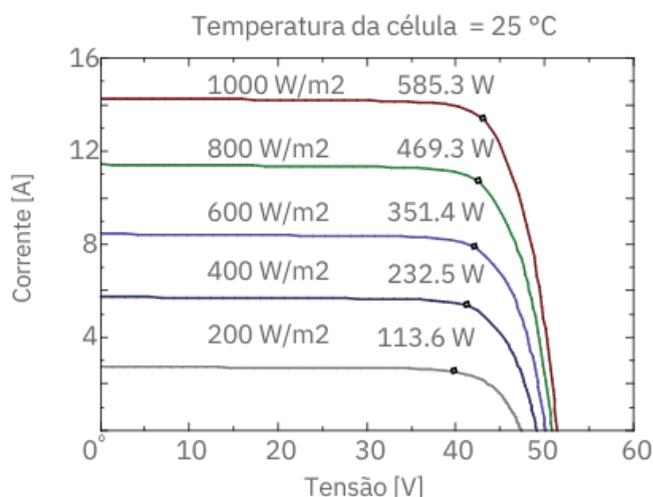
Fonte: Reprodução - Sunergia, 2024

Em média, um módulo fotovoltaico comercial possui entre 30 e 60 células, definidas de acordo com a sua classe de potência. A área dos módulos comerciais influencia

diretamente na quantidade de energia elétrica gerada, pois quanto maior a área de captação de energia solar, maior será a corrente fornecida (VILLALVA, 2012).

Cada módulo apresenta uma curva característica de corrente-tensão (curva I-V), que é influenciada por fatores como irradiação solar e temperatura, como será abordado adiante neste trabalho. A corrente de saída mantém um comportamento relativamente constante dentro da amplitude da tensão de funcionamento do módulo (VILLALVA, 2012). A Figura 9 apresenta a curva característica de um módulo comercial, onde é possível observar que quanto mais próximo do padrão de referência 1000 W/m², maior é a geração de energia. Além disso, após um certo ponto de tensão, definido como a tensão de circuito aberto, no qual o módulo fotovoltaico atinge sua eficiência máxima, a corrente diminui rapidamente.

Figura 9: Curva de corrente tensão de um módulo comercial.



Fonte: Reprodução - Sunergia, 2024

2.3.3 Eficiência na conversão de Energia

Como apresentado anteriormente, a conversão de energia solar e fotovoltaica é realizada através do efeito fotovoltaico presente na células de junção PN. A equação que rege a corrente gerada por uma célula fotovoltaica é apresentada na Equação 9 (ROGER e VENTR, 2017).

$$I = I_l - I_o \left(e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right) \quad (9)$$

em que I_c representa a corrente gerada pela luz, I_0 representa a corrente de saturação reversa, k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T é temperatura da célula em Kelvin, q é o valor da carga elétrica ($1,6 \times 10^{-19}$ C) (ROGER e VENTR, 2017).

Por sua vez, a corrente elétrica gerada pela luz solar é expressa matematicamente pela Equação 10, em que a área de captação de luz solar influencia proporcionalmente na corrente gerada, como elucidado anteriormente (ROGER e VENTR, 2017).

$$I_c = q G A \quad (10)$$

na qual, A é a área da célula solar, geralmente em m^2 e G é a irradiância solar (W/m^2) (ROGER e VENTR, 2017).

A potência elétrica de saída de uma célula fotovoltaica é calculada por meio da Equação 11, sendo resultado do produto entre a corrente e a tensão (FADIGAS, 2024).

$$P_{out} = I \times V \quad (11)$$

em que P_{out} é a potência de saída, I representa a corrente elétrica e V a tensão.

Por fim, a eficiência da fotoconversão de uma célula fotovoltaica pode ser definida pela expressão da Equação 12 (FADIGAS, 2024).

$$\eta = \frac{\text{Potência elétrica fornecida pela célula}}{\text{Potência da irradiação solar incidente}} \quad (12)$$

Como veremos adiante, existem alguns fatores que influenciam na eficiência da energia elétrica, tais como a quantidade de irradiação solar, posicionamento do módulo fotovoltaico e temperatura.

2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM O RENDIMENTO

2.4.1 Irradiação Solar

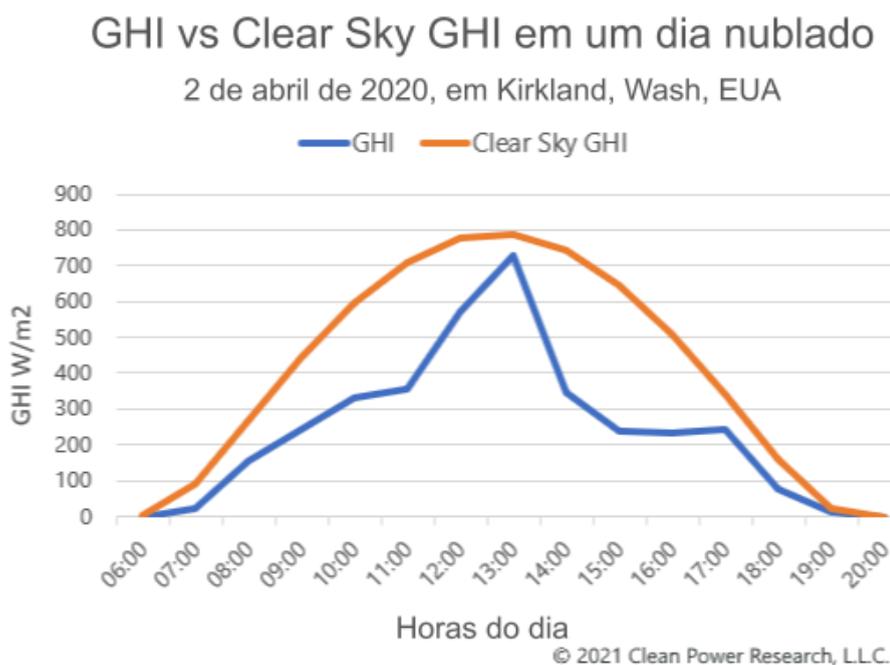
A energia contida na irradiação solar é o principal fator que influencia na eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica. De maneira geral, pode-se assumir que o Sol, no hemisfério sul, geralmente nasce por volta das 6h00 e se põe por volta das 18h00, fornecendo assim uma média diária de aproximadamente 12 horas de luz solar. A intensidade da luz varia ao longo do dia, de acordo com o ângulo zenital. Portanto, no período entre

18h00 e 6h00, a captação de energia solar é mínima (VILLALVA, 2012). É importante destacar que o Sol nasce em posições e horários diferentes em cada dia do ano, devido aos movimentos da Terra, como será abordado adiante.

A captação máxima de energia solar ocorre quando o ângulo zenital é zero, próximo ao meio-dia. Esses horários são afetados pelas convenções de horário de verão no Brasil, bem como pela estação do ano. Além disso, a presença de nuvens interfere diretamente na captação da luz solar. A radiação em céu claro, também conhecida como *clear sky*, é maior do que em céu nublado, uma vez que os raios solares conseguem atravessar a atmosfera com mais facilidade (PEREIRA et al., 2017).

A Figura 10 apresenta o valor da intensidade da irradiação solar ao longo dos horários de um dia, comparando um dia com céu claro e um dia com céu nublado, onde é possível observar como o perfil de irradiação é alterado em função destes elementos.

Figura 10: Comparação entre GHI para condições de céu claro e nublado pelas horas do dia.



Fonte: Adaptado - SolarAnywhere, Clean Power Research, LLC; 2024

2.4.2 Orientação e Ângulo de Inclinação

O planeta Terra segue uma trajetória elíptica no movimento de translação ao redor do Sol. Além da translação, a Terra realiza outros dois movimentos importantes: a rotação e os movimentos do eixo.

A Terra está inclinada em $23,5^\circ$ em relação ao seu eixo de rotação, o que faz com que os hemisférios norte e sul se aproximem ou se afastem mais do Sol ao longo do ano. Essas movimentações são responsáveis pela definição das estações do ano — primavera, verão, outono e inverno — que influenciam diretamente nos horários de captação da energia solar (VILLALVA, 2012).

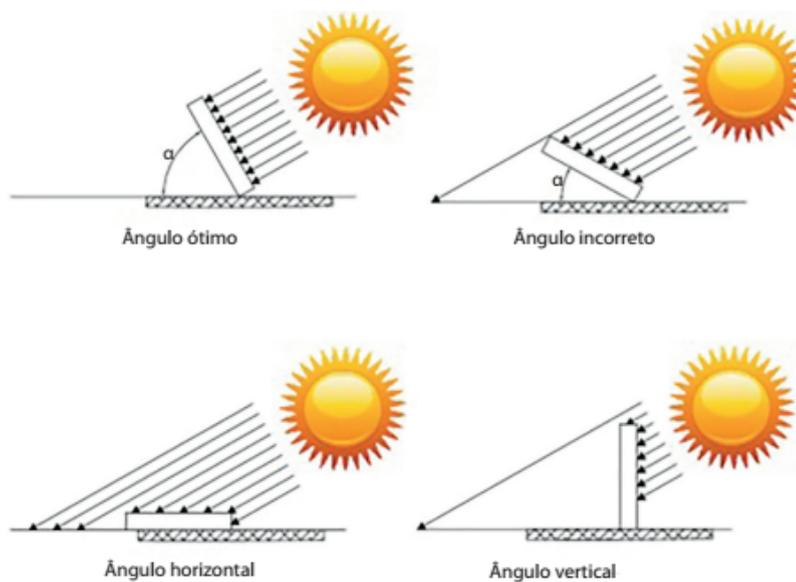
No verão, os dias tendem a ser mais longos, enquanto no inverno, a duração dos dias é mais curta, resultando em menos horas disponíveis para a captação da energia solar. Como consequência da inclinação da Terra, ocorre a declinação solar, definida como o ângulo dos raios solares em relação ao plano da linha do Equador. Dessa forma, nos solstícios, esse ângulo é máximo, enquanto nos equinócios, o ângulo é mínimo, com os raios solares praticamente incidindo de forma paralela ao plano (VILLALVA, 2012).

Assim, o Sol nasce e se põe em posições diferentes no céu e segue uma trajetória com inclinação variável a cada dia do ano. Nesse contexto, a altura solar é importante para a análise da inclinação dos raios solares, sendo este o ângulo de inclinação da trajetória solar com o plano horizontal (VILLALVA, 2012).

Todos esses fatores são extremamente importantes para a definição da orientação das faces dos módulos fotovoltaicos. Para maximizar a produção média diária de energia, o módulo fotovoltaico deve ser instalado com a face voltada para o norte geográfico. A instalação do módulo voltado para o sul geográfico é equivocada, pois os raios solares praticamente não atingem o módulo nessa posição (VILLALVA, 2012).

Além da orientação da face, o ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos é crucial para a eficiência da captação da irradiação solar. A Figura 11 representa como o ângulo de inclinação do módulo pode afetar consideravelmente a captação dos raios solares.

Figura 11: Influência do efeito do ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico.



Fonte: Reprodução - Instituto Solar, 2024

Para a escolha do ângulo de inclinação, a regra adotada pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos consiste em utilizar a latitude geográfica do local, segundo o Quadro 1.

Quadro 1: Determinação do ângulo inclinação do módulo em função da latitude.

Latitude Geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0 a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: VILLALVA; 2012

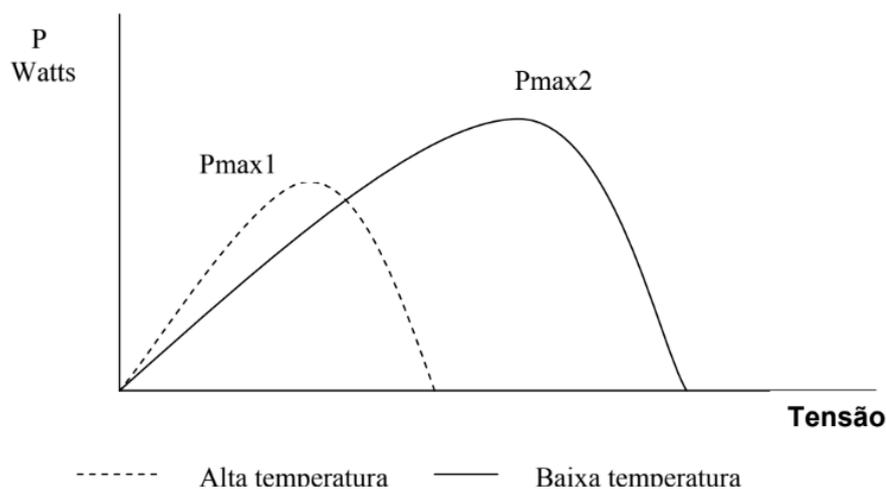
É importante destacar que, para ângulos de inclinação inferiores a 10°, há o risco de acúmulo de poeira ou outros materiais sobre a superfície das células fotovoltaicas, o que compromete a captação efetiva dos raios solares. Além disso, como explicado neste tópico, a inclinação horizontal do módulo fotovoltaico favorece a captação no verão, enquanto a inclinação vertical favorece a captação no inverno (VILLALVA, 2012). Portanto, não é possível maximizar a captação de energia solar apenas com um ângulo de inclinação fixo do módulo.

2.4.3 Temperatura

Como introduzido anteriormente, durante a captação de raios solares pelas células fotovoltaicas, a transferência de calor por radiação ocorre paralelamente. A depender da temperatura do ambiente, essa transferência de calor pode aumentar a temperatura do módulo e assim influenciar no rendimento (FADIGAS, 2024).

Em temperaturas mais baixas, a tensão do módulo é maior, enquanto em temperaturas mais altas, a tensão do módulo é menor. Desse modo, a potência fornecida pode ser menor em decorrência da tensão, já que a corrente elétrica sofre pequenas alterações pela temperatura, mas a potência é o produto entre a tensão e corrente no módulo (FADIGAS, 2024). A Figura 12 representa como a influência da temperatura afeta a potência do módulo.

Figura 12: Representação da Potência (P) em função da Tensão com efeito da temperatura.



Fonte: Reprodução - Energia Solar Fotovoltaica - FADIGAS, 2024.

2.5 LEGISLAÇÃO

Com relação a regularização do uso de energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos no Brasil, existem dois tipos de documentos relevantes, as normas técnicas e regulamentares, bem como as resoluções normativas da ANEEL, sendo esta última a de maior interesse para os sistemas fotovoltaicos.

2.5.1 Resolução Normativa

O uso de energia fotovoltaica no Brasil é regulamentado pela ANEEL por meio de resoluções normativas. A primeira resolução significativa para a energia fotovoltaica é a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, que estabeleceu as condições básicas para o uso e instalação de microgeradores e minigeradores de energia fotovoltaica, bem como os limites de microgeração das usinas e as regras de uso do sistema de compensação de créditos (ANEEL, 2012).

Essa resolução foi atualizada pela Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, na qual foram inseridas novas modalidades de geração de energia, incluindo condomínios, consórcios e energia compartilhada. Além disso, essa resolução expandiu as regras estabelecidas no sistema de compensação de créditos da resolução anterior, permitindo o compartilhamento de créditos entre pessoas residentes em um mesmo condomínio (ANEEL, 2015).

A Resolução nº 687 recebeu uma pequena alteração na Resolução Normativa nº 786, de 17 de outubro de 2017. Esta última incluiu medidas protetivas, de operação e controle dos sistemas fotovoltaicos *on-grid*, além de estabelecer critérios técnicos para a avaliação de qualidade dos sistemas (ANEEL, 2017).

Durante a pandemia, a ANEEL divulgou uma atualização das resoluções normativas anteriores, com a publicação da Resolução Normativa nº 878, de 24 de março de 2020, com o enfoque em implementar medidas para preservar a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica em decorrência da calamidade pública causada pela pandemia de coronavírus (ANEEL, 2020).

Por fim, a Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, atualizou as resoluções anteriores, estabelecendo as condições gerais para o acesso de microgeradores e minigeradores distribuídos aos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2021).

Em consonância com o Marco Legal da Geração Distribuída (Lei 14.300/22), os parâmetros foram atualizados para diferenciar entre a potência de microgeração e minigeração. Para sistemas de microgeração distribuída, a potência instalada, em corrente alternada, deve ser menor ou igual a 75 kW, enquanto para sistemas de minigeração, a potência instalada, em corrente alternada, deve ser maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW (GOV, 2022).

2.5.2 ABNT e NR

Dentro do contexto de energia fotovoltaica, existem quatro normas relevantes para a instalação de módulos. A primeira é a NR 10, intitulada "Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade", que apresenta medidas de segurança para serviços e instalações elétricas e serviços com eletricidade (NR, 2019).

Além dela, existe a ABNT NBR 16690, intitulada "Instalações Elétricas de Arranjos Fotovoltaicos — Requisitos de Projeto", que aborda os requisitos mínimos para a execução de projeto, instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, com destaque para o cálculo e dimensionamento dos componentes do sistema, como inversores, módulos, cabos, proteções elétricas e estrutura de suporte (ABNT, 2024).

Outra NBR relevante é a ABNT NBR 16274, intitulada "Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede — Requisitos Mínimos para Documentação, Ensaio de Comissionamento, Inspeção e Avaliação de Desempenho", que estabelece os requisitos de documentação necessária para a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede;

requisitos mínimos para a inspeção e os ensaios de comissionamento; e, por fim, a avaliação de desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede após o início da operação (ABNT, 2024).

Por fim, a ABNT NBR 5410, intitulada "Instalações Elétricas de Baixa Tensão", estabelece as regras e condições para as instalações elétricas de baixa tensão, com o intuito de garantir a segurança de seres vivos (ABNT, 2024). Como uma usina fotovoltaica convencional é uma instalação elétrica de baixa tensão, ela precisa se adequar a esta norma.

2.6 FATORES ECONÔMICOS

Para realizar a análise de investimento em energia proveniente de sistemas fotovoltaicos, é importante considerar alguns fatores econômicos relevantes, como a estimativa de custos iniciais, a geração de energia do sistema e o tempo de retorno sobre o investimento. Diante disso, alguns conceitos e métodos de engenharia econômica precisam ser selecionados de forma coerente com o sistema.

2.6.1 Estimativa de Custos

Os custos envolvidos na instalação de um sistema de geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos podem variar de acordo com a quantidade de células utilizadas. No entanto, o custo de um sistema fotovoltaico pode ser obtido por meio de orçamento com empresas especializadas ou até mesmo por simulação em sites especializados, utilizando os dados disponíveis de geração. Atualmente, o mercado oferece muitas opções de venda dos módulos e de seus materiais complementares. A partir das especificações dos módulos, é possível encontrar os valores de projeto em catálogos.

A estimativa de custos é essencial para calcular o tempo de retorno do investimento. Durante a execução do ProDin 11985 e ProDin 11512, a estimativa dos custos foi comparada à redução do custo de energia, considerando as tarifas envolvidas nas contas de energia. Essa estimativa, sob a ótica do consumidor da redução do custo de energia, é calculada pela Equação 13.

$$CEE = \frac{(TUSD + TE)}{1 - (ICMS + PIS + CONFINS)} \quad (13)$$

em que CEE representa o Custo Evitado de Energia, TUSD e TE são as tarifas energéticas definidas pela concessionária, ICMS, PIS e CONFINS são os impostos incidentes. Por

exemplo, o CEE do ProDin 11985 foi estimado em R\$ 419,45/MWh. Os valores utilizados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Valores utilizados para estimativa do CEE no ProDin 11.985.

Variáveis Prodin 11985	Valores
ICMS (alíquota Estado de São Paulo)	18,00%
PIS (média dos últimos 12 meses)	0,93%
COFINS (média dos últimos 12 meses)	4,31%
TE Tarifa de Energia na ponta, Bandeira Verde, Resolução Homologatória 2570/2019	R\$ 231,15/MWh
TUSD Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição, Resolução Homologatória 2570/2019	R\$ 72,25/MWh
CEEoc Custo Unitário Evitado de Energia sob a ótica do Consumidor. R\$/MWh 419,45	R\$ 419,45/MWh

Fonte: Adaptado - ProDin 11985

O Quadro 3, apresenta os preços médios de um sistema fotovoltaico, a partir da geração de energia requerida.

Quadro 3: Preço médio de kits fotovoltaicos em função da potência.

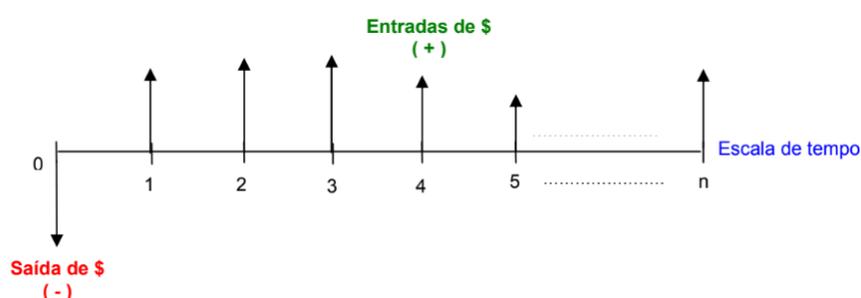
Potência do gerador solar	Preço médio
2 kWp	R\$ 7.740,00
4 kWp	R\$ 12.680,00
8 kWp	R\$ 21.360,00
12 kWp	R\$ 30.480,00
30 kWp	R\$ 72.600,00
50 kWp	R\$ 122.500,00
75 kWp	R\$ 202.500,00
150 kWp	R\$ 394.500,00
300 kWp	R\$ 774.000,00
500 kWp	R\$ 1.305.000,00
1 MWp	R\$ 2.700.000,00
3 MWp	R\$ 7.890.000,00
5 MWp	R\$ 13.250.000,00

Fonte: Reprodução - Portal Solar, 2024.

2.6.2 Fluxo de Caixa

Para realizar uma análise econômica e, posteriormente, uma avaliação de viabilidade, é necessário estabelecer um fluxo de caixa. Ele é elaborado a partir do registro de entradas e saídas, começando com o investimento inicial no período zero e sendo diagramado ao longo dos períodos em que os recebimentos e desembolsos ocorrem. Existem várias maneiras de representar esquematicamente o fluxo de caixa, sendo que as mais comuns são em formato de diagrama ou de quadros (NOGUEIRA, 2011). A Figura 13 apresenta a representação do fluxo de caixa em forma de diagrama.

Figura 13: Representação de fluxo de caixa em diagrama.



Fonte: Reprodução - NOGUEIRA, 2011

Como pode-se observar, o diagrama de fluxo de caixa para longos períodos pode tornar difícil a mensuração dos valores em função dos aspectos visuais, apesar de ser muito útil para entender quando há a saída e a entrada de capital. A figura 14, apresenta o fluxo de caixa no formato de quadro.

Figura 14: Representação de fluxo de caixa em quadro

Período	Entradas	Saídas	Saldo
0		-60.000	-60.000
1	16.142		16.142
2	16.142		16.142
3	16.142		16.142
4	16.142		16.142

Fonte: Reprodução - NOGUEIRA, 2011

Por sua vez a representação de fluxo de caixa em formato de quadro facilita a obtenção do saldo por período, além de simplificar as informações para o cálculo de *payback*. Portanto, para o presente trabalho, a forma mais adequada é a utilização de quadros.

2.6.3 Valor Presente Líquido

A partir do fluxo de caixa, é necessário utilizar um método de análise e seleção de alternativas de investimentos para compreender economicamente o investimento em energia fotovoltaica. Um dos métodos mais recomendados é o Valor Presente Líquido (VPL). Esse método consiste em avaliar o resultado do investimento, transferindo todos os valores do fluxo de caixa para a data zero e corrigindo-os pelas taxas de juros correspondentes, geralmente a Taxa Mínima Atrativa de Retorno (TMAR). O VPL é importante porque o valor do dinheiro se modifica ao longo do tempo devido às taxas de juros. Matematicamente, o conceito de VPL é expresso pela Equação 14 (NOGUEIRA, 2011).

$$\text{VPL} = \sum_{j=0}^n \left(\frac{X_j}{(1+i)^j} \right) \quad (14)$$

em que X representa os valores do fluxo de caixa, j o período inicial, n o período final, e i a taxa de juros, representada pela TMAR.

2.6.4 Payback (Tempo de Retorno)

A partir do Valor Presente Líquido (VPL), é possível estimar o resultado líquido do investimento no período zero. No entanto, outro conceito essencial para analisar investimentos é o tempo de retorno, conhecido como *Payback*. Esse método consiste em somar o fluxo de caixa ao longo de um período, geralmente em anos, para identificar o momento em que o capital investido no período zero é recuperado pelos retornos financeiros positivos gerados pelo investimento (NOGUEIRA, 2011).

Este método, isoladamente, fornece uma verificação rápida sobre o investimento. No entanto, não é recomendado ser utilizado de forma isolada, pois simplesmente soma os capitais em momentos diferentes. Para que a análise do *Payback* seja efetiva, é importante realizar a correção do fluxo de caixa em cada período de tempo pelo VPL ou utilizar outros métodos, como o Valor Anual Equivalente (VAE) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Esses métodos ajudam a considerar o valor do dinheiro no tempo e fornecem uma visão mais precisa da viabilidade econômica do investimento (NOGUEIRA, 2011).

2.7 IMPACTO AMBIENTAL

Apesar de ser uma fonte renovável de energia, a geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos não é isenta de impactos ambientais. Embora esses impactos sejam

geralmente menos significativos em comparação com outras fontes de energia, eles ainda estão presentes, principalmente relacionados à geração da energia e ao descarte dos componentes dos sistemas fotovoltaicos.

2.7.1 Geração de Energia

Os impactos ambientais relacionados à geração de energia são mais significativos em usinas de grande escala, principalmente devido ao uso extensivo da terra para a instalação dos sistemas fotovoltaicos. Como a quantidade de energia gerada está diretamente relacionada à área de captação solar, usinas que produzem grandes quantidades de energia exigem vastas áreas físicas. Para preparar o local para a construção dessas usinas, pode ser necessário realizar a terraplanagem do terreno, o que pode afetar negativamente a fauna e a flora locais (FATOR SOLAR ENERGIAS RENOVANTES, 2024).

2.7.2 Tempo de Vida e Descarte

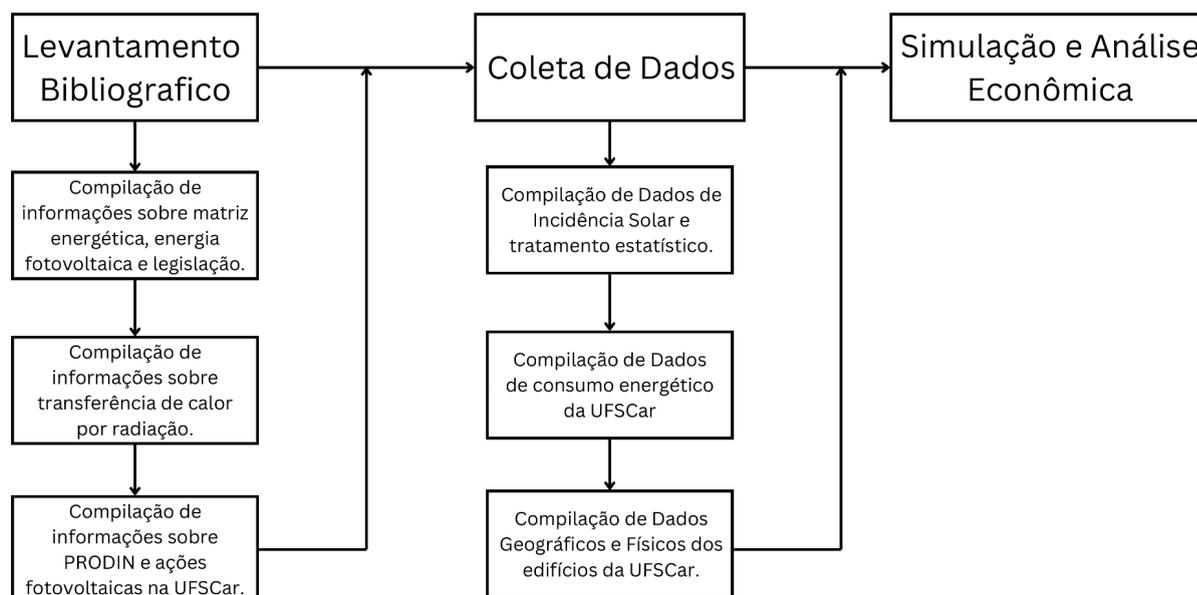
Outro impacto relevante a ser considerado é o descarte dos materiais utilizados na construção dos módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil. Em média, os módulos comerciais têm uma vida útil de cerca de 25 anos. No Brasil, a tecnologia de reciclagem para esses painéis ainda está em desenvolvimento, e a logística reversa não é tão avançada. Como resultado, o descarte é frequentemente gerenciado pelos próprios fabricantes. Este cenário se deve ao fato de que a tecnologia fotovoltaica no país é relativamente recente, com resoluções e regulamentações em constante evolução. No entanto, em outros países, já existem programas de reciclagem bem estruturados para os painéis fotovoltaicos (FATOR SOLAR ENERGIAS RENOVANTES, 2024).

O material principal dos módulos fotovoltaicos é o silício, e sua extração pode gerar impactos ambientais devido à mineração e ao processamento envolvidos. É importante destacar que a extração de silício, assim como a de outros minerais utilizados na fabricação dos módulos, não se destina exclusivamente a essa finalidade. Esses materiais são também empregados em uma variedade de outras aplicações industriais e tecnológicas (FATOR SOLAR ENERGIAS RENOVANTES, 2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Nascimento, 2016, para a realização deste trabalho, a pesquisa utilizada pode ser classificada como natureza aplicada na necessidade de redução de energia da UFScar por meio de sistemas fotovoltaicos. Além disso, o método empregado possui caráter quantitativo com foco na análise de dados de irradiação solar, geração de energia e economia. Para tal, utilizou-se um objetivo exploratório acerca dos dados disponíveis para o estudo bibliográfico. Dessa forma o procedimento adotado consistiu no estudo de caso, por meio da simulação de instalação de usinas fotovoltaicas no Centro de Ciências Exatas (CCET) (NASCIMENTO, 2016). O fluxograma na Figura 15 apresenta as etapas do procedimento.

Figura 15: Fluxograma das etapas do trabalho de graduação.



Fonte: Autoria Própria

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A primeira etapa envolveu a pesquisa em bibliografias confiáveis de autores especializados, bem como em sites oficiais do governo brasileiro e de institutos de pesquisa, com o objetivo de compreender a evolução da matriz energética nos últimos anos. Foram analisadas também resoluções, legislações e normas da ANEEL relacionadas à energia fotovoltaica.

Como este trabalho faz parte do projeto de pesquisa intitulado “Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos Orgânicos para Produção de Biogás e Integração com Energia

Fotovoltaica: Impulsionando a Transição Energética Sustentável na UFSCar”, do proponente Prof. Dr. Fabio Bentes Freire, processo 403133/2023-8, financiado pelo CNPq, a segunda etapa do levantamento bibliográfico concentrou-se na busca sobre os conceitos de fenômenos de transferência de calor, presentes no curso de Engenharia Química, e sua correlação com a produção de energia fotovoltaica.

A terceira etapa envolveu a busca de informações sobre os ProDin de energia fotovoltaica da UFSCar. Para isso, foram consultadas informações disponíveis nos sites da UFSCar, como a Pró-Reitoria de Graduação (ProGrad), a Secretaria Geral de Planejamento e Desenvolvimento Institucionais (SPDI), e a Secretaria dos Órgãos Colegiados (SOC). Além disso, foram realizados contatos com pessoas envolvidas no ProDin 11.512 e ProDin 11.985.

3.2 COLETA DE DADOS E ANÁLISE FINANCEIRA

A quarta etapa, focada na coleta de dados, consistiu na realização de pesquisas em fontes brasileiras e estrangeiras sobre a incidência solar nos últimos anos, disponíveis ao público gratuitamente, nas coordenadas geográficas da UFSCar. A partir dos dados obtidos, foi realizado um tratamento estatístico com o *software* R Commander™ para calcular valores médios de irradiação e desvio padrão.

Para a quinta etapa, com foco na obtenção de dados atualizados sobre a demanda energética da UFSCar, foram realizadas consultas com a Prefeitura Universitária para adquirir informações sobre o funcionamento das usinas instaladas e contas de energia elétrica referentes ao ano de 2023. Além disso, foram consultados os relatórios de gestão da universidade, disponibilizados pela Secretaria Geral de Planejamento e Desenvolvimento Institucionais (SPDI) no site institucional, para extrair informações sobre a geração de energia das usinas instaladas e o consumo de energia elétrica.

Na sexta etapa, foram solicitados dados sobre a construção das edificações na UFSCar, com ênfase no Departamento de Engenharia Química, para realizar o estudo de caso, junto à SeGEF. Também foi utilizado o *software* Google Earth™ para obter informações sobre o terreno da UFSCar e seus departamentos. É importante ressaltar que os dados de área de telhado foram obtidos por meio da ferramenta de “medição” disponível no *Google Earth*™.

Na sétima e última etapa, com os dados obtidos e foco no DEQ, foi realizada uma estimativa do tempo de retorno da instalação de uma usina fotovoltaica no local. Para isso, foram utilizados dados de mercado e conceitos de engenharia econômica, além do pré-dimensionamento da usina fotovoltaica com a versão free trial do *software* PVsyst™.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENERGIA ELÉTRICA - UFSCAR

4.1.1 Consumo e Demanda

Segundo o relatório de gestão de 2022, foram consumidos cerca de 7,91 GWh, representando um custo total de R\$ 5.945.419,00. As usinas instaladas na UFSCar foram responsáveis pela geração de 1 GWh, ou seja, 12,24% do consumo total no ano de 2022 (SPDI, 2023). É importante destacar que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico *on-grid* é consumida diretamente.

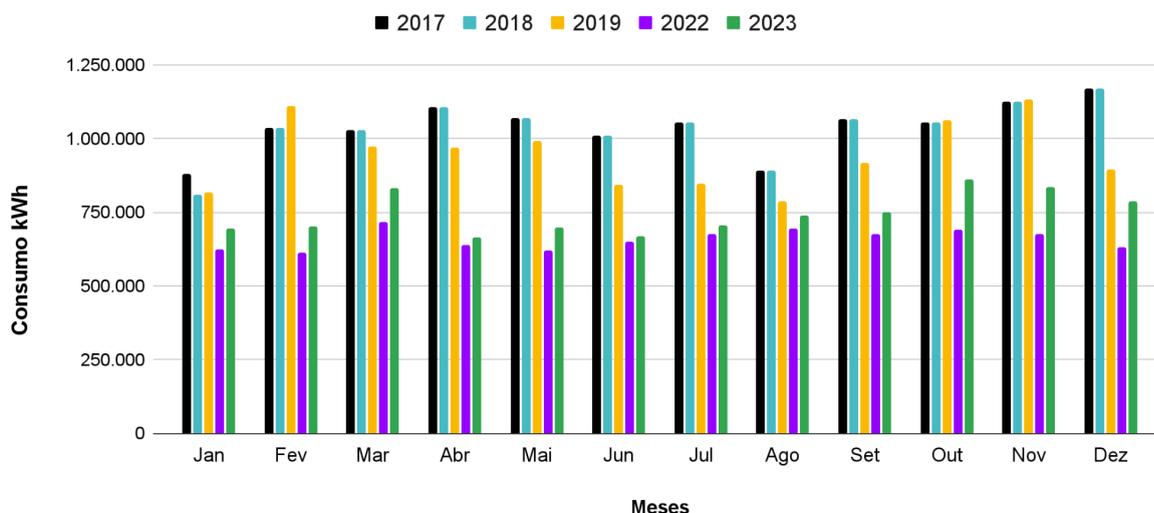
Como o valor da geração é menor que o consumo total, o impacto é observado na redução do valor da conta de energia a ser paga. O consumo líquido, ou seja, com o desconto da geração, de energia elétrica nos anos de 2017, 2018, 2019, 2022 e 2023 é apresentado no Quadro 4, e representado graficamente na Figura 16. Os anos de pandemia e paralisação das atividades, 2020 e 2021, não foram analisados, uma vez que a UFSCar não estava com atividades totalmente presenciais nesses períodos.

Quadro 4: Consumo de energia elétrica em kWh em 2017, 2018, 2019, 2022 e 2023.

	2017	2018	2019	2022	2023
Jan	880.750	809.987	819.227	625.629	694.050
Fev	1.036.690	1.036.690	1.112.618	614.185	701.860
Mar	1.029.480	1.029.480	972.826	718.382	831.680
Abr	1.105.590	1.105.590	968.629	640.877	665.340
Mai	1.068.710	1.068.710	992.270	621.844	700.080
Jun	1.010.590	1.010.590	842.076	651.150	669.920
Jul	1.055.180	1.055.180	845.885	676.677	707.090
Ago	890.370	890.370	789.057	696.857	739.450
Set	1.066.950	1.066.950	919.111	675.026	750.040
Out	1.056.700	1.056.700	1.064.602	692.183	861.070
Nov	1.127.580	1.127.580	1.134.217	675.361	835.640
Dez	1.171.712	1.171.712	896.580	630.166	789.060
Total Ano	12.500.302	12.429.539	11.357.098	7.918.337	8.945.280

Fonte: Prefeitura Universitária, 2024.

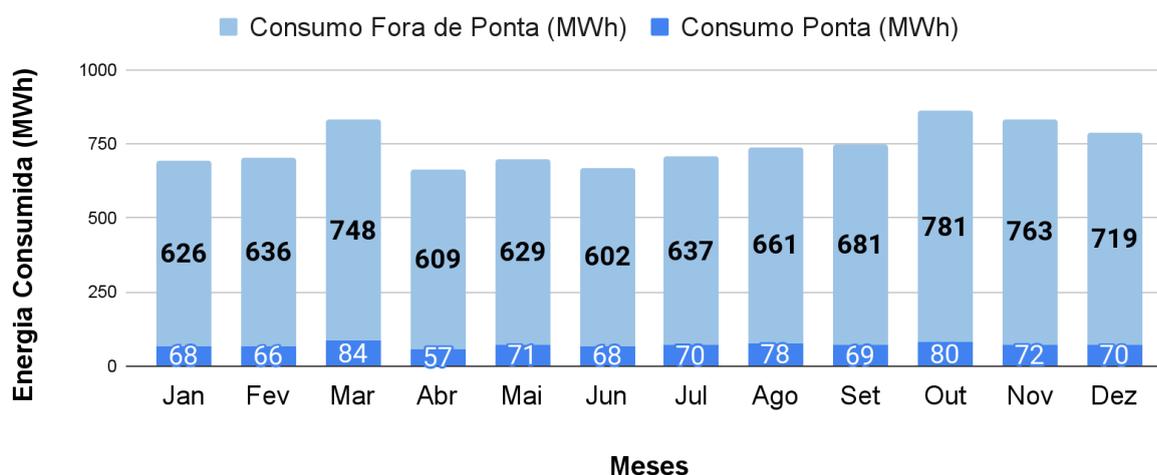
Figura 16: Consumo de energia elétrica em kWh em 2017, 2018, 2019, 2022 e 2023.



Fonte: Prefeitura Universitária, 2024.

O consumo total de energia aumentou de 7,91 GWh em 2022 para 8,94 GWh em 2023, representando um aumento de 12,97%. É importante destacar que o consumo de energia varia de acordo com os horários de ponta (18:00 às 20:59) e fora de ponta (21:00 às 17:59), conforme mencionado anteriormente. A variação do consumo para o ano de 2023 é apresentada na Figura 17.

Figura 17: Consumo de energia elétrica em MWh em 2023 no horário de ponta e fora de ponta.

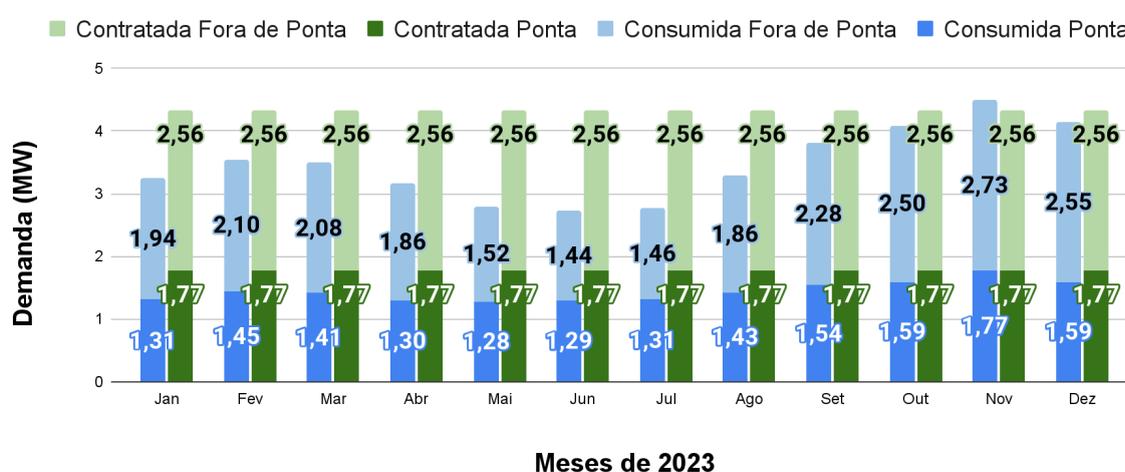


Fonte: Prefeitura Universitária, 2024.

Diante desse cenário, a implementação de usinas fotovoltaicas é interessante para reduzir o consumo de energia diretamente da concessionária. Os impactos no valor da conta

de energia da UFSCar dependem, além da quantidade de energia gerada, da demanda contratada. Isso significa que a concessionária reserva à UFSCar o valor contratado por período, seja ele fora ou dentro de ponta, e sendo assim, mesmo que o consumo seja menor do que o valor contratado, o valor pago à concessionária será o contratado. Desse modo, a composição do preço final da conta de energia da UFSCar é o valor da demanda contratada e energia consumida. Os valores da demanda contratada e consumida nos horários de ponta e fora de ponta são apresentados na Figura 18.

Figura 18: Demanda contratada vs Demanda consumida em 2023 em Ponta e Fora de Ponta.



Fonte: Prefeitura Universitária, 2024.

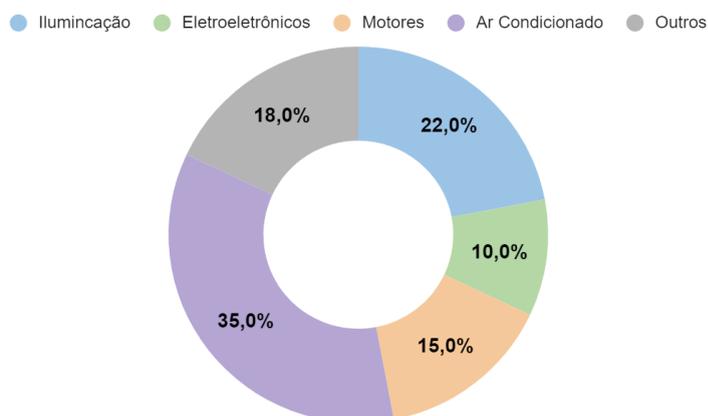
As usinas fotovoltaicas possuem um potencial significativo, uma vez que boa parte da demanda contratada fora de ponta não é consumida, como observado em 2023. A geração de energia elétrica a partir da fonte solar é maior no período fora de ponta do que no período de ponta, como veremos adiante a partir dos dados de irradiação solar. Assim, com a aquisição e implementação de usinas solares, a tendência é que a demanda contratada no horário fora de ponta seja reduzida. Isso ocorre porque a geração de energia elétrica contribui para a diminuição da dependência da concessionária, reduzindo, assim, a necessidade de demanda contratada disponível para esse período.

4.1.2 Perfil Energético

Dentro do consumo energético da UFSCar, existem alguns elementos que têm um impacto maior no percentual da conta de energia elétrica. Utilizando os dados disponibilizados no diagnóstico energético do projeto “Eficientização na Universidade

Federal de São Carlos SP”, referente ao ProDin 11.512, é possível analisar, na Figura 19, a participação dos principais elementos no consumo de energia elétrica em 2018.

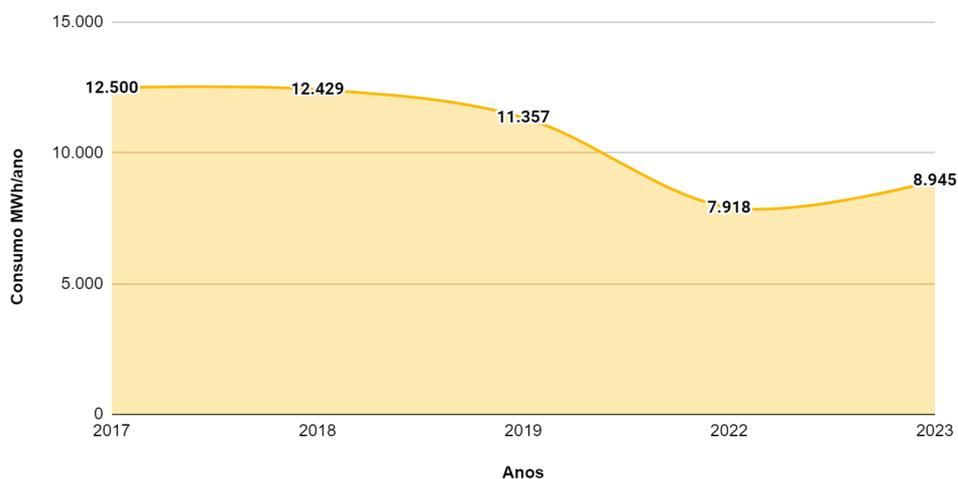
Figura 19: Perfil energético da UFSCar em 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Diagnóstico Energético – São Carlos, FAI UFSCar (2018).

As ações dos projetos ProDin 11.512 e ProDin 11.985 envolveram além da instalação de sistemas fotovoltaicos, a troca de lâmpadas. Como a iluminação tinha um percentual relevante no consumo, o impacto dessas ações pode ser observado na diminuição do consumo de energia elétrica, conforme mostrado no gráfico da Figura 20. Este gráfico é uma versão resumida da Figura 16, com a exclusão dos anos de 2020 e 2021.

Figura 20: Consumo de energia (MWh/ano) da UFSCar nos anos de 2017, 2018, 2019, 2022 e 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Prefeitura Universitária, 2024.

4.2 INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

4.2.1 Características Geográficas

A UFSCar, *campus* São Carlos, está situada nas coordenadas geográficas 21,97° de latitude sul e 47,88° de longitude oeste, segundo o *Google Earth*TM (GOOGLE EARTH, 2024). De acordo com o IBGE, a UFSCar - São Carlos, situada no estado de São Paulo, está em uma região de relevo classificado como planalto. Este tipo de relevo é favorável à instalação de painéis fotovoltaicos, pois oferece espaços amplos e abertos, além de minimizar a possibilidade de sombreamento causado por montanhas ou elevações (IBGE, 2024). A Figura 21 apresenta a localização da UFSCar, *campus* São Carlos.

Figura 21: Localização da UFSCar no *Google Earth*TM.



Fonte: Extraído do *Google Earth*TM, 2024.

A UFSCar, *campus* São Carlos, é composta por diversos departamentos, divididos nos centros de ciências. Para a instalação de módulos fotovoltaicos, podem ser adotadas diversas estratégias, incluindo o uso de telhados de departamentos, edifícios de aulas teóricas, espaços abertos e estacionamentos. Para a simulação do pré-dimensionamento, o foco inicial serão os telhados de departamentos.

Uma vez selecionados os departamentos, é importante considerar o ângulo de inclinação ideal dos sistemas fotovoltaicos a serem instalados nos telhados, conforme o Quadro 01 apresentado anteriormente. Para realizar a estimativa da área disponível dos telhados de departamentos foi utilizado a ferramenta de régua do *Google Earth*TM. O procedimento consiste em desenhar um retângulo utilizando o recurso visual disponível, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22: Estimativa da área de telhado por meio do *Google Earth*TM.

Fonte: Extraído do *Google Earth*TM, 2024.

Além disso, o *Google Earth* também disponibiliza a altura do relevo para as coordenadas selecionadas. No entanto, essa estimativa possui algumas limitações, uma vez que não é possível considerar a inclinação original dos telhados. No Quadro 3, são apresentados alguns departamentos com as características geográficas de latitude, longitude, elevação, área de superfície do telhado e o ângulo de inclinação recomendado, considerados no Quadro 1, que apresenta a determinação do ângulo inclinação do módulo em função da latitude. Como a latitude dos departamentos selecionados não sofre grande variação, adota-se o cálculo do ângulo de inclinação entre 21° e 30° , ou seja, latitude + 5° .

Quadro 4: Informações geográficas de alguns departamentos.

Departamentos	Área Telhado (m ²)	Latitude (°)	Longitude (°)	Ângulo Recomendado (°)	Altura Relevô (m)
DEQ	665	21°58 S	47°52 W	26	849
DEP	650	21°58 S	47°52 W	26	849
DEE e DEMec	298	21°58 S	47°52 W	26	849
DL	682	21°59 S	47°22 W	26	837
DEFMH	198	21°59 S	47°52 W	26	831
DCAm	533	21°58 S	47°52 W	26	843
DEBE	969	21°58 S	47°52 W	26	846
DF	1323	21°59 S	47°53 W	26	858
DM	1395	21°58 S	47°52 W	26	861
DECiv	566	21°58 S	47°52 W	26	855
DEMa	609	21°58 S	47°52 W	26	855
DEs	290	21°58 S	47°53 W	26	848
DQ	1400	21°59 S	47°52 W	26	841
DC	1400	21°58 S	47°52 W	26	860

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do *Google Earth*TM.

Nota-se que a variação de latitude e longitude nos departamentos escolhidos não é significativa dentro da faixa de ângulos recomendados. Portanto, pode-se adotar que, na UFSCar, o ângulo de inclinação ideal para os painéis fotovoltaicos é aproximadamente 26°. Os fatores mais relevantes para a escolha devem ser a análise da estrutura dos telhados, considerando o material de construção e a capacidade de sustentação, além da própria inclinação do telhado, que pode ser maior que o recomendado. Além disso, a máxima eficiência na geração de energia é diretamente proporcional à área de superfície, conforme apresentado anteriormente nas Equações 9 e 10.

É importante destacar que, ao utilizar o PVsystTM, a orientação do azimute em relação ao hemisfério norte é definida como -90° em vez de 90°, para garantir que a face dos módulos solares esteja voltada para o sul.

Usualmente, as usinas fotovoltaicas são instaladas em telhados. No entanto, existem alternativas quando a área de superfície do telhado não é suficiente ou a inclinação e o material do telhado dificultam a instalação de um sistema seguro. Por exemplo, o HU-UFSCar (Ebserh) divulgou um projeto para sistemas de energia elétrica em estacionamentos, como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23: Usina de geração de energia fotovoltaica em sistema de cobertura metálica no estacionamento do HU-UFSCar (Ebserh).



Fonte: Reprodução Projeto Usina Fotovoltaica, HU-UFSCar (Ebserh), 2024.

Outro exemplo em São Carlos é a instalação de painéis fotovoltaicos próximos ao solo, utilizando um sistema de suporte para regular sua inclinação. Na USP São Carlos, há alguns painéis instalados dessa forma, conforme pode ser observado na Figura 24.

Figura 24: Exemplo de usina fotovoltaica da USP São Carlos.



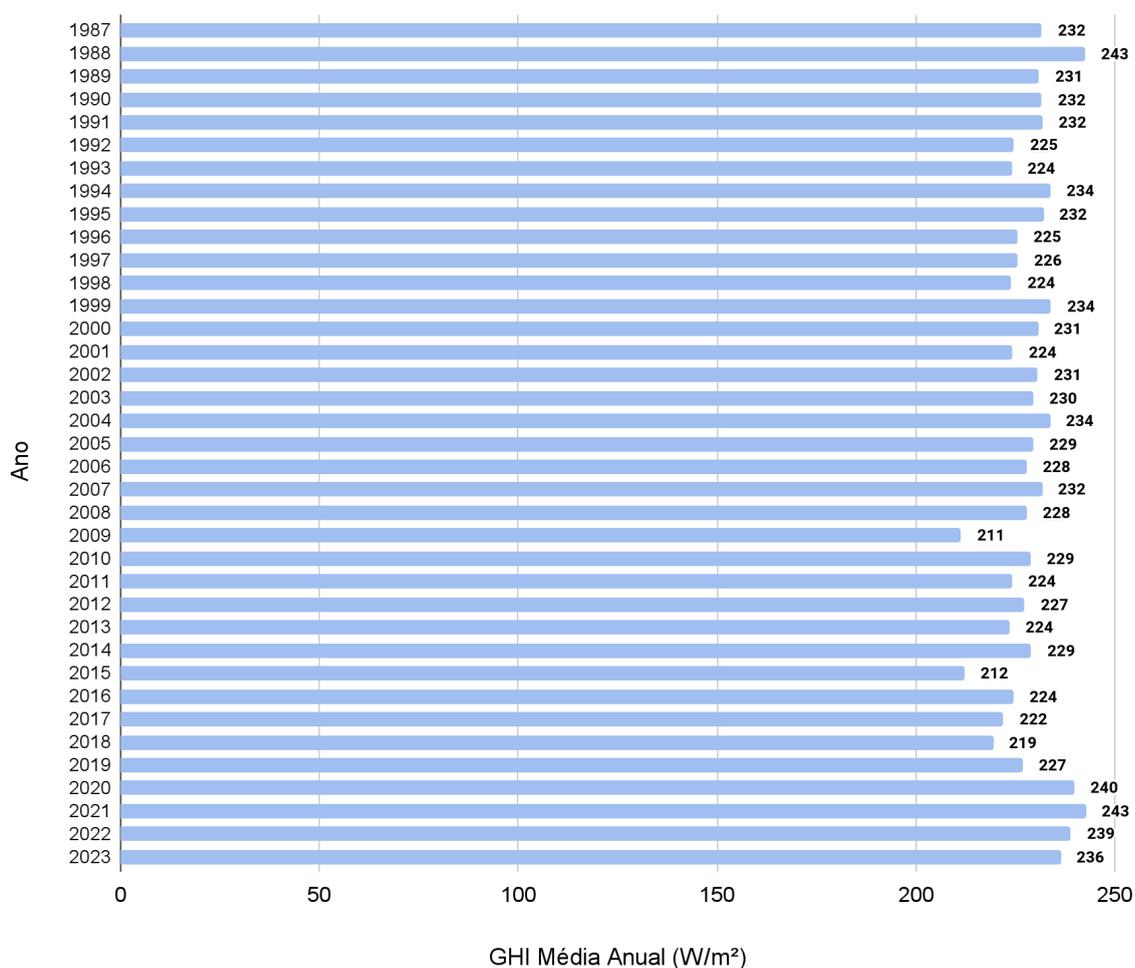
Fonte: Acervo Pessoal.

4.2.2 Dados de Incidência Solar

Atualmente, existem diversas fontes de informação sobre a incidência solar em uma determinada região. Conforme discutido anteriormente, a incidência solar sobre uma superfície ocorre de forma fragmentada a partir de suas componentes, como *Direct Horizontal Irradiance* (DHI), *Direct Normal Irradiance* (DNI) e *Global Horizontal Irradiance* (GHI). Para o presente trabalho, os valores de radiação e irradiação a serem tratados e utilizados serão os de GHI, uma vez que representam a somatória dos valores de DHI e DNI, conforme apresentado anteriormente na Equação 8.

Para entender a variação anual da incidência solar nas últimas décadas para as coordenadas geográficas da UFSCar, localizada a 21,97° de latitude sul e 47,88° de longitude oeste, foi elaborado o gráfico disponível na Figura 21, utilizando a base de dados disponibilizada pela MERRA - 2.

Figura 25: GHI média anual (W/m^2) ao longo dos anos de 1987 a 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do MERRA-2.

Percebe-se que ao longo dos anos, desde 1987, a variação da radiação média anual não é significativa. Logo é possível utilizar dados dos últimos anos para obter um dimensionamento coerente para o sistema fotovoltaico. No entanto, é importante entender se a média mensal da radiação sofre alterações ao longo dos últimos anos.

Para investigar a variação da incidência solar mensal nos últimos anos, utilizou-se a base de dados disponível pelo NSRDB. O comparativo entre os anos de 2020, 2021 e 2022 estão disponíveis na Figura 26.

Figura 26: Comparativo da Radiação Solar Média nos anos de 2020, 2021 e 2022 para as radiações GHI e GHI *Clearsky*.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do NSRDB.

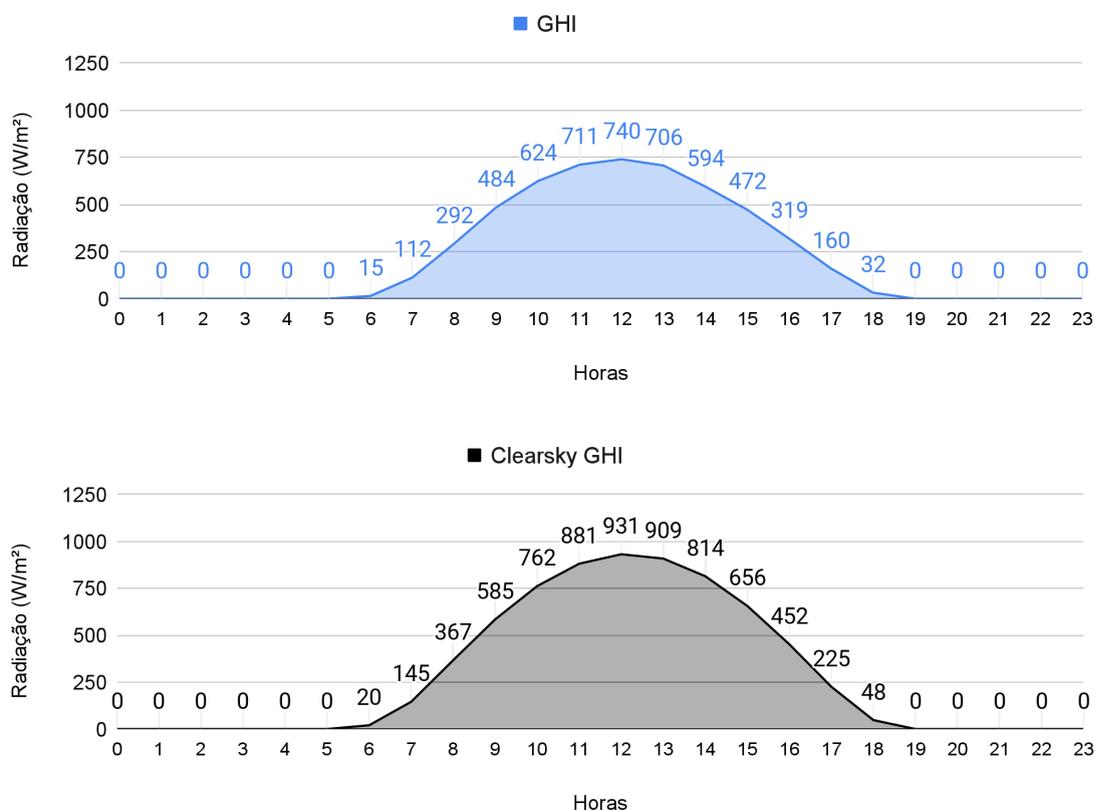
Uma vez que a radiação média não sofreu variações significativas ao longo dos últimos 3 anos, pode-se adotar que a irradiação média no período também foi pouco afetada. Isso se deve ao fato de que a irradiação é a integral dos valores de radiação dentro do intervalo de tempo, neste caso, de 24 horas.

Ao analisar o comportamento dos gráficos presentes na Figura 24, observa-se que a radiação é maior nos meses correspondentes às estações de primavera e verão, e menor nos meses das estações de outono e inverno. É válido ressaltar que, durante o inverno, a duração do dia é menor, resultando em menor quantidade de radiação solar.

Além disso, com base no comparativo disponibilizado pelo NSRDB, percebe-se que, para condições de céu claro, a radiação é maior em comparação com a radiação normal. Isso ocorre porque o GHI é a somatória do DNI e do DHI, conforme apresentado na Equação 8.

Para a utilização de um sistema fotovoltaico *on-grid*, é crucial analisar a radiação solar em função do horário, uma vez que, para esses sistemas, a energia gerada não é armazenada em baterias. Utilizando a base de dados da NSRDB, foi elaborado o gráfico da Figura 27, onde é possível analisar a diferença entre a radiação média anual para as condições normais e de céu claro de acordo com o horário do dia, para o ano de 2022.

Figura 27: Comparação entre a radiação média anual (W/m^2) por hora entre GHI e GHI *Clearsky*.

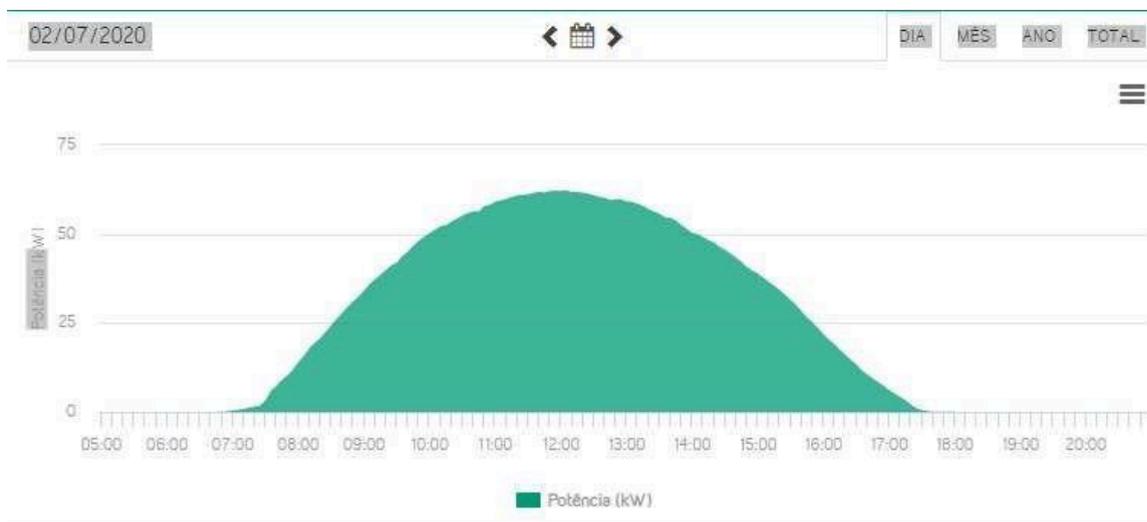


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do NSRDB.

A partir da Figura 23, percebe-se que a radiação atinge o valor máximo por volta das 12 horas, e valores baixos entre as 18 horas de um dia e 6 horas do outro dia. Além disso, nota-se que os valores médios de radiação GHI são menores que as radiações GHI na condição de céu limpo (*Clearsky*). Este comportamento de radiação é refletido pela produção de energia das usinas fotovoltaicas já instaladas na Universidade, como pode ser observado na Figura 24, extraída do ProDin 11.512, no qual são apresentadas a geração de energia entre um dia nublado (14/07/2020) e um dia sem nuvens (02/07/2020).

Figura 28: Comparação de geração de energia por usina fotovoltaica presente na UFSCar, entre um dia sem nuvens (a) e um dia com nuvens (b).

(a) - Dia sem nuvens



(b) - Dia com nuvens



Fonte: Reprodução ProDin 11.512.

Para a realização do dimensionamento de um sistema fotovoltaico e estimativa do potencial de produção de energia fotovoltaica, será considerado a irradiação solar GHI. Desse modo, no Quadro 5 são apresentados os valores médios diários por mês, média diária no ano, desvio padrão, P10 e P90 dos valores de GHI provenientes da IRENA e LABREN calculados com o uso do *software* estatístico R Commander™. No Quadro 04, está presente a média diária anual de irradiação solar obtida pelo GSA; no entanto, os valores mensais não são disponibilizados pela fonte.

Quadro 5: Valores de GHI (kWh/m²/dia) por fonte de dados nas coordenadas geográficas 21,98° de latitude sul e 47,89° de longitude oeste.

	GHI (kWh/m ² /dia)	GHI (kWh/m ² /dia)	GHI (kWh/m ² /dia)
	IRENA	LABREN	GSA
Jan	5,009	5,541	-
Feb	5,119	5,806	-
Mar	5,405	5,063	-
Apr	4,682	4,672	-
May	3,984	3,949	-
Jun	3,721	3,714	-
Jul	4,341	3,910	-
Aug	5,454	4,836	-
Sep	6,275	4,945	-
Oct	6,067	5,532	-
Nov	6,388	5,692	-
Dec	6,148	5,994	-
Média Anual	5,216	4,971	5,195
Desvio Padrão	0,906	0,784	-
P10	4,019	3,914	-
P90	6,262	5,795	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

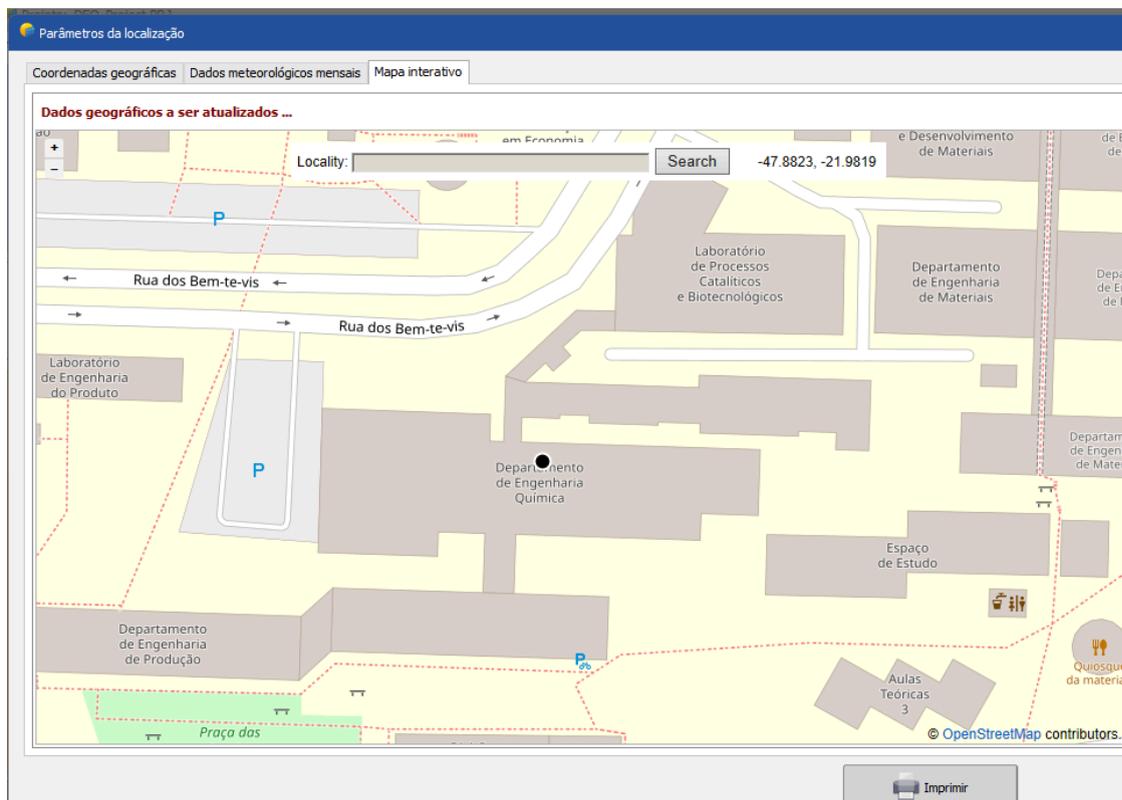
Realizando a média entre os valores médios anuais de GHI apresentados das 3 fontes, sendo estes 5,216, 4,971 e 5,195; obtém-se o valor de 5,127 kWh/m²/dia, com um desvio padrão de 0,136. Para o pré-dimensionamento e estimativa de custos, este será o valor adotado.

4.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS

4.3.1 Pré-Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Para realizar um pré-dimensionamento do sistema fotovoltaico, foi escolhido um local da UFSCar. Utilizando os dados do Quadro 4, o local escolhido para a análise inicial foi o Departamento de Engenharia Química. O *software* utilizado para realizar essa análise é o PVsyst™, *Photovoltaic Software*, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29: Localização do DEQ para utilização no PVsyst.



Fonte: Simulação no PVsyst™.

Além das informações obtidas, como a média da irradiação solar e informações de relevo, é necessário inserir algumas informações sobre a temperatura. Dentre elas destacam-se a menor temperatura de uso do sistema, a temperatura de operação no inverno e no verão. Esses dados são obtidos a partir da base de dados disponibilizada pelo NSDBR.

O período de temperaturas que correspondem ao inverno será de 20 de junho a 22 de setembro, enquanto o período correspondente ao verão será adotado de 21 de dezembro a 20 de março. Utilizando o *software* estatístico R Commander™, obtêm-se os valores médios em cada situação requerida, apresentados no Quadro 5.

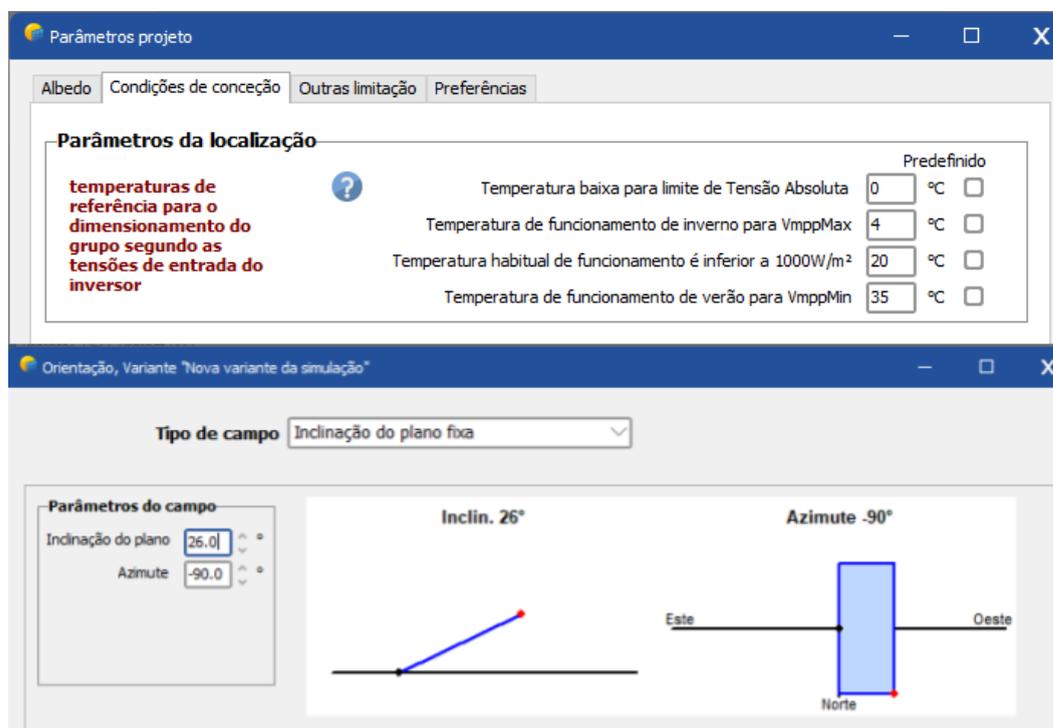
Quadro 6: Valores de temperatura nas coordenadas geográficas 21,98° de latitude sul e 47,89° de longitude oeste nos anos de 2019, 2020, 2021 e 2022.

Temperatura (°C)	2019	2020	2021	2022	Média 4 anos
Média Anual	21,9	21,8	21,8	20,8	20,8
Mínima Anual	3,1	5,1	1,0	3,1	3,1
Máxima Anual	37,7	40,7	39,7	35,1	38,3
Média Inverno	20,0	20,6	19,8	19,5	20,0
Mínima Inverno	3,1	6,2	1,0	7,2	4,4
Máxima Inverno	37,7	36,3	39,3	34,3	34,3
Média Verão	23,7	22,9	23,8	22,5	23,2
Mínima Verão	16,2	16,6	13,0	14,6	15,1
Máxima Verão	35,2	33,8	34,9	32,4	34,1

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do NSDBR.

A partir dos dados, para o pré-dimensionamento, será utilizado o valor de 4 °C para a temperatura mínima de inverno e 20 °C para a temperatura média de inverno. Por segurança, a temperatura usual do sistema será adotada em 35 °C, considerando a máxima de verão, enquanto a temperatura de operação no verão será fixada em 50 °C, já que é possível que haja variações de temperatura ao longo dos próximos anos. A Figura 30 apresenta a tela do PVsyst™ com a definição das informações de orientação, inclinação e temperatura.

Figura 30: Captura de tela PVsyst™ com informações sobre temperatura, orientação e inclinação.



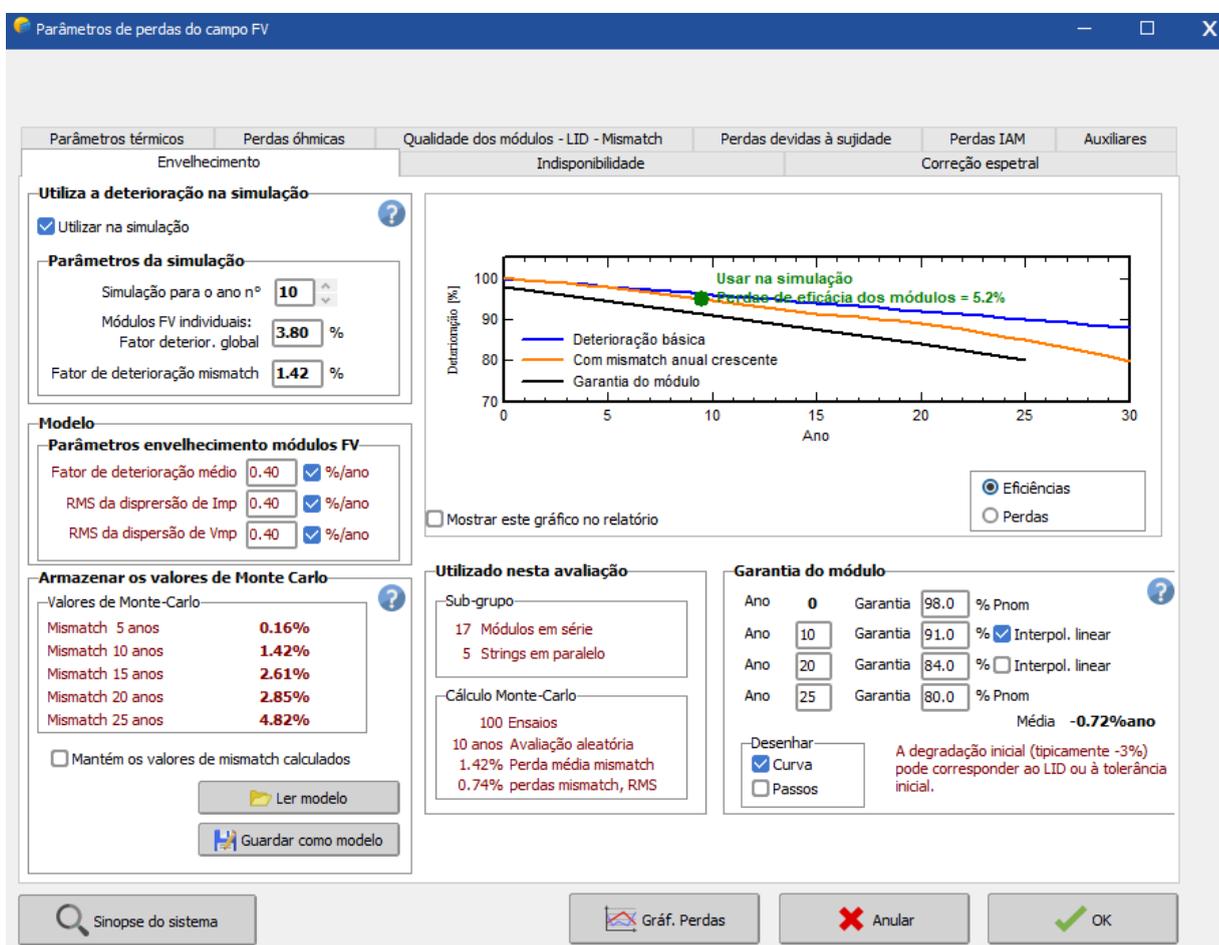
Fonte: Extraído de Simulação no PVsyst™.

Para o dimensionamento do sistema será utilizado o Módulo Canadian Solar 144 Cells 370Wp 33V Si-mono CS3U-370MS 1500V, uma vez que o Módulo Canadian Solar 144 Cells 370Wp Mono-Si-Perc-1500V - Ku, foi utilizado no dimensionamento dos painéis fotovoltaicos do diagnóstico energético do projeto “Eficientização na Universidade Federal de São Carlos SP”, referente ao ProDin 11.512. Para o inversor selecionou-se um compatível com o mesmo modelo do módulo. A partir da inserção dessas informações, o PVsyst™ fornece as demais informações necessárias. O resultado é apresentado na Figura 31.

Na Figura 31 é possível observar as seções de seleção do módulo fotovoltaico, seleção de inversor e dimensionamento do módulo, com as informações apresentadas anteriormente. Além disso, o resultado da simulação fornece a potência nominal da usina, com a quantidade de módulos e área de superfície total para a captação da irradiação. Essas informações são utilizadas para estimar o custo do módulo fotovoltaico, como será abordado adiante.

Na Figura 32 é possível observar que o PVsyst™ apresenta diversos parâmetros de perdas do módulo fotovoltaico, como parâmetros térmicos, ôhmicos, sujeira, entre outros. Como abordado anteriormente, a falta de manutenção, assim como a temperatura influenciam diretamente na redução da energia gerada, e durante um projeto real devem ser dimensionadas. Dentro do campo de envelhecimento, é possível observar os parâmetros de envelhecimento atribuídos ao modelo do módulo e como a sua eficiência diminui ao longo dos anos por meio do gráfico disponível. Por fim, na garantia do módulo é possível ajustar a perda de eficiência, de acordo com a garantia do módulo dentro do intervalo de anos.

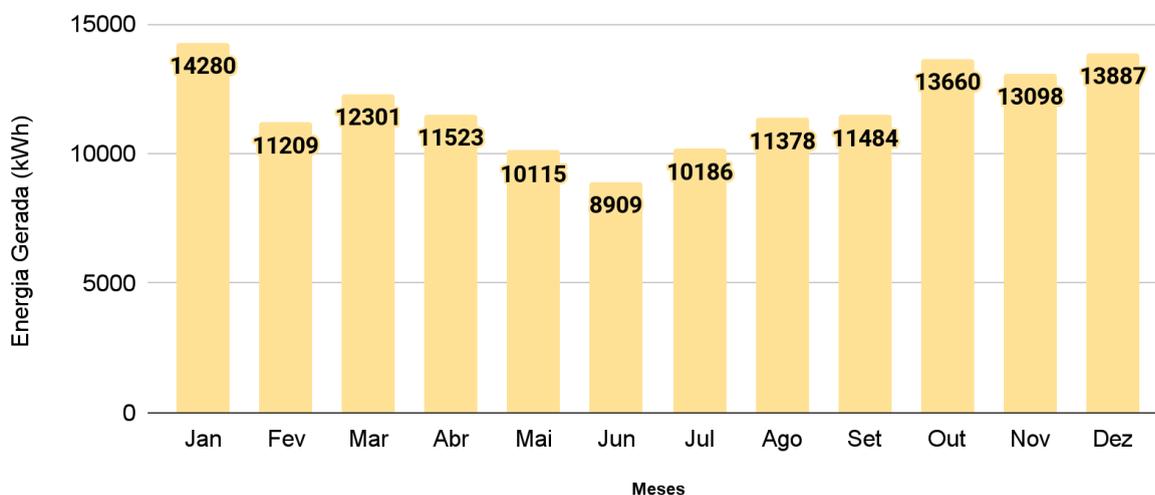
Figura 32: Captura de tela PVsyst™ com informações sobre o envelhecimento.



Fonte: Extraído de Simulação no PVsyst.

Desse modo, a potência unitária do módulo é 370 Wp, com 255 unidades, enquanto o inversor possui potência de 30kWca e 3 unidades. Para uma projeção utilizando a área de 506 m² da cobertura do telhado do DEQ, poderiam ser produzidos 142.031 kWh/ano, com índice de performance de 80,54%. Na Figura 33 são apresentadas a produção de energia por mês.

Figura 33: Estimativa de geração de energia elétrica (kWh) no DEQ por mês, a partir da simulação no PVsyst™.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do PVsyst™.

Essa produção de energia poderia ser aumentada caso fossem implementados painéis fotovoltaicos em outros locais, como, por exemplo, o estacionamento do departamento, com os devidos cuidados de instalação. Essa alternativa também seria viável caso a estrutura dos telhados do departamento não fosse adequada à instalação.

Na prática, caso não haja manutenção periódica dos módulos e ocorra o acúmulo de poeira ou outros materiais que possam inibir a captação da luz solar, a eficiência do módulo pode ser severamente comprometida, implicando uma geração abaixo da esperada. Por sua vez, períodos com maior incidência solar, devido a possíveis alterações climáticas, podem levar a uma maior captação de luz solar e, conseqüentemente, a uma maior geração de energia.

Repetindo o procedimento para os departamentos do Centro de Ciências Exatas (CCET), é possível obter a geração de energia de cada departamento, considerando a área de telhado disponível. O resultado é apresentado no quadro 7.

Quadro 7: Energia gerada por simulação para os departamentos do CCET.

Departamentos CCET	Estimativa de energia gerada anualmente kWh/ano	Representatividade consumo UFSCar (2023)
DEQ	142.031	1,59%
DEP	189.374	2,12%
DEE e DEMec	94.687	1,06%
DF	368.565	4,12%
DM	368.565	4,12%
DECiv	151.321	1,69%
DEMa	189.374	2,12%
DEs	94.687	1,06%
DQ	388.038	4,34%
DC	388.038	4,34%

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de simulação do PVSyst™.

Com base na simulação, os departamentos do CCET conseguiriam produzir cerca de 26,54% do consumo total de energia da UFSCar em 2023. É importante ressaltar que o custo de implementação de módulos fotovoltaicos seria elevado, mas, como será analisado no próximo tópico, é possível calcular o tempo de retorno do investimento.

4.3.2 Fluxo de Caixa e *Payback* (Tempo de Retorno)

A partir de uma interpolação de valores apresentados no Quadro 2, que apresenta o preço médio de kits fotovoltaicos em função da potência, pode-se estimar que o custo médio de instalação de um módulo de 370 Wp é avaliado em R\$982.000,00. Considerando o custo de TE de R\$ 0,30 e TUSD de R\$ 0,11 para a geração de energia em horário fora de ponta, extraídos do mês de dezembro de 2023 da fatura de energia elétrica da UFSCar, e a partir da geração estimada do projeto, pode-se adotar que o valor economizado pela geração em 1 ano é aproximadamente R\$ 58.232,71, utilizando-se a equação 13, para o cálculo do CEE. Segundo o Portal Solar, estima-se que o custo da manutenção do sistema é 0,05% do valor inicial.

Para a elaboração do fluxo de caixa, será considerada uma taxa TMAR equivalente a 10% dentro do período de 25 anos de vida do sistema. Os valores anualizados podem ser observados no Quadro 8.

Quadro 8: Fluxo de caixa para a simulação de instalação de um módulo 370 Wp no DEQ.

Ano	Geração R\$/ano	Investimento	Manutenção	Fluxo de Caixa
0		-R\$ 982.000,00		-R\$ 982.000,00
1	R\$ 52.938,83		-R\$ 4.463,64	R\$ 48.475,19
2	R\$ 101.065,03		-R\$ 8.521,49	R\$ 92.543,55
3	R\$ 144.816,13		-R\$ 12.210,44	R\$ 132.605,69
4	R\$ 184.589,86		-R\$ 15.564,04	R\$ 169.025,82
5	R\$ 220.747,79		-R\$ 18.612,76	R\$ 202.135,02
6	R\$ 253.618,63		-R\$ 21.384,33	R\$ 232.234,30
7	R\$ 283.501,22		-R\$ 23.903,94	R\$ 259.597,28
8	R\$ 310.667,21		-R\$ 26.194,49	R\$ 284.472,72
9	R\$ 335.363,56		-R\$ 28.276,81	R\$ 307.086,76
10	R\$ 357.814,79		-R\$ 30.169,82	R\$ 327.644,97
11	R\$ 378.225,00		-R\$ 31.890,75	R\$ 346.334,25
12	R\$ 396.779,74		-R\$ 33.455,23	R\$ 363.324,51
13	R\$ 413.647,68		-R\$ 34.877,48	R\$ 378.770,20
14	R\$ 428.982,17		-R\$ 36.170,44	R\$ 392.811,74
15	R\$ 442.922,62		-R\$ 37.345,85	R\$ 405.576,77
16	R\$ 455.595,76		-R\$ 38.414,41	R\$ 417.181,35
17	R\$ 467.116,79		-R\$ 39.385,83	R\$ 427.730,96
18	R\$ 477.590,45		-R\$ 40.268,93	R\$ 437.321,52
19	R\$ 487.111,97		-R\$ 41.071,76	R\$ 446.040,21
20	R\$ 495.767,89		-R\$ 41.801,60	R\$ 453.966,29
21	R\$ 503.636,91		-R\$ 42.465,09	R\$ 461.171,82
22	R\$ 510.790,56		-R\$ 43.068,26	R\$ 467.722,30
23	R\$ 517.293,88		-R\$ 43.616,60	R\$ 473.677,28
24	R\$ 523.205,99		-R\$ 44.115,09	R\$ 479.090,90
25	R\$ 528.580,64		-R\$ 44.568,27	R\$ 484.012,37

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Portal Solar, 2024.

A partir dos conceitos de Valor Presente Líquido (VPL) apresentados na Equação 14, é possível elaborar o fluxo de caixa acumulado disponível no Quadro 9 e estimar o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado. Uma vez que a energia gerada é menor que a energia consumida, os valores positivos no fluxo de caixa representam uma economia em relação ao custo de energia da UFSCar, neste caso específico no DEQ.

Quadro 9: Cálculo de VPL e Payback para a simulação de instalação de um módulo 370 Wp no DEQ.

Ano	VPL	Acumulado
0	-R\$ 982.000,00	-R\$ 982.000,00
1	R\$ 44.068,36	-R\$ 937.931,64
2	R\$ 76.482,27	-R\$ 861.449,37
3	R\$ 99.628,62	-R\$ 761.820,76
4	R\$ 115.446,91	-R\$ 646.373,85
5	R\$ 125.509,95	-R\$ 520.863,91
6	R\$ 131.090,21	-R\$ 389.773,70
7	R\$ 133.214,45	-R\$ 256.559,24
8	R\$ 132.708,62	-R\$ 123.850,62
9	R\$ 130.234,76	R\$ 6.384,14
10	R\$ 126.321,32	R\$ 132.705,46
11	R\$ 121.388,04	R\$ 254.093,51
12	R\$ 115.766,39	R\$ 369.859,89
13	R\$ 109.716,24	R\$ 479.576,13
14	R\$ 103.439,61	R\$ 583.015,74
15	R\$ 97.091,85	R\$ 680.107,59
16	R\$ 90.790,82	R\$ 770.898,41
17	R\$ 84.624,29	R\$ 855.522,70
18	R\$ 78.656,12	R\$ 934.178,82
19	R\$ 72.931,14	R\$ 1.007.109,96
20	R\$ 67.479,20	R\$ 1.074.589,15
21	R\$ 62.318,41	R\$ 1.136.907,56
22	R\$ 57.457,80	R\$ 1.194.365,36
23	R\$ 52.899,41	R\$ 1.247.264,77
24	R\$ 48.639,99	R\$ 1.295.904,76
25	R\$ 44.672,41	R\$ 1.340.577,17

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dessa forma, o tempo estimado de retorno do investimento para o sistema fotovoltaico pré-dimensionado seria de aproximadamente 9 anos. Utilizando uma estratégia similar, é possível calcular o potencial de redução energética de cada departamento ou edifício na UFSCar, permitindo uma visão abrangente da potencial redução de consumo de energia da

universidade como um todo.

Os principais desafios para a implementação de um sistema fotovoltaico estão relacionados à estrutura disponível na UFSCar, especialmente no que diz respeito à adaptação de telhados para suportar os painéis. Grupos de trabalho na FAI, SeGEF e PU estão atualmente discutindo como realizar as adaptações necessárias. No entanto, existem alternativas de instalação desses sistemas que não se limitam apenas a telhados, como a instalação em terrenos próximos ao solo, com a estrutura adequada, semelhante à da USP, ou até mesmo em estacionamentos, como no projeto do HU-UFSCar (Ebserh). Essas são opções viáveis, desde que os cuidados necessários sejam tomados.

5. CONCLUSÃO

A energia fotovoltaica representa um grande potencial para reduzir a fatura de energia elétrica da UFSCar, que atualmente é uma das maiores despesas da instituição. Este trabalho analisou o potencial e as condições de maximização de geração de energia no CCET.

Concluiu-se que a variação da irradiação solar ao longo dos anos não é significativa de modo que UFSCar recebe uma média de 5,127 kWh/m²/dia de irradiação, sendo necessário instalar painéis solares voltados para o norte geográfico com inclinação de 26° para o máximo aproveitamento desta irradiação.

Embora o investimento inicial de implementação das usinas fotovoltaicas seja elevado, estimado em R\$982.000,00 para o exemplo do DEQ, a redução na fatura a médio prazo é extremamente significativa, com uma geração de 142.031 kWh/ano, representando 1,41% do consumo total de energia da UFSCar.

A instalação de módulos fotovoltaicos em todas as estruturas do CCET possui potencial de redução inicial de 26,54% do consumo total de energia da UFSCar. Com a possibilidade de participação em editais da ANEEL, que historicamente têm sido bem-sucedidos, como evidenciado pelos ProDin 11.512 e ProDin 11.985, é possível reduzir substancialmente ou até mesmo eliminar o custo inicial do sistema.

O uso de energia fotovoltaica contribui não apenas para a redução de custos, mas também para a transição energética da UFSCar em direção a um futuro sustentável, uma vez que os danos ambientais causados pela instalação do sistema e seu descarte são pequenos para o meio ambiente, quando comparados às demais fontes de energia.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em relação ao tema da energia fotovoltaica na UFSCar, ainda há um vasto campo a ser explorado. Como mencionado anteriormente neste trabalho, a instalação de usinas fotovoltaicas foi focalizada nos telhados dos departamentos do CCET. No entanto, existem alternativas que podem ser consideradas. Assim, sugere-se a realização de estudos em locais do *campus* de São Carlos que não sejam os telhados, mas que possam abrigar módulos fotovoltaicos.

Além disso, a análise das condições de instalação dos sistemas, assim como a manutenção e os cuidados dos painéis existentes na UFSCar, é um assunto relevante para aumentar a eficiência na geração de energia, e pode ser objeto de futuras pesquisas.

Por fim, diante do cenário de transição energética e da busca por fontes de energia sustentáveis na UFSCar, propõe-se um estudo de viabilidade para a integração dos sistemas fotovoltaicos com novas tecnologias que podem ser implementadas nos *campus*, como, por exemplo, plantas de biogás.

REFERÊNCIAS

VILLALVA, Marcelo Gomes. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

ÇENGEL, Yunus A.; GHajar, Armon. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática. 4. ed. São Paulo: AMGH Editora, 2012.

PEREIRA, Enio Bueno; **MARTINS**, Fernando Ramos; **GONÇALVES**, André Rodrigues; **COSTA**, Rodrigo Santos; **LOPES DE LIMA**, Francisco J.; **RÜTHER**, Ricardo; **ABREU**, Samuel Luna de; **TIEPOLO**, Gerson Máximo; **PEREIRA**, Silvia Vitorino; **SOUZA**, Jefferson Gonçalves. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

ANEEL. Relatório Anual de Informações - Ralie. Disponível em: <<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/Ralie>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Infográfico do Mercado Solar. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Instituto Solar. Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: <<https://institutosolar.com/dimensionamento-de-sistemas-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Canal Cecierj. Recurso 17593. Disponível em: <<https://canal.cecierj.edu.br/recurso/17593>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Ministério de Minas e Energia (MME). Sobre o Programa Luz para Todos. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/destaques/Programa%20Luz%20para%20Todos/sobre-o-programa>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.

Disponível em:

<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Sunergia. Quais os Principais Tipos de Módulos Fotovoltaicos? Disponível em:

<<https://sunergia.com.br/blog/quais-os-principais-tipos-de-modulos-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

International Renewable Energy Agency (IRENA). About. Disponível em:

<<https://www.irena.org/About>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

National Solar Radiation Database (NSRDB). What is the NSRDB. Disponível em:

<<https://nsrdb.nrel.gov/about/what-is-the-nsrdb>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Global Solar Atlas. About. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/support/about>>.

Acesso em: 30 jul. 2024.

SolarAnywhere. Data Fields - Definitions. Disponível em:

<<https://www.solaranywhere.com/support/data-fields/definitions/>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Portal Solar. Energia Solar Fotovoltaica: Impactos Ambientais. Disponível em:

<<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-impactos-ambientais>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Portal Solar. Energia Solar: Como Calcular. Disponível em:

<<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-como-calcular>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Google Earth. UFSCar - Universidade Federal de São Carlos. Disponível em:

<https://earth.google.com/web/search/UFSCar+-+Universidade+Federal+de+S%C3%A3o+Carlos+-+Rodovia+Washington+Lu%C3%ADs+-+Monjolinho,+S%C3%A3o+Carlos+-+SP/@-21.9839942,-47.8815371,842.32538235a,776.94352053d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCRgPsyDE-jXAEYq9UewJ_TXAGV14iC-a70fAIZU9zjoS8kfA>. Acesso em: 30 jul. 2024.

IBGE. Sinopse do Censo Demográfico 2010. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102090.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

Portal Solar. Tudo sobre a Manutenção do Painel Solar. Disponível em:

<<https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-manutencao-do-painel-solar>>. Acesso em:

30 jul. 2024.

Portal Solar. Placa Solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/placa-solar>>.

Acesso em: 30 jul. 2024.

Secretaria Geral de Planejamento e Desenvolvimento Institucionais (SPDI). UFSCar em Números. Disponível em:

<<https://www.spdi.ufscar.br/informacao-institucional/indicadores-1/ufscar-em-numeros>>.

Acesso em: 30 jul. 2024

ONU News. População mundial atinge 8 bilhões de pessoas. Disponível em:

<<https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805342>>. Acesso em: 15 set. 2024

KREITH, F. e BOHN, M. S. Princípios de Transferência de Calor, Ed. Thomson, 2003

INCROPERA F. P. e DEWITT D. P. (2014). Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa, LTC Editora: 7ª edição, Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, Francisco Paulo do. Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática - como elaborar TCC. Brasília: Thesaurus, 2016.