



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

LAURA LAHIGUERA CESA

ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE
ÁREA REMEDIADA COMO USINA SOLAR FOTOVOLTAICA:
ESTUDO DE CASO EM PAULÍNIA, SP

Porto Alegre

Julho 2024

LAURA LAHIGUERA CESA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ÁREA REMEDIADA COMO
USINA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO EM PAULÍNIA, SP**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharela.

Orientador: Fernando Mainardi Fan

Coorientadora: Letícia Jenisch Rodrigues

Porto Alegre

Julho 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Cesa, Laura Lahiguera
Análise de viabilidade para utilização sustentável
de área remediada como usina solar fotovoltaica:
Estudo de caso em Paulínia, SP / Laura Lahiguera Cesa.
-- 2024.
113 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Usina solar fotovoltaica. 2. Área remediada. 3.
Monitoramento de água subterrânea. 4. Viabilidade. I.
Fan, Fernando Mainardi, orient. II. Rodrigues,
Leticia Jenisch, coorient. III. Título.

LAURA LAHIGUERA CESA

ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ÁREA REMEDIADA COMO USINA
SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO EM PAULÍNIA, SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharela.

Aprovado em: Porto Alegre, 15 de julho de 2024

.....
Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (UFRGS)
Orientador

.....
Prof. Pós-Dra. Letícia Jenisch Rodrigues - Departamento de Engenharia Mecânica e Laboratório
de Energia Solar (UFRGS)
Coorientadora

.....
Prof. Pós-Dr. Fabiano Perin Gasparin - Departamento de Engenharia dos Materiais e
Laboratório de Energia Solar (UFRGS)
Examinador

.....
Prof. Me. Maurício Andrades Paixão - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (UFRGS)
Examinador

.....
Eng. Me. Ailton João Gonçalves Moreira
Examinador

Conceito:.....

Dedico este trabalho a sociedade, para que
possamos, sempre, tornar o mundo um
local mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço excepcionalmente à minha mãe, Patrícia, e ao meu pai, Nelson, por estarem sempre ao meu lado e serem meus melhores amigos. Um muito obrigada à minha amada família, que me deu todo e qualquer suporte para realização de cada trabalho.

Agradeço ao meu namorado, Pedro, que não mediu esforços para me trazer conforto, carinho e amor, me lembrando constantemente do quanto sou capaz.

Agradeço à minha filha de quatro patas, Cléo, que esteve fisicamente ao meu lado durante as inúmeras horas de realização desta pesquisa. Mesmo que na maioria das vezes dormindo, foi uma fonte constante de amor.

Agradeço aos meus professores orientadores, Fernando e Letícia, que me apoiaram e me auxiliaram imensamente no desenvolvimento deste trabalho, sempre com o intuito de me fazer aprender mais.

Agradeço aos colegas de profissão que diariamente se esforçam para colocar em pauta as questões ambientais. E, também, aos amigos de graduação, que tornaram minha jornada universitária mais enriquecedora e alegre.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e todos seus professores, funcionários e terceirizados, que me possibilitaram ter um ensino público de alta qualidade no Brasil.

Agradeço à NewFields, em especial ao Frederico, por me auxiliar nesse estudo e me permitir visitar o *Site*, além de me proporcionar tantos conhecimentos sobre remediação de áreas contaminadas.

Agradeço à empresa Shell, por ceder a área de Paulínia para essa pesquisa e me permitir utilizar os dados para realização de simulações.

Agradeço, sobretudo, à natureza, que com sua grandiosidade e força incontestáveis, me inspira a trabalhar por um futuro mais justo e sustentável.

*“O que nos falta é a mentalidade para ver a
beleza de nosso mundo. Somos cegos
diante da Natureza”.*

José Lutzenberger

RESUMO

CESA, L. Análise de Viabilidade para Utilização Sustentável de Área Remediada como Usina Solar Fotovoltaica: Estudo de Caso em Paulínia, SP. 2024. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho visa realizar uma análise de viabilidade para a implantação de uma usina de geração de energia solar fotovoltaica (UFV) em uma área remediada na cidade de Paulínia, Estado de São Paulo, Brasil. O estudo desenvolveu e aplicou uma metodologia para analisar de que forma a construção e operação da usina é viável, considerando as restrições de uso do solo pela contaminação residual e o monitoramento de longo prazo da água subterrânea. Ao delimitar a área útil para o projeto, estimou-se o potencial de geração de energia da UFV em 5.832,8 MWh/ano, por meio do *software* SAM. A pesquisa quantificou o custo social de carbono e investigou a viabilidade de enquadrar o projeto em iniciativas de carbono neutro. A operação da usina foi capaz de deixar de emitir 17.236 tCO₂ em 10 anos, baseado na matriz elétrica brasileira. Monetariamente, isso representa em torno de R\$ 2.068.320,24 de benefício econômico para a sociedade. A simulação financeira do projeto contou com dois cenários: sem inflação e com inflação no INCC-M de 4,42%, a fim de estabelecer uma faixa de economia de longo prazo para empresa. Estimou-se que, ao final dos 25 anos de vida útil da usina, a empresa pode economizar de R\$ 49.395.518,86 a R\$ 51.150.336,97, com um *payback* entre 6 anos e 5 meses e 6 anos e 9 meses. Os impactos ambientais decorrentes da implementação da UFV foram elencados utilizando a metodologia da Matriz de Leopold, o que resultou em um valor quantitativo de +240. Em comunhão com a avaliação dos impactos negativos e positivos, nos meios físico, biótico e antrópico, foi possível inferir sobre a viabilidade ambiental do projeto. A UFV projetada visa utilizar eficientemente a área remediada, em consonância com o monitoramento da água subterrânea. O objetivo é demonstrar que a utilização de áreas anteriormente contaminadas como fontes de energia renovável pode ser uma solução viável para o ambiente, para a sociedade e para a economia. Esta abordagem não só contribui para a mitigação de impactos ambientais ao reutilizar áreas já antropizadas, mas também promove a diversificação da matriz energética com fontes renováveis, incentivando práticas empresariais mais responsáveis e alinhadas com o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: usina solar fotovoltaica; área remediada; monitoramento de água subterrânea; viabilidade.

ABSTRACT

CESA, L. Feasibility Analysis for Sustainable Use of a Remediated Area as a Solar Photovoltaic Power Plant: Case Study in Paulínia, SP. 2024. 113 p. Undergraduate Thesis (Degree in Environmental Engineering) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

This work aims to conduct a feasibility analysis for the implementation of a solar photovoltaic (PV) power plant in a remediated area in the city of Paulínia, State of São Paulo, Brazil. The study developed and applied a methodology to assess how the construction and operation of the power plant is feasible, considering land use restrictions due to residual contamination and long-term groundwater monitoring. By delineating the useful area for the project, the energy generation potential of the PV plant was estimated at 5,832.8 MWh/year using SAM software. The research quantified the social cost of carbon and investigated the feasibility of framing the project within carbon-neutral initiatives. The plant's operation could prevent the emission of 17,236 tCO₂ over 10 years, based on the Brazilian electricity matrix. Monetarily, this represents approximately R\$ 2,068,320.24 in economic benefit to society. The project's financial simulation considered two scenarios: without inflation and with inflation at 4.42% according to INCC-M, to establish a long-term savings range for the company. It was estimated that, by the end of the plant's 25-year lifespan, the company could save between R\$ 49,395,518.86 and R\$ 51,150,336.97, with a payback period ranging from 6 years and 5 months to 6 years and 9 months. The environmental impacts resulting from the PV plant implementation were listed using the Leopold Matrix methodology, resulting in a quantitative value of +240. Alongside the evaluation of negative and positive impacts in the physical, biotic, and anthropic environments, it was possible to infer the environmental feasibility of the project. The designed PV plant aims to efficiently utilize the remediated area, in harmony with groundwater monitoring. The objective is to demonstrate that the use of previously contaminated areas as sources of renewable energy can be a viable solution for the environment, society, and the economy. This approach not only contributes to mitigating environmental impacts by reusing already anthropized areas but also promotes the diversification of the energy matrix with renewable sources, encouraging more responsible business practices aligned with sustainable development.

Keywords: photovoltaic solar power plant; remediated area; groundwater monitoring; feasibility.

RÉSUMÉ

ESA, L. Analyse de faisabilité pour l'utilisation durable d'une zone réhabilitée comme centrale solaire photovoltaïque : étude de cas à Paulínia, SP. 2024. 113 p. Mémoire de fin d'études (Licence en génie environnemental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Ce travail vise à réaliser une analyse de faisabilité pour l'implantation d'une centrale de production d'énergie solaire photovoltaïque (CPV) dans une zone réhabilitée dans la ville de Paulínia, État de São Paulo, Brésil. L'étude a développé et appliqué une méthodologie pour analyser la faisabilité de la construction et de l'exploitation de la centrale, en tenant compte des restrictions d'utilisation des sols en raison de la contamination résiduelle et de la surveillance à long terme des eaux souterraines. En délimitant la zone utile pour le projet, le potentiel de production d'énergie de l'CPV a été estimé à R\$ 5.832,8 MWh/an grâce au logiciel SAM. La recherche a quantifié le coût social du carbone et a étudié la faisabilité d'intégrer le projet dans des initiatives de neutralité carbone. L'exploitation de la centrale pourrait éviter l'émission de 17.236 tCO₂ sur 10 ans, en se basant sur la matrice électrique brésilienne. Monétairement, cela représente environ R\$ 2.068.320,24 de bénéfice économique pour la société. La simulation financière du projet a pris en compte deux scénarios : sans inflation et avec une inflation de 4,42 % selon l'INCC-M, afin d'établir une plage d'économies à long terme pour l'entreprise. Il a été estimé qu'à la fin des 25 ans de durée de vie de la centrale, l'entreprise pourrait économiser entre R\$ 49.395.518,86 et R\$ 51.150.336,97, avec un retour sur investissement compris entre 6 ans et 5 mois et 6 ans et 9 mois. Les impacts environnementaux découlant de la mise en œuvre de l'CPV ont été listés en utilisant la méthodologie de la Matrice de Leopold, ce qui a donné une valeur quantitative de +240. En lien avec l'évaluation des impacts négatifs et positifs dans les milieux physique, biotique et anthropique, il a été possible d'inférer la faisabilité environnementale du projet. L'CPV projetée vise à utiliser efficacement la zone réhabilitée, en accord avec la surveillance des eaux souterraines. L'objectif est de démontrer que l'utilisation de zones anciennement contaminées comme sources d'énergie renouvelable peut être une solution viable pour l'environnement, la société et l'économie. Cette approche contribue non seulement à la réduction des impacts environnementaux en réutilisant des zones déjà anthropisées, mais elle favorise également la diversification du mix énergétique avec des sources renouvelables, en encourageant des pratiques commerciales plus responsables et alignées sur le développement durable.

Mots-clés : centrale solaire photovoltaïque ; zone réhabilitée ; surveillance des eaux souterraines ; faisabilité.

RESUMEN

CESA, L. Análisis de Viabilidad para el Uso Sostenible de un Área Remediada como Planta Solar Fotovoltaica: Estudio de Caso en Paulínia, SP. 2024. 113 h. Trabajo de Fin de Grado (Graduación en Ingeniería Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de viabilidad para la implementación de una planta de generación de energía solar fotovoltaica (FV) en un área remediada en la ciudad de Paulínia, Estado de São Paulo, Brasil. El estudio desarrolló y aplicó una metodología para analizar la viabilidad de la construcción y operación de la planta, teniendo en cuenta las restricciones de uso del suelo debido a la contaminación residual y la supervisión a largo plazo del agua subterránea. Al delimitar el área útil para el proyecto, se estimó el potencial de generación de energía de la planta FV en 5.832,8 MWh/año mediante el *software* SAM. La investigación cuantificó el costo social del carbono e investigó la viabilidad de integrar el proyecto en iniciativas de carbono neutro. La operación de la planta podría evitar la emisión de 17.236 tCO₂ en 10 años, según la matriz eléctrica brasileña. En términos monetarios, esto representa alrededor de R\$ 2.068.320,24 de beneficio económico para la sociedad. La simulación financiera del proyecto consideró dos escenarios: sin inflación y con una inflación del 4,42 % según el INCC-M, con el fin de establecer un rango de ahorro a largo plazo para la empresa. Se estimó que, al final de los 25 años de vida útil de la planta, la empresa podría ahorrar entre R\$ 49.395.518,86 y R\$ 51.150.336,97, con un período de recuperación de la inversión entre 6 años y 5 meses y 6 años y 9 meses. Los impactos ambientales derivados de la implementación de la planta FV se enumeraron utilizando la metodología de la Matriz de Leopold, lo que resultó en un valor cuantitativo de +240. Junto con la evaluación de los impactos negativos y positivos en los medios físico, biótico y antrópico, fue posible inferir la viabilidad ambiental del proyecto. La UFV proyectada tiene como objetivo utilizar de manera eficiente el área remediada, en consonancia con la supervisión del agua subterránea. El objetivo es demostrar que el uso de áreas previamente contaminadas como fuentes de energía renovable puede ser una solución viable para el medio ambiente, la sociedad y la economía. Este enfoque no solo contribuye a mitigar los impactos ambientales al reutilizar áreas ya antropizadas, sino que también promueve la diversificación de la matriz energética con fuentes renovables, incentivando prácticas empresariales más responsables y alineadas con el desarrollo sostenible.

Palabras clave: planta solar fotovoltaica; área remediada; monitoreo de aguas subterráneas; viabilidad.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contribuições de fontes de energia na geração de eletricidade e na capacidade total instalada.	37
Figura 2: Ranking mundial da fonte solar fotovoltaica.....	38
Figura 3: Mapa do potencial de energia fotovoltaica do Brasil.....	38
Figura 4: Panorama de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil.	39
Figura 5: Ranking estadual da geração de energia solar fotovoltaica distribuída no Brasil.	40
Figura 6: Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício destacando: (1) região tipo n; (2) região tipo p, (3) zona de carga espacial, onde se formou a junção p-n e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos.....	41
Figura 7: Sistema fotovoltaico conectado à rede	42
Figura 8: Sistema autônomo ou isolado.....	44
Figura 9: Sistema híbrido.....	44
Figura 10: Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100 Wp.	47
Figura 11: Curvas I-V para um módulo de 220 Wp, 2 módulos idênticos associados em série e 4 módulos idênticos associados em série.	49
Figura 12: Curvas I-V para um módulo de 220 Wp, 2 módulos idênticos associados em paralelo e 4 módulos idênticos associados em paralelo.....	50
Figura 13: Efeitos causados pela variação da irradiância sobre a curva I-V de um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si), sob temperatura constante de 25° C.	51
Figura 14: Efeitos causados pela variação da temperatura sobre a curva I-V de um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si), sob irradiância constante de 1000 W/m ² . 51	
Figura 15: Curva I-V para 4 módulos conectados em série e sem sombreamento (linha contínua); curva I-V para os mesmos 4 módulos na situação de sombreamento de uma de suas células, que passa a receber 50 % da irradiância original (linha tracejada); curva I-V com o mesmo sombreamento, mas com a utilização de diodos de desvio (curvas com linha contínua e pontos).	52
Figura 16: Aterro sanitário de Hickory Ridge (EUA) com cobertura de geomembrana solar.	54
Figura 17: Usina solar flutuante instalada no Reservatório de Sobradinho, na Bahia.	57
Figura 18: Irradiação solar em plano inclinado em áreas degradadas ou perturbadas no estado de São Paulo	58
Figura 19: Mapa do Site com suas zonas de interesse.	59
Figura 20: Antiga área Opala.	63
Figura 21: Região da antiga Área de Formulação, região onde houve a maior escavação.	64
Figura 22: Antiga Área de Formulação.	65
Figura 23: Área de reflorestamento no bairro Recanto dos Pássaros.	66

Figura 24: Área Recanto dos Pássaros atualmente.	66
Figura 25: Linha onde se encontra o dreno passivo.	67
Figura 26: Caixa de inspeção do dreno passivo.	67
Figura 27: Área de estudo em maio de 2005.	69
Figura 28: Área de estudo em fevereiro de 2024.	69
Figura 29: Vias de acesso.	69
Figura 30: Vias de acesso.	69
Figura 31: Drenagem.	70
Figura 32: Drenagem.	70
Figura 33: Localização da área de estudo.	71
Figura 34: Limites atuais da área de estudo.	71
Figura 35: Declividade da área de estudo.	72
Figura 36: Cobertura do solo concretada e com vegetação remanescente.	73
Figura 37: Polígonos de restrição para controle institucional.	73
Figura 38: A bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. Ponto P.1, nascente do Rio Atibaia, na estação de captação de água da cidade de Atibaia. Ponto P.2, localizado na estação de captação de água da cidade de Campinas e Ponto P.3, logo após a afluência do Ribeirão Anhumas, na cidade de Paulínia.	74
Figura 39: Estação meteorológica selecionada (Código 83721 – Campinas Viracopos).	75
Figura 40: Rosa dos ventos para estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721). 78	
Figura 41: Representação da direção do vento na UFV.	79
Figura 42: Área útil empregada para geração de energia.	80
Figura 43: Fundação do tipo bloco para painéis fotovoltaicos.	81
Figura 44: Dimensões do módulo fotovoltaico selecionado.	83
Figura 45: Representação da localização dos poços de monitoramento de água subterrânea, com destaque em vermelho.	84
Figura 46: Distanciamento entre os módulos.	84
Figura 47: Incidência solar horária.	95
Figura 48: Perdas de energia no sistema.	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Especificações das subáreas de geração.	81
Quadro 2: Valores típicos de albedo para diferentes superfícies.....	82
Quadro 3: Dados elétricos do módulo fotovoltaico selecionado.	83
Quadro 4: Configuração dos módulos fotovoltaicos.	85
Quadro 5: Dados elétricos do inversor selecionado.	86
Quadro 6: Fator de emissão de CO ₂ mensal no ano de 2023.....	88
Quadro 7: Quantidades empregadas para cálculo financeiro.....	90
Quadro 8: Potencial anual de geração de energia por subárea.	94
Quadro 9: Emissões evitadas (tCO ₂).....	96
Quadro 10: Fluxo de caixa do projeto em reais sem inflação.	98
Quadro 11: Fluxo de caixa do projeto em reais com inflação do INCC-M.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configuração dos inversores e controladores de carga.	86
Tabela 2: Estimativa de investimentos para implantação da UFV.	91
Tabela 3: Classificação de magnitude e importância dos impactos.	93
Tabela 4: Matriz de Leopold para o projeto da UFV.	104

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC: Área Contaminada

ACI: Área Contaminada sob Intervenção

ACL: Ambiente de Contratação Livre

ACR: Ambiente de Contratação Regulada

AIA: Avaliação de Impacto Ambiental

AME: Área em Processo de Monitoramento para Encerramento

AMR: Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação

ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ANM: Atenuação Natural Monitorada

AP: Área Potencialmente Contaminada

APP: Área de Preservação Permanente

AR: Área Reabilitada

AS: Área Suspeita de Contaminação

ASMOC: Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia

BRPs: Barreiras Reativas Permeáveis

c.a: Corrente Alternada

CAPEX: Investimento Inicial do Projeto

c.c.: Corrente Contínua

CCBS: *Climate, Community & Biodiversity Standards*; Padrões de Clima, Comunidade e Biodiversidade

CEPEL: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Cfa: Clima Subtropical Úmido

CISP: Centro Industrial Shell Paulínia

CNPJ: Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONT: Investimento para Contingências

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental

FGV: Fundação Getúlio Vargas

FIT: Ficha de Informação Toxicológica

FV: Fotovoltaico

GC: Geração Centralizada

GD: Geração Distribuída

GEEs: Gases de Efeito Estufa

IARC: Agência Internacional de Pesquisa em Câncer

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBIO: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IEA: International Energy Agency, Agência Internacional de Energia

ILR: Inverter Loading Ratio, Taxa de Carregamento dos Inversores

IMA: Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina

INCC-M: Índice Nacional de Custo da Construção

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

I-RECs: International Renewable Energy Certificates

IRENA: International Renewable Energy Agency, Agência Internacional para as Energias Renováveis

ISO: Organização Internacional de Normalização

LABEEE: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

LO: Licença de Operação

MDE: Modelo Digital de Elevação

MPPT: Ponto Rastreador de Potência Máxima

NBR: Associação Brasileira de Normas Técnicas

NFCCC: *United Nations Framework Convention on Climate Change*, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

NOCT: *Nominal Operating Cell Temperature*, Temperatura Nominal da Célula Operacional

ODS: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU: Organização das Nações Unidas

OPEX: Investimento para operação

ORC: Compostos Liberadores de Oxigênio

POPs: Poluentes Orgânicos Persistentes

PROJETEEE: Projetando Edificações Energeticamente Eficientes

PWM: *Pulse Width Modulation*, Modulação por Largura de Pulso

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos

SAM: *System Advisor Model*

SBPL: Shell Brasil Petróleo

SCC: *Social Cost of Carbon*, Custo Social do Carbono

SFCR: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

SFD: Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares

SFH: Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

SFI: Sistemas Fotovoltaicos Isolados

SIGRH: Sistema de Gerenciamento de Recursos Humanos

SPPM: Seguidores de Potência Máxima

SQIs: Substâncias Químicas de Interesse

STC: *Standard Test Conditions*, Condições-Padrão de Ensaio

SVE: *Soil Vapor Extraction*, Extração de Vapor do Solo

SVOCs: Compostos Orgânicos Semivoláteis

UFV: Usina Fotovoltaica

UGRHs: Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UHE: Usina Hidrelétrica

USEPA: *U.S. Environmental Protection Agency*, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

VCS: *Verified Carbon Standard*, Padrão de Carbono Verificado

VOCs: Compostos Orgânicos Voláteis

LISTA DE SÍMBOLOS

°C: Graus celsius

1,2-DCA: 1,2-Dicloroetano

A: Ampere

AM: Massa de ar

BTEX: Benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos

CHC: *Chlorinated hydrocarbon*, hidrocarboneto clorado

cm: Centímetros

CO₂: Dióxido de carbono

c-Si: Silício cristalino

FF: Fator de forma

G: Irradiância solar

GW: Gigawatt

HPAs ou PAH: Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Imp: Corrente de máxima potência

Isc: Corrente elétrica de curto-circuito

km: Quilômetros

kW: Quilowatt

kWh: Quilowatt-hora

L: Litros

Li-ion: Íon de lítio

m: Metros

m²: Metros quadrados

m-Si: Silício monocristalino

MW: Megawatt

MWh: Megawatt-hora

NiCd: Níquel-cádmio

NiMH: Níquel-hidreto metálico

Pbácido: Chumbo-ácido

PCB: *Polychlorinated biphenyls*, bifenilas policloradas

Pmp ou Pmax: Potência máxima de pico

p-Si: Silício policristalino

s: Segundo

t: Toneladas

TPH: Hidrocarboneto total de petróleo

TWh: Terawatt-hora

V: Volt

Vmp: Tensão de máxima potência

Voc: Tensão de circuito aberto

W: Watt

Wp: Watt-pico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
2. OBJETIVOS	25
2.1. OBJETIVO GERAL	25
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1. REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS	25
3.1.1. ÁREAS CONTAMINADAS	25
3.1.2. GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS	27
3.1.2.1. Definição da Região de Interesse.....	28
3.1.2.2. Identificação de Áreas Potencialmente Contaminadas	28
3.1.2.3. Avaliação Preliminar	28
3.1.2.4. Investigação Confirmatória	29
3.1.2.5. Investigação Detalhada	29
3.1.2.6. Avaliação de Risco.....	29
3.1.2.7. Investigação para Remediação.....	29
3.1.2.8. Projeto de Remediação.....	30
3.1.2.9. Remediação	30
3.1.2.10. Monitoramento	30
3.1.3. REMEDIAÇÃO	30
3.1.4. ÁREAS REABILITADA PARA USO DECLARADOS (AR)	33
3.1.5. ESTUDOS DE CASO	34
3.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	36
3.2.1. PANORAMA MUNDIAL E BRASILEIRO	36
3.2.2. EFEITO FOTOVOLTAICO	40
3.2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	42
3.2.3.1. Sistema Conectado à Rede (<i>On Grid</i>).....	42
3.2.3.2. Sistema Autônomo ou Isolado (<i>Off Grid</i>).....	43
3.2.3.3. Sistema Híbrido.....	44
3.2.4. GERAÇÃO DE ENERGIA	45
3.2.4.1. Geração Distribuída (GD)	45
3.2.4.2. Geração Centralizada (GC)	45
3.2.5. EQUIPAMENTOS	46
3.2.5.1. Módulo.....	46
3.2.5.2. Inversor	47
3.2.5.3. Bateria.....	47

3.2.5.4.	Controlador de Carga.....	48
3.2.6.	ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS.....	49
3.2.6.1.	Conectados em Série	49
3.2.6.2.	Conectados em Paralelo	49
3.2.7.	FATORES EXTERNOS INFLUENTES	50
3.2.7.1.	Posição do Sol e Inclinação dos Painéis	50
3.2.7.2.	Irradiância Solar	51
3.2.7.3.	Temperatura.....	51
3.2.7.4.	Efeito de Sombreamento	52
3.2.8.	CARBONO NEUTRO.....	53
3.3.	GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO USO FUTURO DE ÁREAS ANTROPIZADAS.....	54
3.3.1.	ATERROS SOLARES.....	54
3.3.2.	UFV EM ÁREA DEGRADADA POR PEDREIRA	55
3.3.3.	UFV FLUTUANTE EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS.....	55
4.	RELEVÂNCIA DO ESTUDO.....	57
5.	ÁREA DE ESTUDO	59
5.1.	HISTÓRICO DA CONTAMINAÇÃO	59
5.2.	REMEDIAÇÃO DA ÁREA CONTAMINADA	61
5.2.1.	ÁREA DO INCINERADOR	62
5.2.2.	ÁREA DAS BACIAS DE EVAPORAÇÃO.....	62
5.2.3.	UNIDADE OPALA	62
5.2.4.	ÁREA DE FORMULAÇÃO.....	63
5.2.5.	BAIRRO RECANTO DOS PÁSSAROS.....	65
5.2.6.	ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	67
5.2.7.	RIO ATIBAIA.....	68
5.3.	AÇÕES FUTURAS E TERMO DE REABILITAÇÃO PARA USO DECLARADO	68
5.4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	70
5.4.1.	DECLIVIDADE	72
5.4.2.	PEDOLOGIA E USO E COBERTURA DO SOLO.....	72
5.4.3.	HIDROGRAFIA	74
5.4.4.	UNIDADE AQUÍFERA	74
5.4.5.	CLIMATOLOGIA	75
5.4.5.1.	Temperatura.....	76
5.4.5.2.	Precipitação	76
5.4.5.3.	Radiação Solar.....	77

5.4.5.4. Vento.....	77
6. METODOLOGIA	79
6.1. DIMENSIONAMENTO DA UFV	79
6.1.1. ÁREA ÚTIL	80
6.1.2. FUNDAÇÃO	81
6.1.3. LOCALIZAÇÃO E RECURSOS.....	82
6.1.4. MÓDULO FOTOVOLTAICO	82
6.1.5. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA	83
6.1.7. PERDAS	86
6.2. ANÁLISE DO CUSTO SOCIAL DO CARBONO	87
6.2.1. CERTIFICAÇÃO DO PROJETO	88
6.3. ANÁLISE FINANCEIRA	89
6.3.1. ENTRADAS	89
6.3.2. SAÍDAS	89
6.3.3. PAYBACK DO INVESTIMENTO	91
6.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE AMBIENTAL	92
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
7.1. POTENCIAL DE GERAÇÃO	93
7.2. CUSTO SOCIAL DO CARBONO	96
7.3. DESEMPENHO FINANCEIRO	96
7.4. VIABILIDADE AMBIENTAL.....	102
8. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável com grande potencial no país e no mundo. Segundo dados acumulados desde 2012 até maio de 2024 (ABSOLAR; ANEEL, 2024), no Brasil existem mais de 44,3 GW operacionais, R\$ 208,2 bilhões em novos investimentos, 1,3 milhões de novos empregos, R\$ 64,0 bilhões em arrecadação de tributos e 53,7 milhões de toneladas de CO₂ evitadas com projetos de energia fotovoltaica.

Independente da fonte, todas as usinas de geração de energia elétrica possuem múltiplos impactos ambientais durante seu ciclo de vida (TURNERY; FTHENAKIS, 2011), em especial impactos ambientais e sociais associados ao empreendimento, que ocorrem principalmente nas fases instalação e operação. Como exemplo de impactos, destacam-se (LIMA, 2021): erosão, contaminação do solo, geração de resíduos, comprometimento da paisagem, diminuição da biodiversidade, e perda de cobertura vegetal e habitat natural.

Essas características são comuns em áreas ambientalmente degradadas ou perturbadas por atividades antrópicas, o que torna atrativo o uso dessas regiões para a instalação de novas usinas solares fotovoltaicas (UFV). Desta forma, como LIMA (2021) ressalta, isso evita a possibilidade de causar danos a áreas ainda não impactadas, mantendo a conformidade com o Princípio da Prevenção.

Por outro lado, a contaminação de áreas também é uma realidade no Brasil. No sistema de informação "Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo" (SEMIL, 2024), estão registradas: 3.046 áreas contaminadas (em processo ou não de reabilitação) e 3.692 áreas em monitoramento ou já reabilitadas para uso declarado. Entre elas, destaca-se a área reabilitada de Shell Paulínia. No passado, essa área sofreu uma contaminação e, após todas as etapas de remediação realizadas em conjunto com as autoridades competentes, hoje é classificada como Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME).

A pesquisa visa enfatizar a importância da remediação de áreas contaminadas e a implementação de planos para o uso sustentável futuro dessas regiões. É crucial que as empresas assumam a responsabilidade de manter um ambiente seguro e sustentável mesmo após a ocorrência de alguma contaminação, uma vez que a engenharia atual oferece soluções viáveis para enfrentar desafios desse tipo. Nesse sentido, o presente trabalho buscou identificar as considerações essenciais para a utilização da área remediada como local para a geração de energia solar, empregando uma metodologia de macro análise que pode ser aplicada a outros estudos de caso.

Para isso, estimou-se potencial de geração da usina, por meio da análise de localização, de irradiação solar disponível, de eficiência dos equipamentos selecionados, entre outros aspectos. Com relação aos danos sociais e ambientais causados pelas emissões de carbono, a estimativa do custo social do carbono forneceu uma métrica quantitativa e monetária da capacidade da usina em evitar a emissão de CO₂, enquadrando o empreendimento de um projeto de carbono neutro, capaz de ser certificado. A viabilidade econômica do projeto e a geração de benefícios ao longo da vida útil da UFV foram avaliadas por meio de projeções de investimentos e receitas. Isso forneceu uma projeção dos fluxos de caixa futuros e do retorno esperado sobre o investimento.

O trabalho se iniciou com uma revisão bibliográfica sobre os dois temas principais: remediação de áreas contaminadas e energia solar fotovoltaica. Também foram apresentados exemplos de como esses dois assuntos são capazes se relacionar. Posteriormente, foi realizada

uma contextualização histórica da área de estudo e sua situação atual, juntamente com uma caracterização detalhada do local. Aplicou-se a metodologia desenvolvida para, assim, analisar os resultados e avaliar a viabilidade ambiental do projeto. Por fim, apresentou-se uma breve conclusão com recomendações para trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é desenvolver uma análise de viabilidade, em uma área remediada na cidade de Paulínia, Estado de São Paulo, para utilização sustentável como usina de geração de energia solar fotovoltaica (UFV).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mais especificamente, o estudo busca:

- Elencar as especificações necessárias para a implantação do parque de geração de energia fotovoltaica, tendo em vista as restrições previstas de uso e ocupação do solo pela contaminação residual;
- Estimar o potencial gerador da UFV através da delimitação da área útil do empreendimento;
- Quantificar o custo social do carbono e avaliar a possibilidade de enquadramento em projetos de carbono neutro;
- Calcular o *payback* e a faixa de economia do projeto, através da avaliação dos investimentos e receitas;
- Elencar e analisar os impactos ambientais negativos e positivos da implementação da UFV na área remediada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção conta com a revisão bibliográfica do estudo. Como o trabalho abordou dois temas inicialmente distintos, a revisão foi dividida em duas partes: a primeira parte abrangeu a gestão e remediação de áreas contaminadas, enquanto a segunda tratou dos aspectos de projetos de energia solar fotovoltaica. Ao final, foram apresentados exemplos de como esses dois temas convergem no estado da arte atual e como deram origem a este estudo.

3.1. REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Nesta seção, foi apresentado o referencial bibliográfico juntamente com os conceitos fundamentais para a remediação de áreas contaminadas. Este tema é essencial para compreender a complexidade dos processos de reabilitação ambiental e implementar estratégias eficazes que visem à recuperação sustentável dessas áreas.

3.1.1. ÁREAS CONTAMINADAS

Segundo CETESB (2001), uma área contaminada pode ser definida como uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação, causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. Nessa área, os poluentes ou contaminantes podem concentrar-se em subsuperfície nos diferentes compartimentos do ambiente, por exemplo no solo, nos sedimentos, nas rochas, nos

materiais utilizados para aterrar os terrenos, nas águas subterrâneas ou, de uma forma geral, nas zonas não saturada e saturada, além de poderem concentrar-se nas paredes, nos pisos e nas estruturas de construções. Os poluentes ou contaminantes podem ser transportados a partir desses meios, propagando-se por diferentes vias, como, por exemplo, o ar, o próprio solo, as águas subterrâneas e superficiais. Isso é capaz de gerar alterações nas características naturais ou na qualidade do meio, podendo representar impactos negativos e/ou riscos sobre os bens a proteger e sobre a saúde humana. Os efeitos podem ser tanto na própria área, quanto em seus arredores.

Por outro lado, tem-se o conceito de área degradada. Segundo o ICMBIO (2014), área degradada é aquela impossibilitada de retornar, por uma trajetória natural, a um ecossistema que se assemelha ao estado inicial. Ela dificilmente é restaurada, mas é passível de ser recuperada.

Deste modo, tem-se que uma área contaminada pode ser considerada um caso particular de uma área degradada, onde ocorrem alterações principalmente das propriedades químicas, ou seja, contaminação (CETESB, 2001).

As definições de áreas contaminadas e degradadas tornam-se aspectos cruciais ao considerar a legislação federal. A Política Nacional do Meio Ambiente (CONGRESSO NACIONAL, 1981) prevê, em seu Artigo 2º, a recuperação de áreas degradadas e estabelece, em seu Artigo 4º:

“À imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados e, ao usuário, da contribuição pela utilização de recursos ambientais com fins econômicos” (CONGRESSO NACIONAL, 1981).

A contaminação pode ser originada de diferentes fontes, tendo em vista nossos processos produtivos que, em sua maioria, geram resíduos e subprodutos capazes de poluir o meio ambiente. O termo poluição, por sua vez, é caracterizado pela Lei nº 997/76 (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1976) a qual dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente. Em seu Artigo 2º:

“Considera-se poluição do meio-ambiente a presença, o lançamento ou a liberação, nas águas, no ar ou no solo, de toda e qualquer forma de matéria ou energia, com intensidade, em quantidade, de concentração ou com características em desacordo com as que forem estabelecidas em decorrência desta Lei, ou que retornem ou possam tornar as águas, o ar ou solo:

I - Impróprios, nocivos ou ofensivos à saúde;

II - Inconvenientes ao bem-estar público;

III - Danosos aos materiais, à fauna e à flora;

IV - Prejudiciais à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade” (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1976).

Assim, é possível realizar o cadastrado da área contaminada, sendo considerado o instrumento central do gerenciamento de AC. Conforme a CETESB (2001), o cadastro representa

o conjunto de operações que estabelecem o registro e o armazenamento dos dados obtidos sobre áreas potencialmente contaminadas (APs), áreas suspeitas de contaminação (ASs) e áreas contaminadas (ACs). É, sendo composto de duas partes principais: cadastro físico e cadastro informatizado (CETESB, 2001).

3.1.2. GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

A Resolução CONAMA nº 420/09:

“Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas” (CONAMA, 2009).

No Artigo 4º desta Resolução é estabelecido que:

“As diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas abrangem o solo e o subsolo, com todos seus componentes sólidos, líquidos e gasosos” (CONAMA, 2009).

Deste modo, a Resolução apresenta as diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas, o qual é especificado no Artigo 22º os:

“Procedimentos e ações voltadas ao atendimento dos seguintes objetivos:

I - Eliminar o perigo ou reduzir o risco à saúde humana;

II - Eliminar ou minimizar os riscos ao meio ambiente;

III - Evitar danos aos demais bens a proteger;

IV - Evitar danos ao bem-estar público durante a execução de ações para reabilitação;

V - Possibilitar o uso declarado ou futuro da área, observando o planejamento de uso e ocupação do solo” (CONAMA, 2009).

De forma subsequente, o Artigo 23º traz as ações de investigação e de gestão competentes ao órgão ambiental, as quais contemplam:

“I - Identificação: etapa em que serão identificadas áreas suspeitas de contaminação com base em avaliação preliminar, e, para aquelas em que houver indícios de contaminação, deve ser realizada uma investigação confirmatória, as expensas do responsável, segundo as normas técnicas ou procedimentos vigentes.

II - Diagnóstico: etapa que inclui a investigação detalhada e avaliação de risco, as expensas do responsável, segundo as normas técnicas ou procedimentos vigentes, com objetivo de subsidiar a etapa de intervenção, após a investigação confirmatória que tenha identificado substâncias químicas em concentrações acima do valor de investigação.

III - Intervenção: etapa de execução de ações de controle para a eliminação do perigo ou redução, a níveis toleráveis, dos riscos identificados na etapa de diagnóstico, bem como o monitoramento da

eficácia das ações executadas, considerando o uso atual e futuro da área, segundo as normas técnicas ou procedimentos vigentes” (CONAMA, 2009).

De maneira a refinar as ações, o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001) desenvolve e apresenta uma metodologia de gestão dividida em duas partes. A primeira parte visa identificar e localizar a área, seguindo quatro etapas:

- Definição da região de interesse;
- Identificação de áreas potencialmente contaminadas;
- Avaliação preliminar;
- Investigação confirmatória.

Na segunda parte, inicia-se o processo de remediação da área contaminada através da aplicação de medidas destinadas a recuperar a região de acordo com seu uso futuro. As etapas são as seguintes:

- Investigação detalhada;
- Avaliação de risco;
- Investigação para remediação;
- Projeto de remediação;
- Remediação;
- Monitoramento.

Cada etapa, da primeira e da segunda parte, foi detalhada na sequência.

3.1.2.1. Definição da Região de Interesse

A definição da área tem como objetivo compreender a extensão e o perímetro afetado pela possível contaminação e, a partir disso, designar o órgão gerenciador. Posteriormente, devem ser identificados os bens a proteger da região.

Segundo a Lei 6.938/81, definida como a Política Nacional do Meio Ambiente (CONGRESSO NACIONAL, 1981), são considerados bens a proteger:

- A saúde e o bem-estar da população;
- A fauna e a flora;
- A qualidade do solo, das águas e do ar;
- Os interesses de proteção à natureza/paisagem;
- A ordenação territorial e planejamento regional e urbano;
- A segurança e ordem pública.

3.1.2.2. Identificação de Áreas Potencialmente Contaminadas

Nessa etapa, são identificadas as áreas existentes na região de interesse onde são manipuladas ou foram manipuladas substâncias, cujas características físico-químicas, biológicas e toxicológicas possam causar danos aos bens a proteger, caso estas entrem em contato com os mesmos (CETESB, 2001).

3.1.2.3. Avaliação Preliminar

A execução da etapa de avaliação preliminar consiste basicamente na elaboração de um diagnóstico inicial das áreas potencialmente contaminadas, identificadas na etapa anterior, o

que será possível realizando-se um levantamento de informações existentes e de informações coletadas em inspeções de reconhecimento em cada uma dessas áreas (CETESB, 2001).

As informações podem ser obtidas através do estudo de dados existentes e históricos e/ou inspeção e reconhecimento da área. Os resultados desta avaliação servem como base para a classificação da área.

Segundo CETESB (2001), os dados obtidos nessa etapa devem ser interpretados visando formular hipóteses sobre: as características da fonte de contaminação, as prováveis vias de transporte dos contaminantes, a distribuição espacial da contaminação, e os prováveis receptores ou bens a proteger atingidos. Assim, é possível estabelecer um modelo conceitual inicial da área.

3.1.2.4. Investigação Confirmatória

O objetivo principal desta etapa é confirmar ou não a contaminação na área.

A definição de uma área contaminada ou a comprovação da contaminação ocorrerá pela realização de análises específicas, tomando-se como base o conhecimento adquirido sobre a área nas etapas anteriores e utilizando-se diferentes técnicas de investigação, isolada ou conjuntamente, cuja seleção depende das características específicas de cada área em estudo (CETESB, 2001).

O processo de confirmação da contaminação dá-se, basicamente, pela tomada de amostras de solo e/ou água subterrânea para análises químicas. O número de amostras coletadas deve ser reduzido, porém suficientes para comprovar a contaminação (CETESB, 2001). Para as análises na área, utiliza-se como base as informações obtidas na avaliação preliminar.

Por fim, a interpretação dos resultados das análises realizadas nas amostras coletadas pela comparação dos valores de concentração obtidos com os valores de concentração estabelecidos em listas de padrões, definidas pelo órgão responsável pelo gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 2001).

3.1.2.5. Investigação Detalhada

Esta etapa é a primeira etapa da recuperação/remediação da área contaminada. Busca-se quantificar a contaminação, isto é, avaliar detalhadamente as características da fonte de contaminação e dos meios afetados, determinando-se as dimensões das áreas ou volumes afetados, os tipos de contaminantes presentes e suas concentrações. Da mesma forma, devem ser definidas as características da pluma de contaminação, como seus limites e sua taxa de propagação (CETESB, 2001).

3.1.2.6. Avaliação de Risco

A avaliação de risco busca a quantificação dos riscos gerados pelas áreas contaminadas aos bens a proteger, como a saúde da população e os ecossistemas, para edificações, instalações de infraestrutura urbana, produção agrícola e outros. Essa quantificação é baseada em princípios de toxicologia, química e no conhecimento sobre o comportamento e transporte dos contaminantes (CETESB, 2001). A partir disso, torna-se compreensível os meios e métodos para realizar a remediação tendo em vista o uso posterior da área.

3.1.2.7. Investigação para Remediação

Segundo a CETESB (2001), o objetivo desta etapa é selecionar, dentre as opções de técnicas existentes, qual ou quais são possíveis, apropriadas e legalmente permissíveis de serem aplicadas para o caso considerado. Para isso devem ser realizados:

- Levantamento das técnicas de remediação;
- Elaboração do plano de investigação;
- Execução de ensaios piloto em campo e em laboratório;
- Realização de monitoramento e modelagem matemática;
- Interpretação dos resultados;
- Definição das técnicas de remediação.

Em seguida, deve ser estabelecido um plano de investigação, necessário para a implantação e execução de ensaios piloto em campo e em laboratório que podem ser realizados para testar a adequabilidade de cada uma das técnicas para conter ou tratar (reduzir ou eliminar) a contaminação, avaliar a eficiência e a confiabilidade das técnicas, além de considerar aspectos legais e ambientais, custos e tempo de implantação e operação (CETESB, 2001).

3.1.2.8. Projeto de Remediação

De acordo com a CETESB (2001), o projeto de remediação serve como base técnica para o órgão gerenciador ou órgão de controle ambiental avaliar a possibilidade de autorizar ou não a implantação e operação do sistema de remediação proposto, devendo ser apresentadas todas as informações sobre a área contaminada, levantadas nas etapas anteriores.

De forma mais detalhada, o Manual (CETESB, 2001) estabelece que o projeto deve conter plano detalhado de segurança dos trabalhadores e da vizinhança; plano detalhado de implantação e operação do sistema de remediação, contendo procedimentos e cronogramas; e plano de monitoramento da eficiência do sistema, com pontos de coleta de dados definidos, parâmetros a ser analisados, frequência de amostragem e limites ou padrões definidos como objetivos a serem atingidos pela remediação para interpretação dos resultados.

3.1.2.9. Remediação

A remediação de áreas contaminadas consiste na implementação de medidas que resultem no saneamento da área/material contaminado e/ou na contenção e isolamento dos contaminantes, de modo a atingir os objetivos aprovados a partir do projeto de remediação. Os trabalhos de remediação das áreas contaminadas devem ser continuamente avaliados de modo a verificar a real eficiência das medidas implementadas, assim como dos possíveis impactos causados aos bens a proteger pelas ações de remediação. O encerramento dessa etapa se dará, após anuência do órgão de controle ambiental, quando os níveis definidos no projeto de remediação forem atingidos (CETESB, 2001).

3.1.2.10. Monitoramento

Segundo a CETESB (2001), a área contaminada deve permanecer sob contínuo monitoramento, por um período a ser definido pelo órgão de controle ambiental. Deste modo, os resultados do monitoramento são utilizados para verificar a eficiência da remediação, permitindo compreender se os objetivos do projeto estão realmente sendo atingidos.

3.1.3. REMEDIAÇÃO

Como apresentado pela CETESB (2001), as medidas de remediação podem ser divididas em dois tipos, aplicadas individualmente ou em conjunto. São elas: medidas de contenção/isolamento da contaminação e medidas para o tratamento dos meios contaminados que visam eliminar ou reduzir os níveis de contaminação a níveis aceitáveis ou previamente definidos.

Com relação ao risco, principalmente três abordagens são empregadas no planejamento da remediação em uma área contaminada:

- Mudança do uso definido da área para minimizar o risco;
- Remoção ou destruição dos contaminantes para a eliminação do risco;
- Redução da concentração dos contaminantes ou contenção desses para eliminar ou minimizar risco.

Conforme exposto por CETESB (2017), a seleção da técnica ou do conjunto de técnicas adotadas para a remediação seguem critérios de seleção considerando a disponibilidade da técnica; a aplicabilidade, considerando as substâncias químicas de interesse e o meio contaminado; as consequências de sua aplicação; o custo; o histórico de utilização da técnica para casos similares; o tempo necessário para atingir as metas de remediação; e, claro, o objetivo para o uso futuro da área.

Conforme apresentado pela empresa HIDROPLAN (2022), a remediação de uma área contaminada pode ocorrer, basicamente, de três formas:

- Remediação *in situ*: são aplicadas técnicas de remediação no local onde se encontra a contaminação;
- Remediação *ex situ* com tratamento *on site*: é realizada a extração de água subterrânea e/ou do solo contaminados e as técnicas de remediação são aplicadas em superfície, no local onde se encontra a contaminação;
- Remediação *ex situ* com tratamento *off site*: é realizado a extração de água subterrânea e/ou do solo contaminados e as técnicas de remediação são aplicadas fora do local onde se encontra a contaminação.

Algumas das técnicas de remediação utilizadas no Brasil são detalhadas na sequência.

Pump and Treat: Segundo a empresa HIDROPLAN (2022), essa tecnologia se refere a um processo físico de extração de águas contaminadas da zona saturada, através de um poço que bombeia a água para superfície. O tratamento dessa água contaminada pode ser feito acima do solo (*on site*) ou fora da área (*off site*), de modo a atingir o nível de descontaminação desejável.

Tecnologias Térmicas (*Thermal Enhanced*): Neste método os resíduos são aquecidos para provocar a volatilização dos compostos orgânicos voláteis e semivoláteis. Podem ser empregadas a injeção de água ou vapores, aquecimento por resistividade elétrica ou aquecimento por condutividade térmica, permitindo aumentar a mobilidade dos contaminantes (SILVA, 2022). Isto ocorre, pois, com o aumento da temperatura no solo, a constante da lei de Henry da substância de interesse também aumentará, proporcionando, assim, maior volatilidade do contaminante (SUTHERSAN *et al.*, 2017).

Extração de Vapor do Solo (SVE): A extração de vapores, do inglês Soil Vapor Extraction (SVE), é uma técnica utilizada para a remoção de compostos voláteis do solo através da transferência de massa interfacial entre o contaminante e o ar que flui (SUTHERSAN *et al.*, 2017). Esta remoção ocorre, na zona vadosa, por meio de bombeamento por vácuo, através de poços

de extração verticais ou horizontais (FRTR, [s.d.]). Conforme SUTHERSAN *et al.* (2017) é possível prever a aplicabilidade da técnica considerando dois parâmetros básicos: a permeabilidade do solo e a volatilidade do contaminante. O gás retirado pela extração de vapores do solo deve passar por uma unidade de tratamento de vapores (TECNOHIDRO, [s.d.]). O fato de o processo envolver fluxo contínuo de ar no solo promove biodegradação *in situ* dos compostos de baixa volatilidade que podem estar presentes (TECNOHIDRO, [s.d.]).

Aeração *in situ* (*air sparging*): Utilizada para remediação de compostos orgânicos voláteis dissolvidos na água subterrânea ou sorvidos em partículas de solo da zona saturada. As injeções controladas de ar promovem o arraste e o desprendimento dos contaminantes através da sua volatilização, conforme apresentado pela HIDROPLAN (2022). O *air sparging* deve ser utilizado em conjunto com um Sistema de Extração de Vapores (SVE), para onde os contaminantes são carregados. Os grupos-alvo de contaminantes do *air sparging* são VOC e combustíveis derivados de petróleo (TECNOHIDRO, [s.d.]).

Barreiras Reativas Permeáveis (BRP): O princípio dessa tecnologia consiste na alocação de um material reativo no subsolo, onde uma pluma de água subterrânea contaminada flui por esse material, promovendo reações que atenuam a carga de contaminante. Estas barreiras promovem a passagem das águas subterrâneas através de porções reativas que possibilitam a remediação, por processos físicos, químicos e/ou biológicos, de solos contaminados com CHC e metais pesados (HIDROPLAN, 2022).

Escavação e Remoção: A escavação e remoção do solo consiste na substituição de solo contaminado por solo limpo. Após isso, o solo contaminado deve ser tratado ou destinado adequadamente, podendo ser coprocessado ou disposto em aterro industrial licenciado (SANTOS; UNGARI; SANTOS, 2008).

Incineração: A incineração é um processo de destruição térmica realizado sob alta temperatura (900 a 1250 °C) com tempo de residência controlada. É utilizado para o tratamento de resíduos de alta periculosidade, ou que necessitam de destruição completa e segura. É muito usado para a extração de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis, como PAHs, PCBs, pesticidas (HIDROPLAN, 2022). Entretanto, a incineração gera emissões de substâncias nocivas, por isso é de suma importância a realização em local controlado com tratamento de gases.

Solidificação/Estabilização: Segundo a HIDROPLAN (2022), este é um método que promove o isolamento de poluentes, como CHC e metais pesados, mas não a sua remoção. Trata-se da imobilização física ou química dos contaminantes, através da adição de compostos químicos no solo e na água subterrânea que, por meio de reações químicas, estabilizam ou modificam quimicamente os contaminantes tornando-os menos perigosos.

Lavagem do Solo: Este processo promove a remoção física dos contaminantes da zona saturada, principalmente compostos orgânicos voláteis e BTEX, através de poços perfurados no solo, aplicando extração a vácuo, de acordo com a HIDROPLAN (2022). O objetivo desta técnica é diminuir a tensão superficial dos contaminantes em fase separada (livre ou residual), e direcioná-los para uma área onde possam ser removidos por simples extração (ITRC, 2003). Deste modo, a lavagem de solo pode ser utilizada paralelamente a outras técnicas (PANKOW; CHERRY, 1996).

Biorremediação: A biorremediação é uma técnica que consiste no uso de microorganismos *in situ* para realizar a degradação aeróbica ou anaeróbica dos contaminantes presentes em zona não saturada ou saturada. Para aplicação desta técnica, é necessário estudar

o uso da biota existente no meio para que possa promover sua bioaumentação, e assim, favorecer a degradação dos contaminantes. Pode-se, também, realizar aplicação de microorganismos que sejam capazes de degradar os contaminantes, e que também sejam capazes de se reproduzirem no meio. A aplicação desta solução de microrganismos pode ser realizada através de poços de injeção ou pontos de remoção na fonte de contaminação (SILVA, 2022).

Fitorremediação: A fitorremediação se refere ao uso de plantas na descontaminação de solos poluídos, principalmente com metais pesados e poluentes orgânicos, reduzindo seus teores a níveis seguros à saúde humana, além de contribuir na melhoria das características físicas, químicas e biológicas destas áreas (HIDROPLAN, 2022). A fitorremediação possui também, como importante característica, sua grande versatilidade, podendo ser utilizada para remediação do meio aquático, ar ou solo, com variantes que dependem dos objetivos a serem atingidos (HIDROPLAN, 2022).

Atenuação Natural Monitorada (ANM): A Atenuação Natural Monitorada é considerada uma estratégia de remediação passiva, isto é, sem a intervenção do homem (CORSEUIL; ALVAREZ, 1996). Esta tecnologia está baseada na atenuação natural (redução de massa, concentração e mobilidade dos contaminantes na água subterrânea ao longo do tempo e distância do local de derramamento) devido a processos físico-químicos e biológicos naturais (SANTOS; UNGARI; SANTOS, 2008).

Extração Multifásica: Esta técnica consiste na instalação de poços de extração no local contaminado, seguido pela aplicação de vácuo nos mesmos. O gradiente de pressão gerado permite a remoção simultânea de vapores orgânicos, fase livre e água subterrânea (CORREA, 2017). O material removido é encaminhado para um tanque onde ocorre a separação da fase líquida e gasosa. Os gases passam por filtros de carvão ativado e são liberados na atmosfera. Já a fase líquida é encaminhada para uma caixa separadora, gerando um efluente oleoso e outro aquoso. O material oleoso é reservado para destinação adequada e a fase aquosa é encaminhada para tratamento convencional de efluentes líquidos (HANSEN, 2013).

Oxidação Química: O fundamento da técnica de remediação por oxidação química envolve promover uma degradação do contaminante em fase dissolvida e/ou fase livre por meio de uma reação química de oxirredução através da injeção de um agente oxidante através de poços. O resultado esperado desta reação é a obtenção de subprodutos menos agressivos ao meio ambiente (USEPA, 2012).

3.1.4. ÁREAS REABILITADA PARA USO DECLARADOS (AR)

A Instrução Normativa Nº 74 do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA, 2018) sobre Recuperação de Áreas Contaminadas define Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR) como:

“Área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria anteriormente contaminada que, depois de submetida às medidas de intervenção, ainda que não tenha sido totalmente eliminada a massa de contaminação, tem restabelecido o nível de risco aceitável à saúde humana, ao meio ambiente e a outros bens a proteger” (IMA, 2018).

Conforme previsto no Artigo 36º da CONAMA (2009):

“Após período de monitoramento, definido pelo órgão ambiental competente, que confirme a eliminação do perigo ou a redução dos riscos a níveis toleráveis, a área será declarada pelo órgão ambiental competente como reabilitada para o uso declarado – AR” (CONAMA, 2009).

Assim, o Termo de Reabilitação para Uso Declarado é emitido pelo órgão ambiental competente e, conforme expresso no Decreto 59.263/13 (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013), Artigo 54º (III, § 1º):

“As informações referentes à Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR) a serem averbadas, devem indicar expressamente o uso para o qual ela foi reabilitada, que não poderá ser distinto dos usos autorizados pela legislação de uso e ocupação do solo, além da localização e tempo de vigência das medidas de controle institucional e de engenharia implantadas” (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

3.1.5. ESTUDOS DE CASO

O gerenciamento e a remediação de áreas contaminadas são processos complexos que devem seguir uma série de etapas, sendo necessário manter o contato com o órgão ambiental responsável, bem como com as comunidades afetadas. Deste modo, foram apresentados 2 casos, a seguir, que obtiveram êxito no seu processo de remediação no Brasil.

O primeiro caso é referente a uma indústria de agroquímicos que, na década de 70, enterrou resíduos industriais em seu próprio terreno. Os resíduos foram dispostos sem autorização e não houve preparação do solo. A área, de grande extensão, se localizava em uma zona industrial no Rio Grande do Sul, porém próximo a residências e estabelecimentos comerciais, proporcionando riscos para a comunidade do entorno, conforme exposto por NEWFIELDS ([s.d.]).

Anteriormente à remediação, foi feita a delimitação precisa da área com presença de resíduos perigosos através de sondagem e métodos geofísicos. Em seguida, foi elaborado o Plano de Intervenção para Remoção do Solo Impactado, o qual foi aprovado pela FEPAM ao emitir uma Licença de Operação (NEWFIELDS, [s.d.]).

Para a operacionalização da remediação (NEWFIELDS, [s.d.]), foram demarcadas zonas de segurança. Com a estrutura preparada para o correto acondicionamento dos resíduos gerados, foi feita a remoção dos materiais enterrados. Utilizaram-se técnicas de escavação e remoção dos resíduos com cuidado especial visando a segregação e caracterização analítica para destinação final. Durante este período, o gerenciamento das águas pluviais foi essencial, pois as águas que eventualmente tivessem contato com os resíduos seriam consideradas como potencialmente contaminadas.

Segundo a NEWFIELDS BRASIL ([s.d.]), ao final do processo, foi feita a recuperação da área escavada com solo limpo de jazida licenciada e a revegetação do local. Por fim, foram realizados a avaliação de risco à saúde humana e o monitoramento de longo prazo da água subterrânea, inicialmente com frequência trimestral e, posteriormente, com frequência anual. Uma vez que se constatou a redução e estabilidade das concentrações das substâncias químicas de interesse e a inexistência de risco à saúde humana, o monitoramento foi encerrado. Assim, a

FEPAM emitiu o certificado de Área Reabilitada para Uso Declarado e a concessão do Termo de Encerramento do processo administrativo.

A delimitação precisa do passivo ambiental possibilitou a completa remoção de mais de 7 mil toneladas de resíduos de pesticidas e solo contaminado, prevenindo a ampliação da contaminação no solo e na água subterrânea. Tanto os resíduos quanto o solo contaminado foram encaminhados para a correta destinação (NEWFIELDS, [s.d.]).

O segundo estudo de caso ocorreu em um Posto Revendedor de Combustíveis localizado na cidade de Restinga Seca, região central do Estado do Rio Grande do Sul, o qual foi exposto no trabalho de ROSIN (2021). Com uma área útil de mais de 650 m², o estabelecimento está situado em uma zona urbana mista, sendo sua vizinhança composta por edificações residenciais, comerciais e industriais.

Conforme explicitado por ROSIN (2021), o sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis era composto por dois tanques subterrâneos de 30 mil L. Além do serviço de abastecimento de combustíveis, o local realizava troca de óleo de motor e contava com o serviço de lavagem de veículos leves, prestado por empresa terceirizada.

O empreendimento contava com todos os sistemas de prevenção à contaminação necessários, segundo as legislações vigentes. Entretanto, durante uma campanha rotineira de amostragem de água subterrânea em 2017, foi verificada a presença de uma película de fase livre (contaminante imiscível ou parcialmente miscível, que apresenta mobilidade no meio poroso) em um dos poços de monitoramento, conforme ROSIN (2021). Este fato demonstra a importância do monitoramento contínuo da qualidade do ambiente em locais onde estão instalados empreendimentos potencialmente poluidores (ROSIN, 2021).

De acordo com ROSIN (2021), na etapa de Investigação Ambiental Confirmatória em 2018, as análises laboratoriais das coletas de amostras dos poços de monitoramento verificaram a extrapolação do valor de referência para o parâmetro hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) em dois pontos de coleta.

Para a remediação, tendo em vista a presença de fase livre, o empreendedor optou por realizar a técnica de extração multifásica, que permite a remoção simultânea da fase dissolvida, fase livre e vapores no solo. Inicialmente, o material removido do subsolo é destinado a um tanque, onde ocorre a separação da fase líquida e gasosa. Os gases são direcionados através de filtros de carvão ativado e liberados na atmosfera. A fase líquida é encaminhada a uma caixa separadora, gerando um efluente oleoso e outro aquoso. O material oleoso é armazenado para posterior destinação e a parcela aquosa é filtrada e lançada na caixa separadora do próprio posto de combustíveis, para polimento final (ROSIN, 2021). Ainda, segundo ROSIN (2021), a técnica de oxidação química *in situ* foi aplicada no ponto de presença de fase livre, no mesmo mês em que se encerrou a extração multifásica, de forma complementar.

Para o controle da qualidade da água subterrânea, foram realizadas campanhas de coleta e análise laboratorial das substâncias químicas de interesse, a fim de compará-las com os valores de referência (ROSIN, 2021). Considerando os resultados analíticos consultados, é possível afirmar que a etapa de tratamento com aplicação de produtos oxidantes foi exitosa, visto que os valores encontrados ficaram abaixo dos valores de referência para todos os pontos de medição. Dessa maneira, em dezembro de 2019, a consultoria ambiental contratada pelo empreendedor enviou à FEPAM o relatório de encerramento do processo de remediação ativa no local,

solicitando a troca do status de “Área Contaminada sob Intervenção - ACI” para “Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação - AMR” (ROSIN, 2021).

Como apresentado por ROSIN (2021), em 2020, o órgão ambiental emitiu uma nova Licença de Operação (LO) para o empreendimento, oficializando a aprovação da mudança de status solicitada. Nesta LO, a FEPAM determinou que o empreendedor deveria apresentar, semestralmente, um relatório de monitoramento da qualidade da água subterrânea. A duração mínima dessa condicionante é de dois anos, desde que os resultados analíticos do monitoramento não voltem a indicar valores superiores aos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 e pela Lista Holandesa de Valores de Qualidade do Solo e Água Subterrânea.

Em nenhum dos dois casos avaliados foi explicitado o uso da área após a remediação, embora essa seja uma das etapas cruciais do gerenciamento de áreas contaminadas. Considerando a importância econômica, social e ambiental das áreas antropizadas e anteriormente contaminadas, é fundamental ressaltar a relevância de se analisar e definir usos sustentáveis para essas áreas reabilitadas.

3.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Nesta seção foram abordados os pontos principais necessários para o estudo de usinas solares fotovoltaicas, fundamentados em uma revisão bibliográfica. Esses assuntos são de extrema importância para projetos de energia solar.

3.2.1. PANORAMA MUNDIAL E BRASILEIRO

A Energia Solar Fotovoltaica (FV) é, por muitos países, vista como a tecnologia de energia renovável mais comercial e madura (TYAGI *et al.*, 2013).

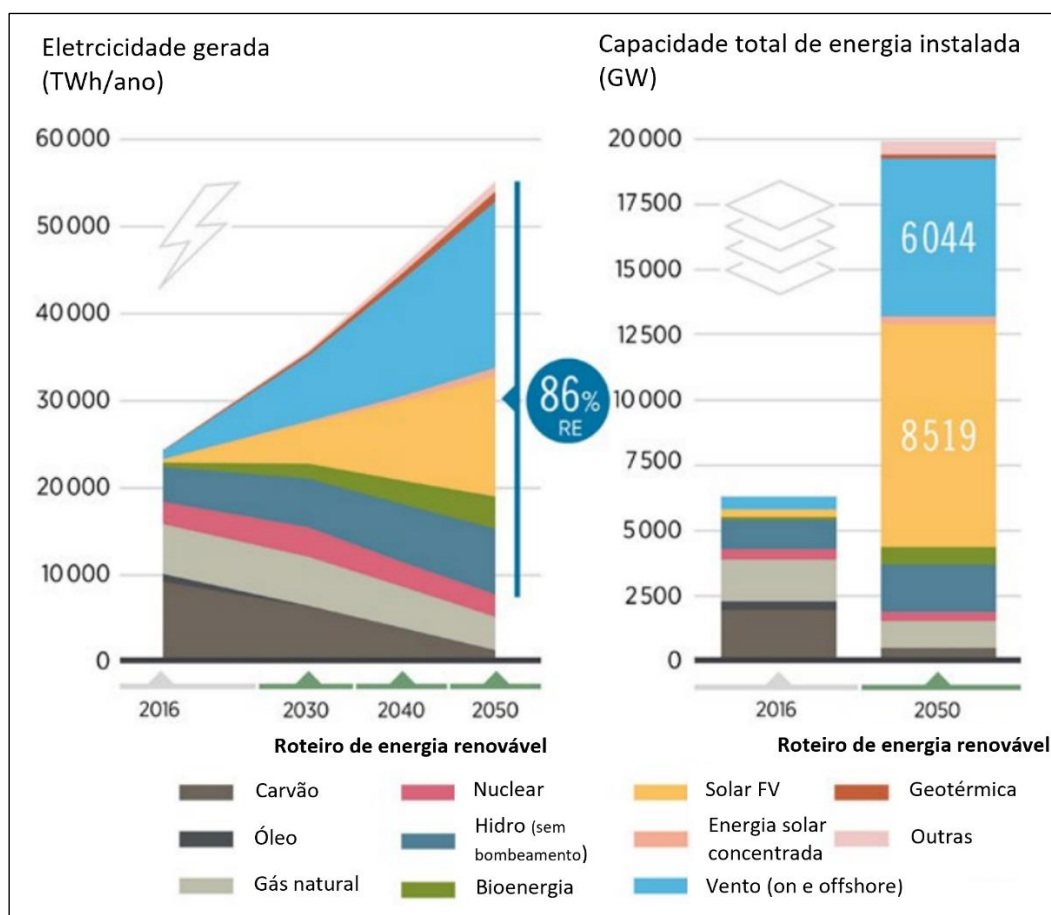
Enquanto recurso renovável, a energia solar tem capacidade para substituir, num futuro próximo, o recurso amplamente utilizado dos combustíveis fósseis. Embora a contribuição da energia solar para a produção global de eletricidade permaneça geralmente baixa, com 3,6%, estabeleceu-se firmemente entre outras tecnologias de energias renováveis, compreendendo quase 31% da capacidade total instalada de energias renováveis em 2022 (IRENA, 2023). Com uma capacidade instalada de 1.053 GW em 2022, a energia solar é a segunda tecnologia de energias renováveis mais instalada, atrás apenas da hidrelétrica, com 1.392 GW (IRENA, 2023).

A Figura 1 ilustra a contribuição das fontes de energia, tanto para a produção de eletricidade, como para a capacidade total de energia instalada até 2050. Em 2016, as energias renováveis contribuíram com cerca de 30% da capacidade instalada global, fornecendo quase um quarto da produção global de eletricidade (POURASL; BARENJI; KHOJASTEHNESHAD, 2023).

Como mostra a Figura 1, até 2050, prevê-se que a tecnologia solar fotovoltaica tenha a maior capacidade instalada (8.519 GW), o que a torna a segunda fonte de produção mais proeminente, atrás da energia eólica, e espera-se que produza aproximadamente 25% das necessidades totais de eletricidade até 2050 (POURASL; BARENJI; KHOJASTEHNESHAD, 2023).

De modo a promover uma transição energética a ritmo e escala necessários, IRENA (2019) estabelece uma via para atingir uma quota de 86% de energias renováveis na produção total de eletricidade até 2050 (Figura 1). No que diz respeito à utilização final, a porcentagem de eletricidade no consumo final de energia aumentaria dos atuais 20% para quase 50% em 2050 (IRENA, 2019).

Figura 1: Contribuições de fontes de energia na geração de eletricidade e na capacidade total instalada.



Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

Segundo a Agência Internacional de Energia (do inglês, *International Energy Agency* - IEA), a capacidade solar fotovoltaica, incluindo sistemas distribuídos de grande e pequena escala, foi responsável por dois terços do crescimento projetado para o ano de 2023, considerando a capacidade renovável global. Em resposta ao aumento dos preços da eletricidade causado pela crise energética e, visando melhorar a segurança energética, tem-se procurado ativamente alternativas aos combustíveis fósseis importados. Isso criou um ambiente favorável para a energia solar fotovoltaica, especialmente para sistemas residenciais e comerciais que podem ser rapidamente instalados para atender à crescente demanda por energia renovável. Essas aplicações fotovoltaicas distribuídas de microescala estão próximas de responder por metade da implantação geral de energia solar fotovoltaica de 2023.

De acordo com IRENA (2022), as adições de energia solar fotovoltaica tendem a seguir aumentando nos próximos anos. Por um lado, tem-se a maior adoção de sistemas fotovoltaicos distribuídos e um impulso político para sua implantação. Por outro lado, tem-se um declínio de custos. Entre 2018 e 2022, os países registaram reduções médias de 43% nos custos de concepção de projeto, 36% nos custos dos módulos e inversores, 28% nos custos de equilíbrio do sistema e 7% nos custos de instalação.

Conforme o ranking mundial de energia solar, ao final de 2023, o Brasil encerrou o ano com 37,4 GW de capacidade operacional solar e assumiu, de forma inédita, a sexta colocação no balanço internacional (Figura 2).

Figura 2: Ranking mundial da fonte solar fotovoltaica.

Colocação	País	Capacidade instalada acumulada (GW)
1	China	609,3
2	Estados Unidos	137,7
3	Japão	87,1
4	Alemanhã	81,7
5	Índia	72,7
6	Brasil	37,4
7	Austrália	33,6
8	Itália	29,8
9	Espanha	28,7
10	República da Coréia	27,0

Fonte: Adaptado de ABSOLAR (2023).

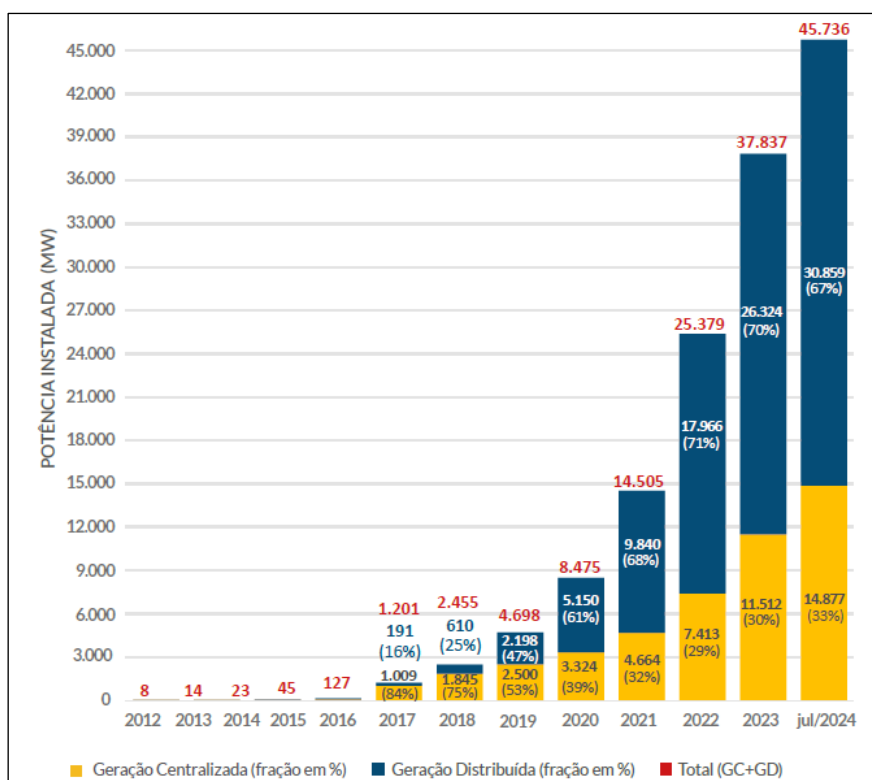
Quando se trata de potencial para geração de energia solar fotovoltaica, o Brasil se destaca, principalmente na região mais central do país (Figura 3). A cada ano, nota-se um significativo aumento na potência instalada de fonte solar fotovoltaica (Figura 4), segundo dados de agosto de 2024. Conforme exposto por LEHN (2023), o país possui um grande potencial para energia solar que ainda é pouco explorado quando comparado com países europeus, os quais possuem maior capacidade instalada e menor radiação solar.

Figura 3: Mapa do potencial de energia fotovoltaica do Brasil.



Fonte: GLOBAL SOLAR ATLAS (2019).

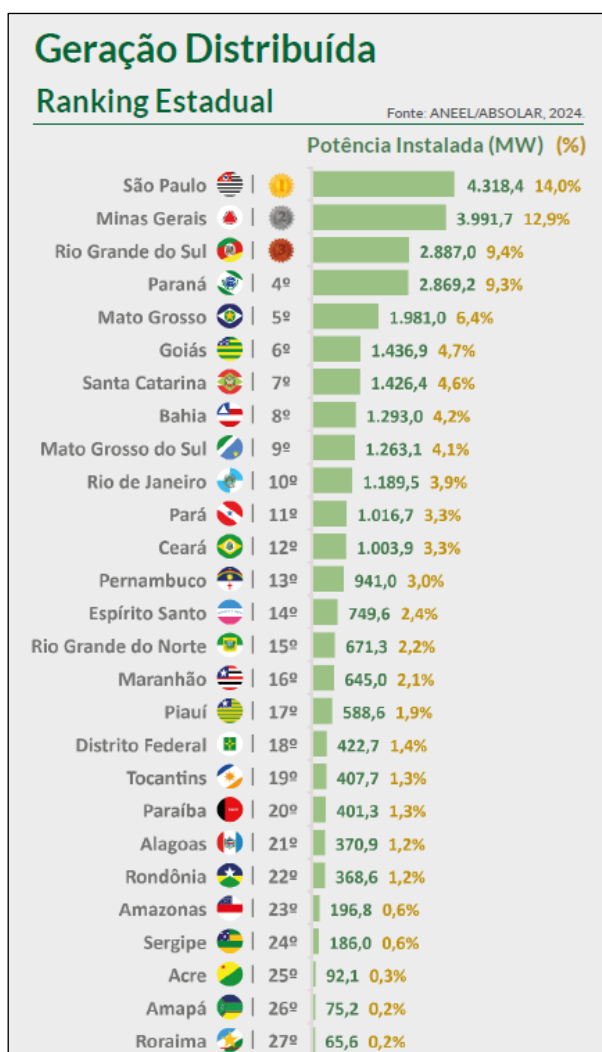
Figura 4: Panorama de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: ABSOLAR; ANEEL (2024).

Conforme apresentado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR; ANEEL, 2024) em agosto de 2024, a energia solar fotovoltaica representa 19,4% da matriz elétrica brasileira e, no *ranking* estadual de geração distribuída, São Paulo encontra-se em primeiro lugar com 14,0% da potência total instalada no país (Figura 5).

Figura 5: Ranking estadual da geração de energia solar fotovoltaica distribuída no Brasil.



Fonte: ABSOLAR; ANEEL (2024).

3.2.2. EFEITO FOTOVOLTAICO

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

As principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos são classificadas em três gerações. A primeira geração é dividida em duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado, por ser considerada uma tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível (CEPEL, 2014).

Conforme a CEPEL (2014), a segunda geração é denominada de filmes finos. Essa geração ainda enfrenta dificuldades relacionadas à disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células e, em alguns casos, toxicidade dos materiais, o que retarda sua utilização em maior escala.

Por fim, a terceira geração inclui células fotovoltaicas de multijunção, células fotovoltaicas de concentração, células sensibilizadas por corante e células orgânicas ou

poliméricas. Essas tecnologias estão, atualmente, em fase de pesquisa e desenvolvimento, de acordo com a CEPEL (2014).

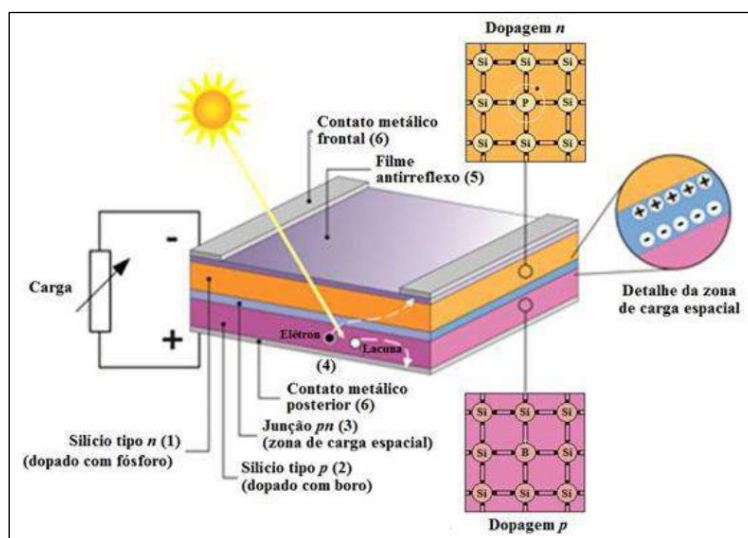
Parafraseando CARVALHO *et al.* (2014), o arranjo de células fotovoltaicas conectadas em série é chamado de módulo fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos fabricados em silício não são os mais eficientes, quando comparados a outros semicondutores. A eficiência de conversão tem aumentado com o avanço das novas tecnologias. Atualmente, uma célula solar comercial de silício monocristalino apresenta eficiência entre 18% e 20%, enquanto uma célula de silício policristalino alcança 15% a 17%. Embora o arsenieto de gálio seja considerado o melhor material para aplicações fotovoltaicas devido à sua alta eficiência, o silício continua sendo a opção mais viável economicamente, dado que o gálio é um elemento raro e de custo elevado.

Na essência, o efeito fotovoltaico corresponde à geração de uma diferença de potencial elétrico entre dois terminais de uma estrutura, usualmente uma junção p-n. Um dispositivo capaz de converter a luz diretamente em energia elétrica, através da produção de uma tensão e uma corrente elétrica sob iluminação, é denominado célula fotovoltaica (LIMA *et al.*, 2020).

A célula fotovoltaica é constituída por duas camadas de elementos semicondutores fotossensíveis, uma que apresenta carência de elétrons (P) e outra com excedente de elétrons (N), sendo a diferença de potencial nos terminais da junção P-N, o princípio da geração fotovoltaica (MELLO, 2017). A formação das camadas ocorre durante a adição dos elementos fósforo (elemento pentavalente) e boro (elemento trivalente), denominados dopante N e dopante P, respectivamente. A difusão dos elétrons do lado N para o P, que torna a camada N positiva e a camada P negativa, origina um campo elétrico, à medida que, ao incidir luz sobre a célula, surge uma corrente proporcional a irradiância (MELLO, 2017).

As faces inferior e superior da célula contam com terminais elétricos (estruturas metálicas), responsáveis por coletar a corrente elétrica proveniente da incidência da luz, ao passo que um filme antirreflexivo compõe a superfície atingida diretamente pela radiação solar (MELLO, 2017). A Figura 6 apresenta a estrutura, física e de dopagem, detalhada de uma célula fotovoltaica de silício.

Figura 6: Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício destacando: (1) região tipo n; (2) região tipo p, (3) zona de carga espacial, onde se formou a junção p-n e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexivo; (6) contatos metálicos.



Fonte: MOEHLECKE; ZANESCO (2005).

3.2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os Sistemas Fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Em ambos os casos, podem operar a partir apenas da fonte fotovoltaica ou combinados com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A utilização de cada uma dessas opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos. Cada um deles pode ser de complexidade variável, dependendo da aplicação em questão e das restrições específicas de cada projeto. Isto pode ser facilmente visualizado, por exemplo, quando se considera a utilização de um sistema híbrido diesel-fotovoltaico. Neste caso, a contribuição de cada fonte poderá variar de 0 a 100 %, dependendo de fatores como: investimento inicial, custo de manutenção, dificuldade de obtenção do combustível, poluição do ar e sonora do grupo gerador a diesel, área ocupada pelo sistema fotovoltaico, curva de carga etc. (CEPEL, 2014).

Sistemas isolados (SFI), puramente fotovoltaicos (SFV) ou híbridos (SFH), em geral, necessitam de algum tipo de armazenamento. O armazenamento pode ser em baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos em que não há geração fotovoltaica, ou em outras formas de armazenamento de energia. A bateria também funciona como uma referência de tensão c.c. para os inversores formadores da rede do sistema isolado (CEPEL, 2014).

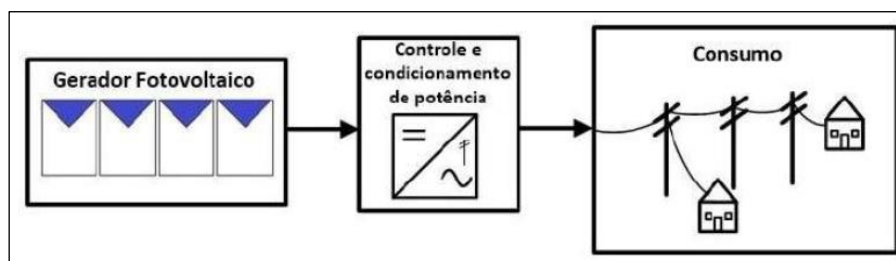
Portanto, uma usina fotovoltaica, ou parque solar, é essencialmente um grande sistema de geração de energia que utiliza a radiação solar como fonte principal. A energia solar é captada por meio de células fotovoltaicas, que convertem a luz do sol em eletricidade.

3.2.3.1. Sistema Conectado à Rede (*On Grid*)

Sistemas conectados à rede são aqueles em que a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica. Para tanto, é indispensável que se utilize um inversor que satisfaça às exigências de qualidade e segurança, para que não degrade a qualidade do sistema elétrico ao qual se interliga o gerador fotovoltaico (CEPEL, 2014).

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) dispensam o uso de acumuladores, pois a energia por eles produzida pode ser consumida diretamente pela carga, ou injetada diretamente na rede elétrica convencional, para ser consumida pelas unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição, de acordo com a CEPEL (2014). A Figura 7 apresenta um esquema de um SFCR.

Figura 7: Sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: CEPEL (2014).

Conforme a CEPEL (2014), a instalação de um SFCR deve seguir a norma específica da concessionária local de distribuição de energia elétrica. Alguns pontos importantes sobre os SFCR, ou sistemas *on grid* são:

- Não há necessidade de armazenamento de energia elétrica;
- Os sistemas operam obrigatoriamente em corrente alternada, na mesma frequência e tensão da rede local;
- Quando não há tensão na rede, o sistema fica inoperante mesmo com irradiação solar presente (proteção contra situação de ilhamento);
- Os inversores incorporam dispositivos seguidores de potência máxima (SPPM);
- A rede local deve ser capaz de receber a energia elétrica gerada;
- A qualidade da energia da rede pode comprometer a transferência de energia do sistema;
- O gerador FV pode ser integrado à estrutura de edificações, implicando a análise da resistência mecânica e carga máxima admissível, entre outros fatores;
- Em sistemas instalados em ambiente urbano é mais provável a existência de perdas por sombreamento, inclusive sombreamento parcial, e interferência de superfícies reflexivas próximas;

A normativa que rege a geração conectada à rede é a NBR 16274:2014 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.

Na NBR 16274:2014 se estabelece as informações e a documentação mínimas que devem ser compiladas após a instalação de um SFCR. Também descreve a documentação, os ensaios de comissionamento e os critérios de inspeção necessários para avaliar a segurança da instalação e a correta operação do sistema (CEPEL, 2014).

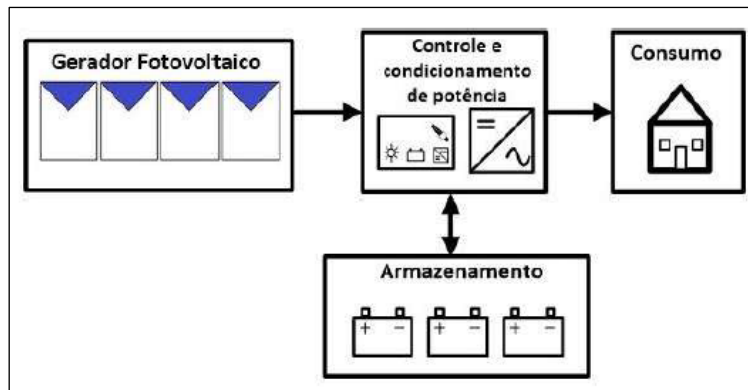
3.2.3.2. Sistema Autônomo ou Isolado (*Off Grid*)

Os sistemas isolados podem ser individuais ou em minirredes. No primeiro caso a geração é exclusiva para atendimento de uma única unidade consumidora, enquanto que, no caso da minirrede, a geração é partilhada entre um pequeno grupo de unidades consumidoras que estão geograficamente próximas umas das outras (CEPEL, 2014). Assim, o sistema funciona de forma independente, sem conexão com a rede elétrica.

Neste caso, pode-se aplicar esta tecnologia como sistemas isolados individuais. A eletrificação com Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares (SFD) consiste no atendimento, mediante energia solar, de domicílios individuais, permitindo aos moradores beneficiados ampliar seu leque de atividades, incluindo educação, lazer e produção, dentre outras. Os elementos fundamentais que caracterizam um SFD são a própria carga e o gerador fotovoltaico. Em geral, um sistema tão simples somente permitiria consumos proporcionais à radiação solar, isto é, durante as horas do dia e especialmente em dias ensolarados. Como regra geral, o sistema deve possuir um acumulador, que permita dissociar o horário de consumo do horário da geração (CEPEL, 2014).

Um esquema de um sistema isolado é apresentado na Figura 8.

Figura 8: Sistema autônomo ou isolado.



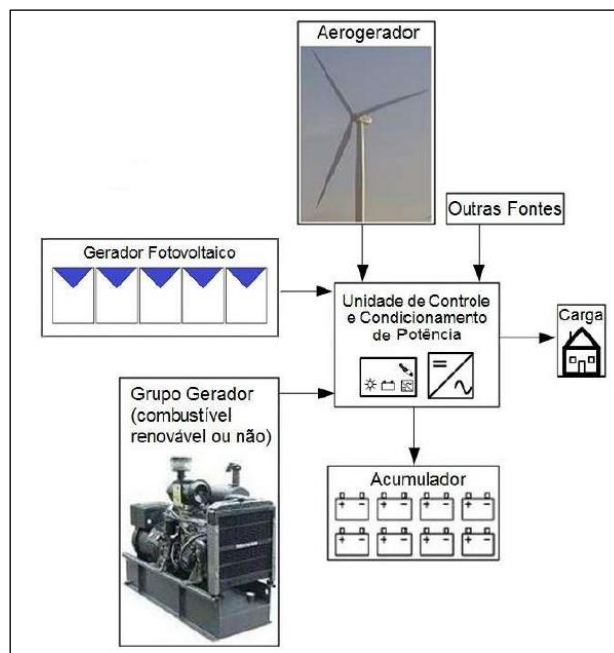
Fonte: CEPEL (2014).

3.2.3.3. Sistema Híbrido

Chamam-se sistemas híbridos àqueles em que existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, grupo gerador a diesel, aerogeradores e geradores fotovoltaicos. Estes sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário. Existem várias configurações possíveis, assim como estratégias de uso de cada fonte de energia (CEPEL, 2014). Um exemplo pode ser visualizado na Figura 9.

Em geral, utilizam-se sistemas híbridos para o atendimento a cargas em corrente alternada (c.a.) necessitando-se, portanto, de um inversor. Devido à maior complexidade e multiplicidade de opções e o constante aperfeiçoamento dessas unidades, a forma de otimização desses sistemas é ainda hoje tema de estudos. Além disso, há de se considerar que a utilização de sistemas híbridos traz uma complexidade operacional e de manutenção do sistema que é uma questão muito desvantajosa para empreendimentos em regiões remotas (CEPEL, 2014).

Figura 9: Sistema híbrido.



Fonte: CEPEL (2014).

3.2.4. GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia solar pode ser centralizada ou descentralizada. Todavia, independente da forma de geração, a energia solar já representa uma fonte de energia importante na matriz elétrica brasileira e se mostra em ascensão.

3.2.4.1. Geração Distribuída (GD)

A geração distribuída é caracterizada pela produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras, que utilizam fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica e conectadas à rede de distribuição (ANEEL, 2016).

Neste sentido, tem-se a microgeração e a minigeração distribuída, que são:

- Microgeração distribuída: Central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras (CONGRESSO NACIONAL, 2022).
- Minigeração distribuída: Central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras (CONGRESSO NACIONAL, 2022).

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, dentre os quais se destacam a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental; a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada e a diversificação da matriz energética (RODRIGUES, 2019).

A resolução 482/2012 da ANEEL foi o marco regulatório que permitiu aos consumidores realizar a troca da energia gerada com a da rede elétrica, estabelecendo as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). A resolução Normativa 687/2015 da ANEEL veio com o intuito de aprimorar o que foi estabelecido na resolução 482 de 2012, tornando possível ao consumidor instalar pequenas usinas geradoras, como as microturbinas eólicas, geradores de biomassa e de energia solar fotovoltaica (ANEEL, 2015). Atualmente, tem-se a Lei nº 14.300/2022 em vigência.

3.2.4.2. Geração Centralizada (GC)

Segundo a ABSOLAR (2024), a geração centralizada é empregada em grandes usinas com geração de energia superior a 5MW. A energia gerada pode ser comercializada através do Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR).

Em linhas gerais, no modelo de geração centralizada, poucas unidades geradoras produzem eletricidade para muitas pessoas. A energia é levada por cabos de transmissão

maiores, mais altos e com alta tensão, até as redes de distribuição, que são os cabos de energia no poste (ENGIE, 2022). As grandes usinas de geração solar fotovoltaica, uma forma de geração centralizada, não estão necessariamente restritas à zona rural. Elas são, na verdade, usinas fotovoltaicas de grande potência e produção, instaladas em locais que permitem um maior rendimento das placas fotovoltaicas. A usina solar é conectada à rede e gera uma alta quantidade de energia elétrica que pode ser aproveitada em diversos locais (ENGIE, 2022).

3.2.5. EQUIPAMENTOS

Uma usina solar fotovoltaica utiliza uma variedade de equipamentos para converter a radiação solar em eletricidade de forma eficiente e segura. Os equipamentos variam de acordo com o sistema empregado e com o tipo de geração. Na sequência, foram descritos os principais equipamentos empregados.

3.2.5.1. Módulo

O módulo fotovoltaico é a unidade básica do gerador fotovoltaico formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica (CEPEL, 2014).

Existem módulos rígidos e flexíveis, dependendo do tipo de célula fotovoltaica utilizada. Os módulos rígidos geralmente utilizam como base mecânica uma ou mais lâminas de vidro temperado, com baixo teor de ferro, para melhorar sua transmitância à radiação solar. Podem ainda ser emoldurados com perfis de alumínio, para facilitar sua instalação em um painel, ou sem moldura, para sua utilização como parte de uma construção ou como revestimento (CEPEL, 2014).

Atualmente, os módulos fotovoltaicos são produzidos em fábricas automatizadas com mínima interferência humana. A produção em série de módulos fotovoltaicos em grande quantidade tem permitido uma significativa redução nos preços e assegurado a manutenção de produtos de alta qualidade (CEPEL, 2014).

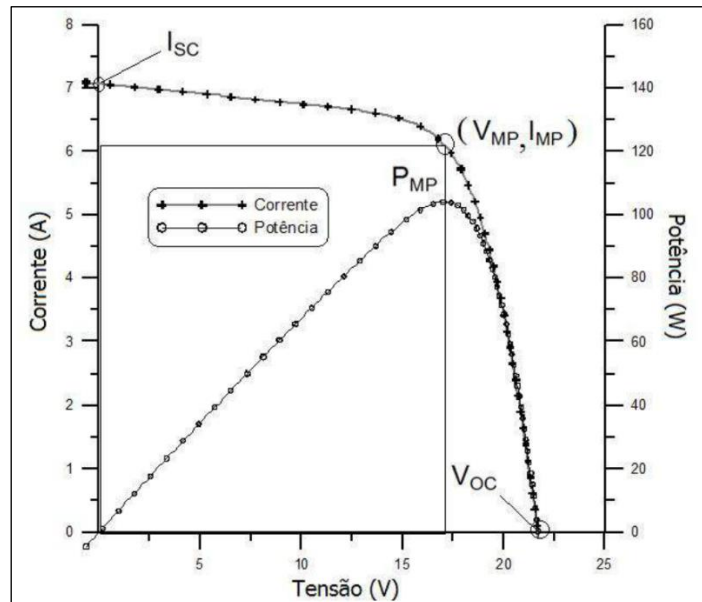
Um módulo é geralmente identificado pela sua potência elétrica de pico (W_p), mas um conjunto de características compatíveis com a aplicação específica deve ser observado. A definição da potência de pico de um módulo fotovoltaico é feita nas condições-padrão de ensaio (do inglês *Standard Test Conditions - STC*), considerando irradiância solar de 1.000 W/m^2 sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (CEPEL, 2014).

Conforme expresso pela CEPEL (2014), o critério de avaliação fundamental de um módulo fotovoltaico é sua curva corrente-tensão, denominada curva I-V. Através dela é possível obter parâmetros essenciais, como valores de potência de pico (P_{mp}), corrente elétrica de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e, diante de tais, o fator de forma (FF). O fator de forma (FF) do módulo é a grandeza que expressa quanto a sua curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama I-V. Quanto melhor a qualidade das células no módulo, mais próxima da forma retangular será sua curva IV.

Para cada ponto na curva I-V, o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. A Figura 10 mostra também, além da curva I-V, uma curva de potência em função da tensão, chamada de curva P-V, que identifica o ponto com o máximo valor de potência. A este ponto na curva de potência corresponde um ponto na curva de corrente, com valores de tensão e corrente específicos, que são denominadas, respectivamente, de tensão e corrente de máxima potência (V_{mp} , I_{mp}). Este ponto é conhecido como o ponto de

máxima potência PMP (CEPEL, 2014). Os valores P_{mp} , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{sc} são os cinco parâmetros que especificam o módulo sob dadas condições de radiação, temperatura de operação de célula e massa de ar (CEPEL, 2014).

Figura 10: Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100 Wp.



Fonte: CEPEL (2014).

3.2.5.2. Inversor

Um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (c.a.) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (c.c.). A energia c.c. pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. A tensão c.a. de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede (CEPEL, 2014).

No caso de sistemas fotovoltaicos, os inversores podem ser divididos em duas categorias com relação ao tipo de aplicação: SFIs e SFCRs. Embora os inversores para SFCRs compartilhem os mesmos princípios gerais de funcionamento que os inversores para SFIs, eles possuem características específicas para atender às exigências das concessionárias de distribuição em termos de segurança e qualidade da energia injetada na rede (CEPEL, 2014).

3.2.5.3. Bateria

Em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica, o uso de dispositivos de armazenamento de energia faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente (à noite ou em dias chuvosos ou nublados, com baixos níveis de irradiância solar). Assim, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser usada em outros momentos para atender a demanda (CEPEL, 2014). Também é possível utilizar baterias em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, visando operação em situações de ilhamento ou em caso de falta da energia da rede elétrica.

Existem dois tipos básicos de células: primárias e secundárias. As células primárias compõem as baterias que podem ser utilizadas apenas uma vez (não recarregáveis). Quando as células primárias se descarregam completamente, sua vida útil se encerra e elas devem ser descartadas (CEPEL, 2014). Por outro lado, as células secundárias compõem as baterias recarregáveis, ou seja, aquelas que podem ser carregadas com o auxílio de uma fonte de tensão ou corrente, e reutilizadas várias vezes. São comumente chamadas de “acumuladores” ou “baterias de armazenamento” e são úteis na maioria das aplicações por longos períodos, como por exemplo, em sistemas fotovoltaicos (CEPEL, 2014). Dos vários tipos de acumuladores eletroquímicos existentes, a bateria de chumbo-ácido (Pbácido) é a tecnologia mais empregada. Baterias com tecnologias mais modernas ainda não são economicamente viáveis na maioria dos sistemas fotovoltaicos.

3.2.5.4. Controlador de Carga

O controlador de carga é um dispositivo responsável por regular e gerenciar o fluxo energético dos geradores fotovoltaicos para as baterias, bem como protegê-las de uma descarga profunda decorrente de um longo período sem geração (CEPEL, 2014).

O controlador de carga é considerado indispensável na grande maioria dos casos, e sua utilização permite uma otimização do dimensionamento do banco de baterias e do seu carregamento, desconexão de cargas em baixo estado de carga da bateria e um maior nível de proteção contra um aumento excessivo de consumo ou uma possível intervenção do usuário (CEPEL, 2014).

Os controladores podem diferir basicamente quanto à grandeza utilizada para o controle, forma de desconexão do painel fotovoltaico e estratégia de controle adotada. As grandezas de controle mais utilizadas são: estado de carga (integração do fluxo de corrente na bateria), tensão e densidade do eletrólito da bateria (CEPEL, 2014).

Existem os controladores de carga em série e em paralelo e os controladores do tipo Ponto Rastreador de Potência Máxima (MPPT) e *Pulse Width Modulation* (PWM).

Os controladores em série não emitem calor, podendo ser instalados em ambientes fechados, atendendo a diferentes aplicações, principalmente, os equipamentos maiores. Eles causam interrupção na corrente que alcança a bateria, a depender da tensão (HCC ENERGIA SOLAR, 2023).

Segundo HCC ENERGIA SOLAR (2024), o controlador em paralelo provoca aquecimento tendo, por sua vez, a capacidade de trabalho mais limitada. São adequados para instalações de sistemas fotovoltaicos menores. Esse tipo de controlador de carga solar deriva a corrente dos módulos para uma carga de dissipação, o que permite ao acumulador se manter no nível máximo de carga.

O MPPT oferece a maior eficiência, já que aproveita a máxima potência que as placas fotovoltaicas oferecem. Dessa forma, pode até atingir um ganho relevante de 60%. O MPPT não se restringe à tensão que as placas solares enviam. Ele abaixa a tensão e otimiza a corrente (HCC ENERGIA SOLAR, 2023).

O PWM, por sua vez, é o equipamento que trabalha com Modelação por Largura de Pulso. Ele emite pulsos de tensão de alta frequência para assegurar que a bateria fique carregada no máximo. O controlador verifica a situação da carga e, desse modo, restringe a tensão que as placas fotovoltaicas produzem para enviar às baterias. Sua eficiência é menor que a do MPPT, já

que não faz uso do potencial máximo de energia gerado pelo sistema. O resultado é que pode haver perdas relevantes, mas a vantagem é que o controlador PWM custa menos que o MPPT (HCC ENERGIA SOLAR, 2023).

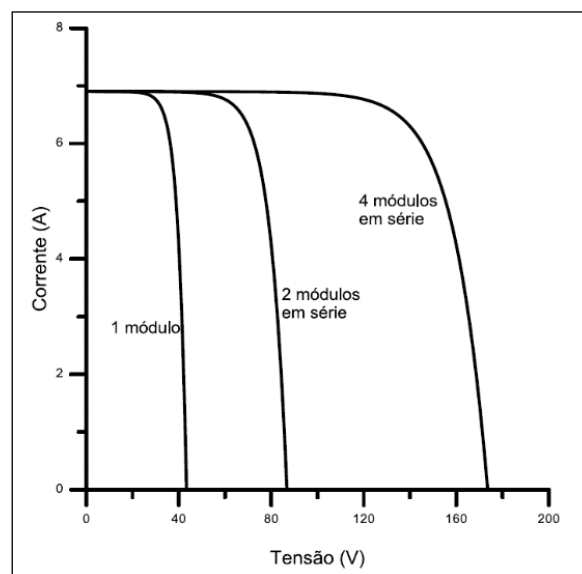
3.2.6. ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS

Os módulos fotovoltaicos podem ser conectados em série e/ou paralelo, dependendo da corrente e tensão desejadas, para formar painéis fotovoltaicos com potência mais elevada. Para determinar a melhor forma de associar os módulos, é essencial considerar as especificações da instalação e dos componentes utilizados. A compatibilidade entre as tensões e correntes dos componentes deve ser garantida para assegurar o funcionamento eficiente e seguro do sistema.

3.2.6.1. Conectados em Série

A conexão em série é feita do terminal positivo de um módulo ao terminal negativo de outro, e assim por diante. Deve-se utilizar cabos e conexões específicos para uso em sistemas fotovoltaicos, que são protegidos contra os efeitos da radiação e das intempéries (CEPEL, 2014). Quando a conexão das células fotovoltaicas é em série, as tensões são somadas e a corrente não é afetada, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Curvas I-V para um módulo de 220 Wp, 2 módulos idênticos associados em série e 4 módulos idênticos associados em série.

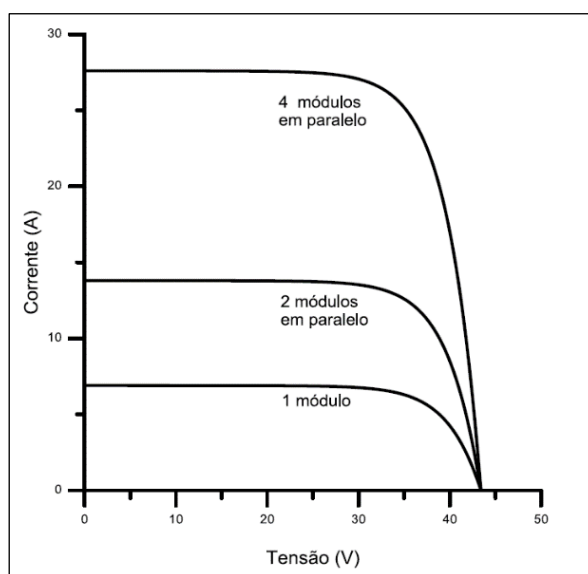


Fonte: CEPEL (2014).

3.2.6.2. Conectados em Paralelo

A conexão em paralelo é feita unindo-se os terminais positivos de todos os módulos entre si e procedendo-se da mesma forma com os terminais negativos. Esta conexão resulta na soma das correntes sem alteração da tensão (CEPEL, 2014), como mostra a Figura 12.

Figura 12: Curvas I-V para um módulo de 220 Wp, 2 módulos idênticos associados em paralelo e 4 módulos idênticos associados em paralelo.



Fonte: CEPEL (2014).

3.2.7. FATORES EXTERNOS INFLUENTES

As características elétricas de sistemas de energia solar fotovoltaica são significativamente influenciadas por parâmetros externos, como a inclinação/orientação dos painéis solares, intensidade da luz solar, a temperatura ambiente, entre outros. De acordo com a CEPEL (2014), esses parâmetros externos devem ser considerados em relação às Condições de Teste Padrão (STC), as quais são especificações padronizadas estabelecidas para avaliar o desempenho dos módulos fotovoltaicos de maneira consistente e comparável. A compreensão dos fatores influentes é essencial para estimar com precisão o desempenho e a produção de energia de um sistema fotovoltaico em diferentes condições ambientais.

3.2.7.1. Posição do Sol e Inclinação dos Painéis

A Terra tem como principais movimentos a rotação em torno de seu próprio eixo e a translação elíptica em torno do Sol, sendo ambos de altíssima importância no estudo de geração de energia solar. Via de regra, a primeira providência a ser tomada ao instalar um SFCR, é orientar a face dos painéis para o Norte geográfico, quando no hemisfério Sul, ou para o Sul, quando no hemisfério Norte (ANDRADE, 2015).

O ideal para um sistema de geração de energia solar produzir a maior quantidade de energia possível, é que a luz solar incidente nos módulos seja sempre perpendicular ao plano da superfície geradora. Uma forma de garantir tal orientação, mas que geralmente acaba por inviabilizar economicamente o projeto, é a utilização de suportes mecânicos conhecidos como rastreadores solares, que operam com o intuito de manter a radiação solar normal ao plano do painel (MELLO, 2017).

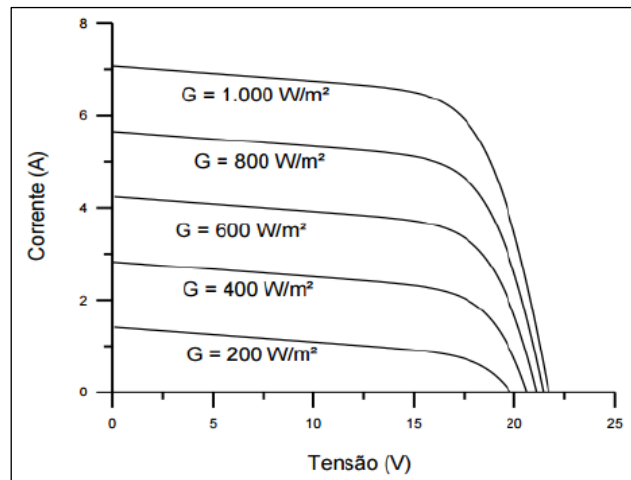
Em decorrência desse inconveniente financeiro, a maioria dos projetos apresenta uma inclinação fixa dos módulos que é definida levando-se em consideração os aspectos de maximização da produção energética, respeitando a variação dos fatores climáticos ao longo do ano, de modo a evitar a sazonalidade do sistema. Ou seja, ao invés de aderir a pequenas inclinações que oferecem ao sistema um maior rendimento no verão, ou até ângulos maiores

que são mais eficientes no inverno, opta-se por um valor médio a fim de ponderar a geração de energia (MELLO, 2017).

3.2.7.2. Irradiância Solar

A corrente elétrica de um dispositivo fotovoltaico cresce linearmente com o aumento da irradiância solar incidente. Os efeitos decorrentes da variação de irradiância sobre um módulo fotovoltaico constituído de silício cristalino estão ilustrados na Figura 13 (MELLO, 2017).

Figura 13: Efeitos causados pela variação da irradiância sobre a curva I-V de um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si), sob temperatura constante de 25° C.

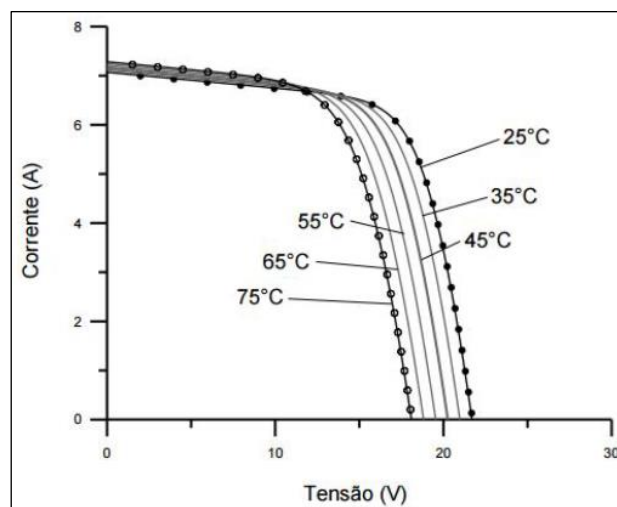


Fonte: CEPEL (2014).

3.2.7.3. Temperatura

A temperatura ambiente afeta diretamente a eficiência de dispositivos fotovoltaicos, visto que alterações na temperatura de operação de uma célula, ou painel solar, causam mudanças impactantes na curva I-V de ambos. Como pode ser observado na Figura 14, o aumento da temperatura gera uma queda significativa de tensão, enquanto a elevação do valor da corrente tende a ser desprezível (MELLO, 2017).

Figura 14: Efeitos causados pela variação da temperatura sobre a curva I-V de um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si), sob irradiância constante de 1000 W/m².



Fonte: CEPEL (2014).

Uma vez que as condições-padrão de ensaio não representam, na maioria dos casos, condições operacionais reais, as normas definem uma temperatura nominal para a operação das células nos módulos, na qual as características elétricas podem se aproximar mais das características efetivas verificadas em campo (CEPEL, 2014).

Cada módulo tem uma temperatura nominal para suas células e ela depende das propriedades térmicas e ópticas dos materiais empregados na construção do módulo. Esse dado pode ser encontrado nas folhas de dados técnicos dos módulos identificada pela sigla NOCT (do inglês, *Nominal Operating Cell Temperature*), estando geralmente entre 40°C e 50°C, segundo a CEPEL (2014).

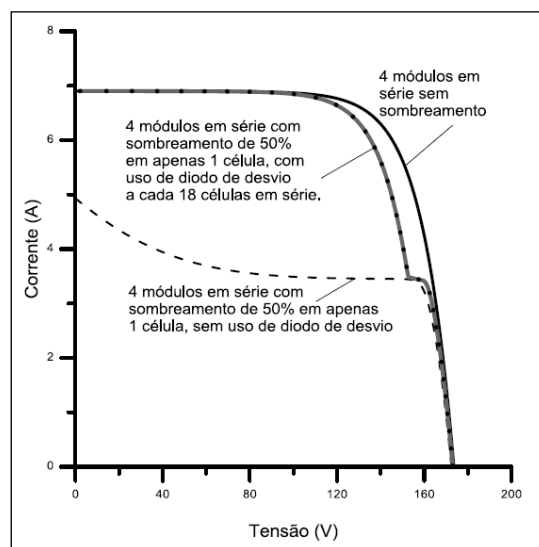
3.2.7.4. Efeito de Sombreamento

A redução de radiação incidente pode ocorrer por um sombreamento parcial do módulo, depósito de sujeira sobre o vidro, ou algo que tenha caído sobre o módulo, dentre outras possibilidades (CEPEL, 2014). Ainda, os módulos podem estar associados em série e, quando uma ou mais células do arranjo recebe(m) menos radiação solar do que as outras da mesma associação, sua corrente limita a corrente de todo o conjunto em série.

Além da perda de potência no gerador fotovoltaico, há o risco de danos ao módulo parcialmente sombreado, uma vez que a potência elétrica gerada que não está sendo entregue ao consumo é dissipada no módulo afetado, às vezes sobre apenas uma de suas células. Neste caso pode ocorrer o fenômeno conhecido como “ponto quente” (por vezes referenciado no Brasil pelo termo inglês “*hotspot*”), que produz intenso calor sobre a célula afetada, com ruptura do vidro e fusão de polímeros e metais (CEPEL, 2014).

A Figura 15 mostra o efeito do sombreamento sobre apenas uma das células de um dos 4 módulos conectados em série referidos na Figura 15. Ao cobrir a metade de uma das células, a corrente daquele módulo é reduzida pela metade. Como consequência, a corrente de todos os módulos no conjunto em série também é reduzida (CEPEL, 2014).

Figura 15: Curva I-V para 4 módulos conectados em série e sem sombreamento (linha contínua); curva I-V para os mesmos 4 módulos na situação de sombreamento de uma de suas células, que passa a receber 50 % da irradiância original (linha tracejada); curva I-V com o mesmo sombreamento, mas com a utilização de diodos de desvio (curvas com linha contínua e pontos).



Fonte: CEPEL (2014).

3.2.8. CARBONO NEUTRO

O carbono neutro refere-se a um estado em que as emissões de carbono são equilibradas por ações que removem, compensam ou evitam uma quantidade equivalente de carbono da atmosfera. De maneira complementar, o custo social do carbono é um indicador que busca avaliar os impactos sociais e ambientais das emissões de carbono na atmosfera.

Alcançar a neutralidade de carbono significa atingir emissões líquidas zero de carbono, o que implica em uma redução significativa dos custos sociais do carbono. Isso ocorre porque as emissões líquidas não contribuem mais para o aumento do aquecimento global e seus efeitos associados. Portanto, a busca pela neutralidade de carbono está diretamente ligada à mitigação dos custos sociais do carbono, promovendo maior sustentabilidade e resiliência às mudanças climáticas.

Como detalhado por ZOU *et al.* (2021), o carbono é essencial em todos os ecossistemas. Enquanto a fixação de carbono envolve a absorção de dióxido de carbono, a liberação de carbono está ligada às emissões de CO₂, de origem natural ou antrópica. Com a perturbação do ciclo de carbono resultante das ações humanas, a neutralidade de carbono busca reduzir essa concentração e restaurar o equilíbrio do ciclo de carbono na Terra.

O Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C (IPCC, 2018) apontou que a neutralidade de carbono significa que as emissões de dióxido de carbono anuais de uma organização devem ser balanceadas através de tecnologia de eliminação de dióxido de carbono, o que também é conhecido como emissões líquidas zero de CO₂.

A meta de neutralidade de carbono é reduzir as emissões globais de dióxido de carbono em cerca de 45% até 2030, em comparação com 2010, e alcançar emissões líquidas zero de CO₂ em 2050 (ZOU *et al.*, 2021).

A ideia de compensação das emissões de carbono para se alcançar um estado de neutralidade teve origem com o Protocolo de Kyoto em 1997 e seus compromissos foram estendidos no Acordo de Paris, assinado em 2015.

As estratégias para reduzir as emissões de carbono e alcançar a neutralidade de carbono podem ser distinguidas em quatro abordagens principais, segundo ZOU *et al.* (2021):

- Substituição de carbono: refere-se à substituição da eletricidade por fontes mais sustentáveis;
- Redução de carbono: inclui principalmente economia de energia e melhoria da eficiência;
- Sequestro de carbono: refere-se à coleta e/ou tratamento do dióxido de carbono gerado;
- Ciclo de carbono: inclui a conversão artificial de dióxido de carbono em produtos químicos úteis ou combustíveis.

A neutralidade de carbono acelerou a transformação da matriz energética para energias de baixo carbono e proporcionou um novo ponto de crescimento econômico (ZOU *et al.*, 2021). No contexto da energia solar fotovoltaica, como fonte de energia renovável, existe o esforço para atuar no âmbito da substituição de carbono, evitando a emissão de CO₂. Essa substituição de carbono pode ser quantificada através do custo social do carbono.

O custo social do carbono é um indicador chave da gravidade das alterações climáticas (TOL, 2023). O custo social do carbono (do inglês, *Social Cost of Carbon* - SCC) representa o custo

econômico associado aos danos (ou benefícios) climáticos que resultam da emissão de uma tonelada adicional de dióxido de carbono (tCO₂) (RICKE *et al.*, 2018). Dentro do contexto da energia solar, como fonte de energia renovável, o SCC representa a redução desse custo social, pois não emite gases de efeito estufa durante sua operação.

Segundo RICKE *et al.* (2018), O SCC global permite captar a externalidade das emissões de CO₂ viabilizando uma perspectiva de bem-estar global, enquanto a contribuição a nível nacional permite melhorar a compreensão dos impactos regionais, importantes para as medidas de adaptação e compensação ambiental.

3.3. GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO USO FUTURO DE ÁREAS ANTROPIZADAS

Esta seção buscou apresentar exemplos de como a geração de energia solar fotovoltaica pode ser integrada a áreas já antropizadas, proporcionando um bom aproveitamento de espaços.

3.3.1. ATERROS SOLARES

Os aterros sanitários são, hoje, a forma mais correta de disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU). Para sua construção é necessário desenvolver a impermeabilização dos solos, o tratamento do chorume e a captação do biogás gerado. Ao final da vida útil do aterro, ele deve ser encerrado e a área deve ser monitorada, sendo passível de ser reaproveitada para outro fim. Conforme destacado por (MACHADO, 2007), estes espaços apresentam um potencial energético alternativo.

Aterros de RSU e outras áreas utilizadas para deposição de resíduos, como aterros industriais, aterros de entulhos de construção civil ou locais de mineração, são candidatos a receberem instalações solares fotovoltaicas (USEPA; NREL, 2013), como o aterro sanitário de Hickory Ridge nos Estados Unidos (Figura 16).

Figura 16: Aterro sanitário de Hickory Ridge (EUA) com cobertura de geomembrana solar.



Fonte: USEPA; NREL (2013).

Nesse sentido, o trabalho de RODRIGUES (2019) propõe a instalação de usinas solares fotovoltaicas para geração de energia solar distribuída sobre o maciço do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), no município de Caucaia no Ceará. Para isso, foram utilizadas ferramentas computacionais ("*Decision Tree Tool*" e "*System Advisor Model-SAM*")

para a identificação dos locais propícios para a implantação. Foi mensurado o desempenho do sistema e foram avaliados os aspectos técnicos, como recurso solar, cobertura final e diferentes tecnologias fotovoltaicas, visando sua implantação.

O estudo possibilitou concluir que o aterro da ASMOC poderia receber a instalação de um sistema de energia solar fotovoltaica ao longo do período de recebimento de resíduos e, também, após o fim destas atividades. Portanto, tomando os devidos cuidados técnicos, com verificações quanto à estabilidade e declividade, aos sistemas de controle de lixiviados, gás de aterro e águas pluviais, espessura da cobertura final, e ocorrência de recalques, as instalações apresentadas deveriam ser cada vez mais implementadas em áreas de deposição de resíduos, no caso, aterros sanitários de RSU (RODRIGUES, 2019).

Segundo a estimativa realizada pelo estudo do “Potencial de Geração de Energia Solar Fotovoltaica em Lixões no Brasil” (FOLSTER, 2019), considerando um aproveitamento de 25% de toda a área de lixões e aterros controlados no Brasil, ter-se-ia uma potência instalada de 1,52 GW e uma geração de 2,12 TWh/ano, capaz de suprir 0,45% do consumo energético do país em relação ao ano 2017.

3.3.2. UFV EM ÁREA DEGRADADA POR PEDREIRA

As alterações ambientais causadas pela atividade das pedreiras são diversas e se manifestam em vários aspectos de suas áreas de influência, impactando o meio atmosférico, geomorfológico, os recursos hídricos, além da fauna e flora da região. O estudo de “Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Implantação de Usina Fotovoltaica como Uso Futuro para Recuperação de Área Degradada por Pedreira” (LEHN, 2023) apresenta a geração de energia solar como proposta de recuperação da área de mineração de basalto em Santo Ângelo (RS).

O engajamento na recuperação de uma porção significativa do terreno, combinado com a implementação da UFV em uma área menor, ilustra a busca por um equilíbrio entre a revitalização ambiental, a geração de energia limpa e retorno financeiro ao proprietário (LEHN, 2023).

Os resultados financeiros deste estudo contribuíram para a avaliação da viabilidade econômica da usina fotovoltaica. O *payback* do projeto de 6,67 anos é compensado pelo retorno ao longo dos 25 anos, enquanto o índice de lucratividade de 2,96 destaca que os retornos esperados superam significativamente o investimento inicial, evidenciando um retorno projetado de R\$ 2,96 a cada R\$ 1,00 investidos (LEHN, 2023).

A análise dos impactos ambientais demonstrou que a implementação da UFV implica em um balanço entre impactos positivos e negativos. A consideração do histórico da área atenua os impactos negativos da implementação da UFV, visto que muitos dos impactos decorrentes da implementação já existiam devido a atividade mineradora. Mesmo assim, é importante delimitar medidas compensatórias e mitigadoras para os impactos apresentados (LEHN, 2023).

Neste contexto, a implementação da UFV emerge como uma solução viável e alternativa para a geração de energia limpa em áreas degradadas, visto a carência de usos finais para áreas que sofreram algum tipo de degradação por atividades passadas (LEHN, 2023).

3.3.3. UFV FLUTUANTE EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS

Por várias décadas, a hidroeletricidade tem se destacado no cenário elétrico brasileiro e se consolidado como a principal fonte de geração do país, sendo responsável pela maior parte do atendimento ao mercado de energia nacional. No entanto, as crescentes restrições

ambientais que têm se manifestado desfavoravelmente às hidrelétricas, estão contribuindo para a redução de seu potencial de geração e, conseqüentemente, para um aumento da vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Uma alternativa que tem se mostrado bastante promissora para auxiliar e otimizar a produção de energia das usinas hidrelétricas é a aplicação de sistemas fotovoltaicos flutuantes instalados sobre a superfície de seus reservatórios. A ideia é formar um sistema híbrido de geração elétrica a partir das fontes hidráulica e solar, capazes de operar de forma combinada e compartilhando da mesma infraestrutura de transmissão (já disponível para a usina hidrelétrica), aumentando assim a eficiência de geração e trazendo uma maior segurança e confiabilidade para o sistema como um todo (RODRIGUES *et al.*, 2020).

A quantidade de energia gerada por uma usina hidrelétrica (UHE) depende diretamente da quantidade de água acumulada em seu reservatório. Dessa forma, suas turbinas hidráulicas possuem uma maior disponibilidade durante períodos úmidos e uma geração mais limitada durante períodos secos. Por outro lado, a geração fotovoltaica é favorecida em períodos secos devido à menor incidência de nuvens, o que proporciona intervalos mais prolongados de irradiância contínua. Essas características, por sua vez, contribuem para uma possível complementaridade entre essas fontes ao longo das diferentes estações do ano, onde a geração solar durante o dia permite a economia de água no reservatório da hidrelétrica, a qual passa a ser utilizada durante o período noturno e em horários de ponta ao final do dia e, com isso, garante o atendimento aos picos de demanda (RODRIGUES *et al.*, 2020).

No trabalho “Plataforma Fotovoltaica Flutuante de Sobradinho (Ba) - Desafios e Estratégias de Implantação” (RODRIGUES *et al.*, 2020), é avaliado a instalação da uma plataforma fotovoltaica flutuante no lago das hidrelétricas de Sobradinho (BA). Após análise do local de instalação dos painéis, foi simulado a geração de energia no *software* PVSyst. Foi definido um total de 3.792 módulos (24 módulos em série e 158 módulos em *strings*) e, levando em consideração os demais parâmetros definidos no projeto, a simulação calculou uma produção anual de 1.654 MWh para a planta de 1 MW.

Dentre as vantagens elencadas na técnica das placas flutuantes, segundo GALDINO; OLIVIERI (2016), destacam-se:

- O resfriamento evaporativo, provocado nos painéis fotovoltaicos e cabos pela presença do corpo d'água, aumenta a eficiência do sistema;
- O painel flutuante reduz a evaporação da superfície livre da água, preservando o volume de água armazenada;
- O painel flutuante reduz o crescimento de algas;
- O painel flutuante reduz a formação de ondas e, assim, a erosão das margens do reservatório;
- Um sistema FV flutuante permite economizar água naquele reservatório, substituindo parte de sua geração;
- Um sistema FV flutuante não necessita de investimentos em transmissão pois a infraestrutura existente pode ser compartilhada;
- O fato de o sistema flutuante não ocupar espaço de terra é uma grande vantagem econômica;
- A refletividade (albedo) da água aumenta a incidência de radiação no painel fotovoltaico e, portanto, sua produtividade.

Em contrapartida, ressaltam-se as considerações expressas por GALDINO; OLIVIERI (2016) sobre esses sistemas:

- Resistência a fatores ambientais, pois o sistema deve ser projetado em consideração as variações do nível do reservatório e outras adversidades;
- Custos de instalação e manutenção tendem a ser superiores aos de sistemas convencionais;
- Impactos ambientais, pois é preciso garantir as trocas gasosas entre a água e a atmosfera.

Em agosto de 2019, a usina solar flutuante em Sobradinho foi inaugurada, com uma área total de 11 mil m² (Figura 17). De acordo com a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf), a plataforma solar flutuante tem uma potência de geração de 1 MWp (Mega Watt pico), e até 2020 deverá ter, ao todo, 2,5 MWP. O valor do investimento nas duas plantas solares da plataforma totaliza R\$ 56 milhões (G1, 2019).

Figura 17: Usina solar flutuante instalada no Reservatório de Sobradinho, na Bahia.



Fonte: Felipe Pereira/TV São Francisco (G1, 2019).

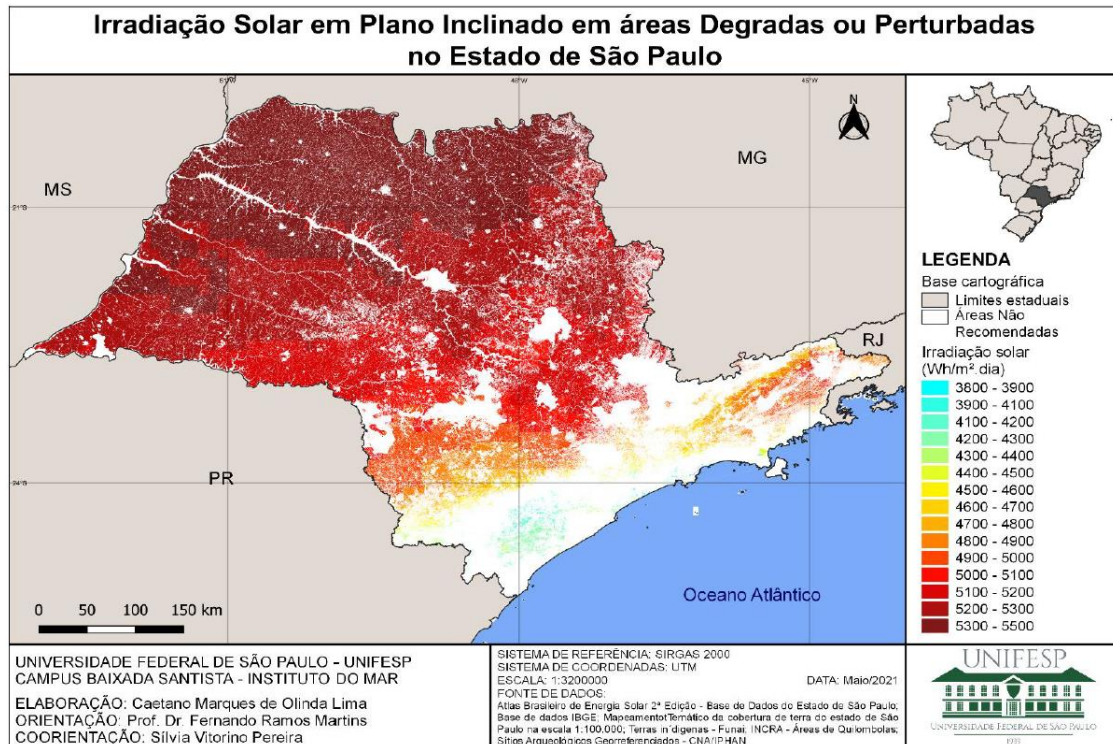
4. RELEVÂNCIA DO ESTUDO

LIMA (2021) destaca que a energia solar fotovoltaica possui um potencial significativo de crescimento na geração de energia elétrica no estado de São Paulo, comparando sua capacidade atual instalada de 382,426 MW e a projeção de potencial de geração de 12.10⁶ MW. Esta fonte se apresenta como uma opção viável para diversificar a matriz elétrica estadual, mediante a expansão do número de usinas solares fotovoltaicas. Além disso, possibilita a geração de energia renovável sem emissão de gases de efeito estufa durante a operação.

Conforme expresso por LIMA (2021), a implantação de novos parques solares pode provocar impactos ambientais nos locais de instalação, tais como erosão e contaminação do solo, geração de resíduos, comprometimento da paisagem, perda de cobertura vegetal e habitat natural, além da diminuição da biodiversidade. Como estas são características comuns de áreas já ambientalmente degradadas ou perturbadas por atividades antrópicas, é possível deduzir que tais áreas, que já apresentam um grau elevado de alteração no ambiente, podem ser utilizadas para a instalação de novas UFV, evitando danos a novas áreas ainda não impactadas.

As áreas descontaminadas, recuperadas ou remediadas devem ser utilizadas de forma sustentável para aproveitar plenamente essas regiões. Neste contexto, o estudo de LIMA (2021) teve como objetivo identificar regiões no estado de São Paulo que combinam altos índices de irradiação solar com evidências de degradação ambiental. O resultado foi a criação de mapas temáticos que destacam essas localidades junto com seus respectivos níveis de irradiação, elaborados no software QGIS. A Figura 18 mostra um dos mapas gerados, sendo possível concluir que esses dados têm a capacidade de orientar a localização de novos empreendimentos fotovoltaicos em áreas já impactadas pela atividade humana.

Figura 18: Irradiação solar em plano inclinado em áreas degradadas ou perturbadas no estado de São Paulo.



Fonte: LIMA (2021).

A remediação de áreas contaminadas é um processo essencial para a extração e/ou redução de contaminantes, proporcionando maior proteção à saúde humana, preservação do meio ambiente, além de garantir o cumprimento de exigências legais. Para as empresas, a remediação é uma maneira de mitigar os impactos adversos de suas atividades, assegurando a saúde e segurança dos trabalhadores e da comunidade ao entorno. Adicionalmente, essa prática reforça a imagem corporativa da empresa, construindo relações positivas com os *stakeholders* e fortalecendo sua posição como um agente consciente e responsável.

Ao investir na remediação de áreas contaminadas, as empresas podem fazer uso desses ambientes recuperados para novos projetos e operações, como por exemplo a geração de energia solar fotovoltaica renovável. Além disso, a remediação pode proporcionar benefícios fiscais e incentivos governamentais para o empreendedor, abrindo portas para oportunidades de crescimento e inovação.

Com esta perspectiva, o presente trabalho visa contribuir com uma metodologia de estudo de caso. Ao demonstrar a eficácia e viabilidade dessa abordagem, o estudo fornece um

modelo replicável para a utilização de antigas áreas contaminadas, evidenciando os benefícios imediatos e oferecendo uma estrutura que pode ser adotado em outros caso por outras empresas, promovendo desenvolvimento econômico sustentável e responsável.

5. ÁREA DE ESTUDO

De modo a alcançar o objetivo do atual estudo, foi escolhida uma área remediada em Paulínia, São Paulo. Atualmente, a área é classificada como Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME), segundo o SEMIL (2024), e aguarda a aprovação do órgão ambiental para lançamento do Termo de Reabilitação para Uso Declarado.

A área funcionava como uma antiga indústria da empresa Shell para produção de pesticidas e, hoje, encontra-se desativada e demolida. Entretanto, a sudeste da área de estudo, a empresa Cariflex Indústria e Comércio de Produtos Petroquímicos está operante e atua no ramo de comércio atacadista de resinas e elastômeros.

5.1. HISTÓRICO DA CONTAMINAÇÃO

As informações existentes da área de estudo se iniciam antes de 1975, quando a região era utilizada como fazenda de algodão e cana de açúcar. Foi em 1975 que a Shell Brasil, através de sua subsidiária Centro Industrial Shell Paulínia (CISP), iniciou a instalação de uma unidade para produção de defensivos agrícolas. Em 1977, finalizou-se a construção das primeiras unidades, dentre elas a unidade Opala, empregada para formulação de organofosforados. Assim, a fábrica entrou em operação. A Figura 19 mostra a *Site* do CISP com destaque para as zonas de interesse.

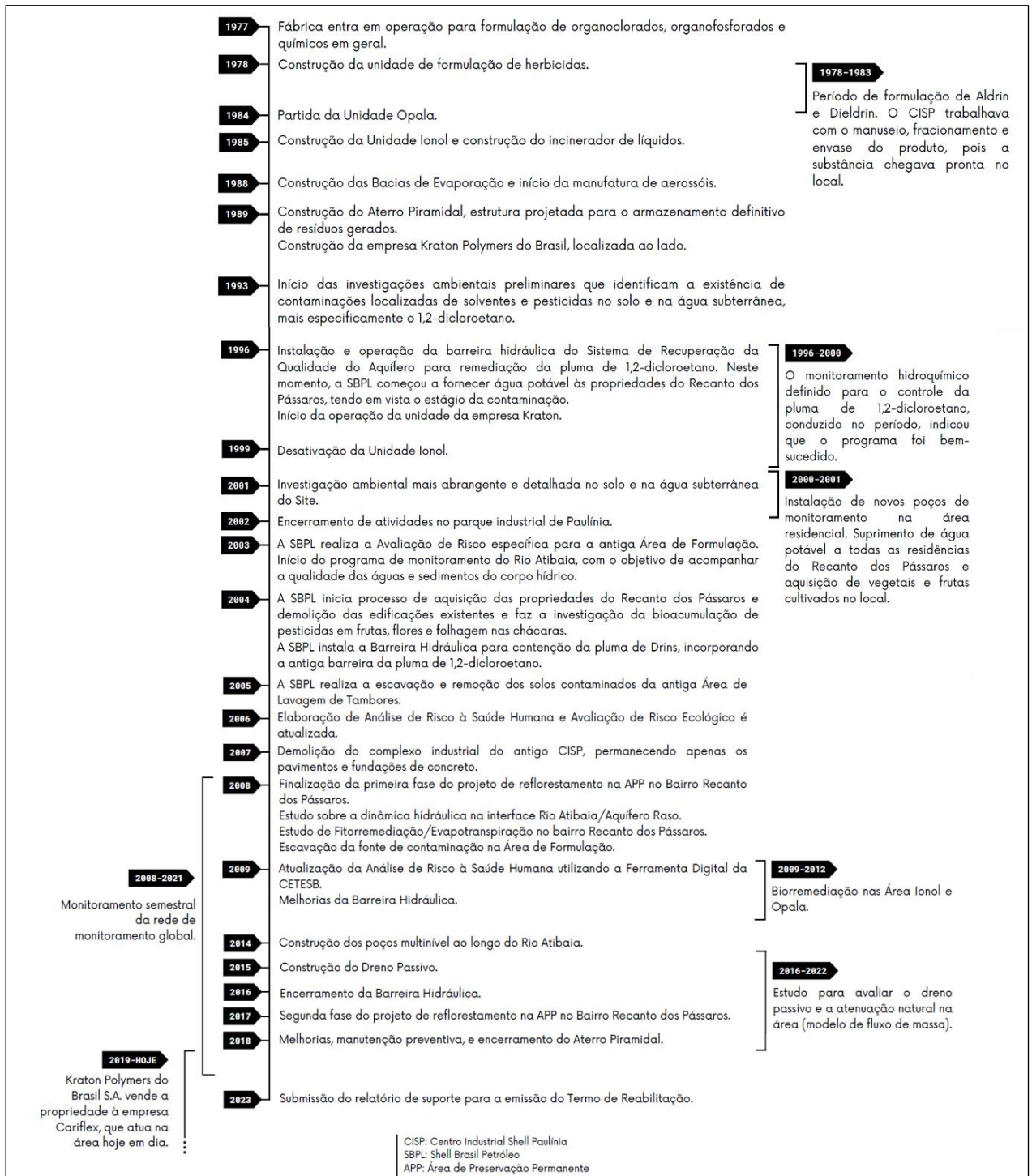
Figura 19: Mapa do Site com suas zonas de interesse.



Fonte: Autora (2024).

Cronologicamente, conforme informações do Relatório Complementar - *Site Shell Paulínia* (NEWFIELDS, 2023), a contaminação da área pode ser explicada de acordo com o Fluxograma 1.

Fluxograma 1: Histórico da contaminação.



Fonte: Autora (2024).

Complementarmente, os compostos encontrados na contaminação apresentam malefícios ao meio ambiente e à saúde humana. Segundo a Ficha de Informação Toxicológica (FIT) da CETESB (2022a), Aldrin e Dieldrin são compostos organoclorados sintéticos, sólidos à

temperatura ambiente, praticamente insolúveis em água. Essas substâncias foram muito utilizadas como inseticida entre as décadas de 50 e 70, mas seu uso foi banido devido às altas persistência no ambiente e capacidade de bioacumulação. Esses agrotóxicos fazem parte da lista de poluentes orgânicos persistentes (POPs) da Convenção de Estocolmo, um tratado internacional para garantir a eliminação segura desses poluentes e limitar sua produção e uso, do qual o Brasil é signatário.

O Aldrin e o Dieldrin ainda podem ser encontrados no ambiente devido à alta persistência, mesmo que não estejam mais sendo utilizados. O Aldrin é convertido em Dieldrin sob ação da luz solar e de bactérias. Desse modo, o Dieldrin é predominante no ambiente, mesmo quando a substância utilizada foi o Aldrin (CETESB, 2022a). No solo, o Aldrin pode evaporar lentamente ou sofrer oxidação, originando o Dieldrin. Em países de clima tropical, os compostos desaparecem do solo rapidamente, pois 90% do Aldrin e Dieldrin sofrem evaporação. Na água, a degradação destes compostos é lenta e eles tendem a se acumular no sedimento. Tanto o Aldrin quanto seu principal produto de degradação são altamente lipossolúveis, o que, juntamente com a alta persistência, faz com que possuam uma grande capacidade de bioacumulação e biomagnificação (CETESB, 2022a).

Conforme exposto pela CETESB (2022a), o Aldrin e o Dieldrin são tóxicos para o homem. Atualmente as exposições ambientais podem ocorrer por contato com o ar, água, alimentos e solo contaminados, e a via de exposição mais comum é por alimentos, sejam de origem vegetal ou animal. Os sintomas da intoxicação aguda são: cefaleia, tontura, náusea, vômito, tremor muscular, mioclonia e convulsões. As intoxicações crônicas geralmente ocorrem por exposição simultânea ao Aldrin, Dieldrin e Endrin e foram associadas ao aumento de câncer hepático e biliar, embora o estudo tenha apresentado como limitação a ausência de informações sobre os níveis de exposição.

Ainda, de acordo com CETESB (2022a), a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) classifica o Dieldrin e o Aldrin metabolizado a Dieldrin como prováveis cancerígenos para o ser humano (Grupo 2A) com base em evidência limitada em humanos e evidência suficiente em animais experimentais para carcinoma hepatocelular.

Conforme a FIT do 1,2-dicloroetano (CETESB, 2022b), essa substância pode infiltrar-se no solo e atingir a água subterrânea em locais próximos a despejo de resíduos industriais, persistindo por longo período em que a volatilização é restrita. A principal fonte de exposição ao 1,2-dicloroetano para a população geral é a inalação do ar de ambientes externos e internos contaminados, com menor contribuição por ingestão de água potável. A inalação aguda de altas concentrações afeta primeiramente o sistema nervoso central devido às propriedades anestésicas do composto. Os sintomas e sinais da exposição são: náusea, vômito, cefaleia, fraqueza, tontura e dor abdominal, podendo afetar o fígado e os rins. Trabalhadores que inalaram o composto por longo período apresentaram náusea, vômito, fraqueza, nervosismo, dor abdominal, diarreia e alteração no batimento cardíaco.

A Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) classifica o 1,2-dicloroetano (1,2-DCA) também como possível cancerígeno humano (Grupo 2B), com base na formação de câncer em animais de experimentação (CETESB, 2022b).

5.2. REMEDIAÇÃO DA ÁREA CONTAMINADA

Desde 1993 a área tem sido investigada, o que possibilitou o desenvolvimento e aplicação do projeto de remediação, seguindo as normativas vigentes pela Companhia

Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). As medidas adotadas incluíram a remoção de fontes de contaminação de pesticidas no solo e remoção de massa de voláteis e semivoláteis dissolvida na água subterrânea. Atualmente, a remediação já foi finalizada e a área está em fase de monitoramento, não restando nenhuma outra ação de remediação de contaminação a ser realizada (NEWFIELDS, 2023). Levando em consideração os diferentes casos, todas as regiões que se encontravam contaminadas foram remediadas de maneira eficaz.

5.2.1. ÁREA DO INCINERADOR

A área do antigo incinerador, parte da unidade industrial, tinha também como objetivo o armazenamento temporário de tambores com produtos. Nos serviços de investigação realizados em 2001, foram detectadas altas concentrações de substâncias de interesse no local. Segundo NEWFIELDS (2007), foi realizada a escavação efetiva de uma superfície de 740 m² e a destinação de 961 toneladas de solos contaminados. Os solos escavados foram incinerados ou destinados para um Aterro Industrial Classe I e a cava foi preenchida com solo limpo.

De acordo com NEWFIELDS (2023), a escavação foi concluída em 2006 com profundidades que variavam de 0,5 a 1,0 m. Esta área foi a única do *Site* que atuou como fonte de contaminação para os solos superficiais. As demais áreas contaminadas atuaram somente como fonte secundária de contaminação para água subterrânea e solo subsuperficial.

Os limites da escavação foram determinados pela adequação das concentrações dos compostos de interesse nos solos residuais aos valores orientadores de intervenção para solos em uso industrial estabelecidos pela CETESB.

5.2.2. ÁREA DAS BACIAS DE EVAPORAÇÃO

Durante sua operação, o *Site* contou com bacias de evaporação. De acordo com (NEWFIELDS, 2023), os solos da região foram removidos e o solo subjacente, após investigação, confirmou a não contaminação por HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos). O volume de material removido foi destinado para um Aterro Classe I.

5.2.3. UNIDADE OPALA

Segundo NEWFIELDS (2023), a unidade Opala entrou em operação em 1977, sendo utilizada para produção de compostos organofosforados e piretróides. As principais substâncias químicas de interesse (SQIs) identificadas no domínio de Opala foram 1,2 Dicloroetano (1,2-DCA) e benzeno (NEWFIELDS, 2023).

A partir de 1996, a SBPL se dedicou na instalação e operação de um sistema constituído por uma barreira hidráulica composta por 3 poços de extração e uma estação de tratamento para recuperação da qualidade da água, tendo em vista a contaminação advinda da área Opala. O sistema de bombeamento operou até 2007 quando alcançou o objetivo de uma significativa redução da pluma de 1,2-DCA.

A remediação foi realizada com o uso de um sistema de extração vertical e poços de infiltração com pontos de *air sparging* que foram utilizados para criar um biorreator aeróbico *in situ* para o tratamento da contaminação no solo e na água subterrânea. O vapor de solo presente na zona não saturada, que estava contaminado, foi removido com um sistema de extração de vapor de solo (SVE). A Avaliação de Risco à Saúde Humana foi atualizada após o fim da remediação e concluiu a ausência de risco à saúde humana para os cenários de trabalhador comercial/industrial e trabalhador em obras civis/escavação (NEWFIELDS, 2013).

Em um esforço adicional para a redução das concentrações de 1,2-DCA a níveis mais próximos da potabilidade, foi realizada a injeção de ORC (compostos liberadores de oxigênio) no domínio Opala. A remediação resultou em reduções de concentração na faixa de 99%, atingindo as metas de remediação, segundo a NEWFIELDS (2023). A área Opala atualmente é mostrada na Figura 20.

Figura 20: Antiga área Opala.



Fonte: Autora (2024).

5.2.4. ÁREA DE FORMULAÇÃO

As investigações de solo realizadas confirmaram o histórico operacional para a Área de Formulação que continham caixas de concreto chamadas de pit seco, que recebiam efluentes da caixa de lavagem de tanques de formulação de pesticidas. Foram identificadas rachaduras nessas caixas que causaram vazamentos diretamente para solos profundos, abaixo de 3 metros de profundidade (NEWFIELDS, 2023).

Conforme citado no Relatório (NEWFIELDS, 2023), as análises de solo superficiais e subsuperficiais (<3 m de profundidade) confirmaram a ausência de contaminação por pesticidas organoclorados nesta seção. Foram identificadas apenas detecções traço, que não apresentam riscos para cenários de trabalhador comercial ou industrial.

Aproximadamente 93% da massa de pesticidas foi delineada entre 3 e 6 m de profundidade na área dos pits (NEWFIELDS, 2023). Segundo HAZTEC (2009) e NEWFIELDS (2011), o projeto de escavação removeu cerca de 1.200 m³ de solo impactado, representado mais de 90% da massa subsuperficial de todo o solo contaminado, sendo ela a área mais crítica da contaminação (Figura 21).

Figura 21: Região da antiga Área de Formulação, região onde houve a maior escavação.



Fonte: Autora (2024).

A *performance* do projeto foi avaliada através da coleta de amostras compostas na base da cava e comparação dos resultados analíticos obtidos nas amostras com os valores de risco calculados que estivessem abaixo do cenário Trabalhador de Obra Civil/Escavação (NEWFIELDS, 2023). A escavação alcançou uma profundidade de 6 a 7 metros, pois nesta profundidade é onde se encontra uma camada de siltitos compactos que isola e protege o aquífero. Dada a profundidade das escavações, as paredes das cavas foram reforçadas lateralmente (NEWFIELDS, 2023).

Os solos contaminados removidos da área de formulação foram enviados para Aterro Industrial Classe I ou incinerados. A água subterrânea coletada nas cavas foi bombeada e direcionada para tratamento na estação de tratamento de águas subterrâneas associada à barreira hidráulica. No intuito de prevenir a intrusão de água pluvial dentro das cavas e minimizar a geração de poeira nas atividades de escavação, elas foram realizadas dentro de tendas pressurizadas. Para o reaterro das cavas foi utilizada argila inerte proveniente de jazida credenciada, previamente analisada e aprovada. A superfície das cavas foi compactada e nivelada para recomposição do piso com uma camada de concreto de 15 cm (NEWFIELDS, 2023). Na Figura 22 é possível visualizar uma imagem atual da antiga Área de Formulação.

Figura 22: Antiga Área de Formulação.



Fonte: Autora (2024).

5.2.5. BAIRRO RECANTO DOS PÁSSAROS

Em 2001 se iniciou a aquisição de propriedades do bairro Recanto dos Pássaros e aproximadamente 90% de todos os lotes do condomínio foram adquiridos pela SBPL e suas respectivas edificações foram posteriormente demolidas. Atualmente, todas as habitações estão completamente desocupadas e a instalação de uma UFV na área não seria prejudicial para a vizinhança.

Foram feitas amostragens de diferentes tecidos vegetais das plantas da região, e os resultados das análises apresentaram não detecções para pesticidas organoclorados, corroborando com estudos científicos publicados que afirmam que há baixo potencial de acumulação de pesticidas organoclorados nas folhas das árvores. Conforme GEOKLOCK; ROYAL HASKONING (2001), mais de 700 amostras de solo também foram coletadas no bairro Recanto dos Pássaros, e todas apresentaram valores abaixo dos valores de intervenção para o cenário residencial da CETESB, considerando os SQIs de interesse.

Para a recuperação ambiental da área do Recanto dos Pássaros (BIOFLORA, 2017), a SBPL desenvolveu um projeto de reflorestamento com espécies nativas na Área de Preservação Permanente (APP) do Rio Atibaia, em uma faixa de 50 metros em relação às margens do Rio, como estabelecido pela legislação (Figura 23). Na Figura 24 tem-se uma imagem da área do Recanto dos Pássaros atualmente.

Figura 23: Área de reflorestamento no bairro Recanto dos Pássaros.



Fonte: Autora (2024).

Figura 24: Área Recanto dos Pássaros atualmente.



Fonte: Autora (2024).

5.2.6. ÁGUA SUBTERRÂNEA

Inicialmente, conforme (NEWFIELDS, 2023), foi feito o controle hidráulico intensivo para conter a pluma de 1,2-dicloroetano da Opala e de pesticidas organoclorados provenientes da antiga Área de Formulação. A água era encaminhada para estação de tratamento, composta por uma unidade de tratamento físico-químico, responsável pela remoção dos compostos inorgânicos presentes nas águas subterrâneas, e por uma unidade de adsorção em carvão ativado, cuja função era a remoção dos compostos orgânicos. A operação da barreira hidráulica funcionou até o momento em que a CETESB recomendou o desligamento do sistema em função da pequena massa de contaminantes removida por ele, bem como para avaliação do processo de atenuação natural das plumas de contaminação.

Posteriormente, foi adotada uma abordagem passiva com drenos, os quais são comumente empregados no âmbito de remediação de áreas contaminadas. Neste caso, o dreno passivo foi construído em trincheiras subterrâneas escavadas que buscam interceptar o fluxo natural das águas subterrâneas. Segundo ARCADIS (2015), o objetivo era desviar o fluxo de água subterrânea para reduzir consideravelmente o volume de água subterrânea potencialmente impactada.

O dreno passivo representou uma alternativa de remediação sustentável, passiva (não requer bombeamento) e de longo prazo para o gerenciamento das águas subterrâneas no Site (NEWFIELDS, 2013). Não obstante, o dreno passivo permanece atuante até hoje. Na Figura 25 é possível visualizar a região no concreto onde se encontra o dreno passivo abaixo do solo e, na Figura 26, mostra-se a caixa de inspeção do dreno passivo, localizada no alinhamento do dreno.

Figura 25: Linha onde se encontra o dreno passivo.



Figura 26: Caixa de inspeção do dreno passivo.



Fonte: Autora (2024).

5.2.7. RIO ATIBAIA

No ano de 2015, teve início o modelo de fluxo de massa (NEWFIELDS, 2023). O objetivo do modelo de fluxo de massa foi determinar a massa de pesticidas proveniente do aquífero raso que migra para o Rio Atibaia e estimar qualquer eventual potencial impacto que essa massa provocaria no rio (NEWFIELDS, 2023). A avaliação deste modelo foi concluída em 2022 e teve as seguintes conclusões, de acordo com NEWFIELDS (2023):

- As concentrações residuais das SQIs presentes no *Site* não alteram a qualidade das águas do Rio Atibaia. Essa conclusão é a mesma, seja para as condições com sistema de bombeamento em operação ou para as condições naturais do *Site*, com operação do dreno passivo. As concentrações diárias máximas de pesticidas no Rio Atibaia estimadas são duas ordens de magnitude menores que o valor de referência estabelecido pela CONAMA nº 357/2005, e três ordens de magnitude menores que os limites de detecção alcançáveis em laboratório.
- Existe uma tendência estatística significativa da redução do fluxo de Drins. É possível observar um ciclo sazonal, com menores concentrações durante a estação seca. Apesar destas flutuações, análises indicam que existe uma tendência decrescente significativa no fluxo de massa dos Drins em direção ao Rio Atibaia desde 2016. Estas observações corroboram para atenuação natural das concentrações no *Site* e suportam a principal conclusão de que as concentrações residuais das SQIs não alteram a qualidade das águas do Rio Atibaia.
- Com base nos resultados das avaliações de qualidade das águas e sedimentos do Rio Atibaia, concluiu-se que não foram detectados impactos no Rio associados às operações do *Site*. Aproximadamente 1000 amostras de água e sedimentos do Rio Atibaia foram coletadas de 2003 até 2021 e não indicam potenciais impactos provenientes do *Site*.

5.3. AÇÕES FUTURAS E TERMO DE REABILITAÇÃO PARA USO DECLARADO

Segundo NEWFIELDS (2023), com a remediação completa e a inexistência de risco a saúde humana e dos bens a proteger, foi desenvolvido um modelo de monitoramento futuro com os controles institucionais propostos para atender os requisitos de obtenção do Termo de Reabilitação para Uso Declarado do *Site*.

A rede de monitoramento de longo prazo tem o objetivo de acompanhar o processo de atenuação natural e verificar a extensão da pluma. A rede de monitoramento de longo prazo foi selecionada e simplificada a partir de uma densa rede de poços (NEWFIELDS, 2023). Mesmo assim, os poços removidos da rede de monitoramento de longo prazo serão mantidos e poderão ser amostrados em caso de contingência. É proposto um monitoramento anual para os anos de 2023 e 2024, sendo que, a partir de 2025 a frequência de monitoramento sugerida é a cada 5 anos, para as áreas de interesse do presente estudo.

Com relação a área atual do *Site*, conforme apresentado por NEWFIELDS (2023), todas as estruturas da antiga fábrica foram removidas e a região encontra-se livre e desocupada, com presença de espesso pavimento de concreto (> 30 cm). Assim, os caminhos de exposição se encontram incompletos uma vez que a área é pavimentada e não há contato direto com os solos e a água subterrânea do aquífero raso.

Na Figura 27 e na Figura 28 é apresentada uma comparação de imagens de satélite do Google Earth Pro entre maio de 2005 e fevereiro de 2024.

Figura 27: Área de estudo em maio de 2005.



Fonte: GOOGLE EARTH PRO (2005).

Figura 28: Área de estudo em fevereiro de 2024.



Fonte: GOOGLE EARTH PRO (2024).

As vias de acesso asfaltadas foram mantidas (Figura 29 e Figura 30), bem como a drenagem (Figura 31 e Figura 32). Segundo informações de trabalhadores que frequentam a área, a drenagem é eficiente, sem acúmulos de água após eventos de chuvas.

Figura 29: Vias de acesso.



Figura 30: Vias de acesso



Fonte: Autora (2024).

Figura 31: Drenagem.



Figura 32: Drenagem.



Fonte: Autora (2024).

5.4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

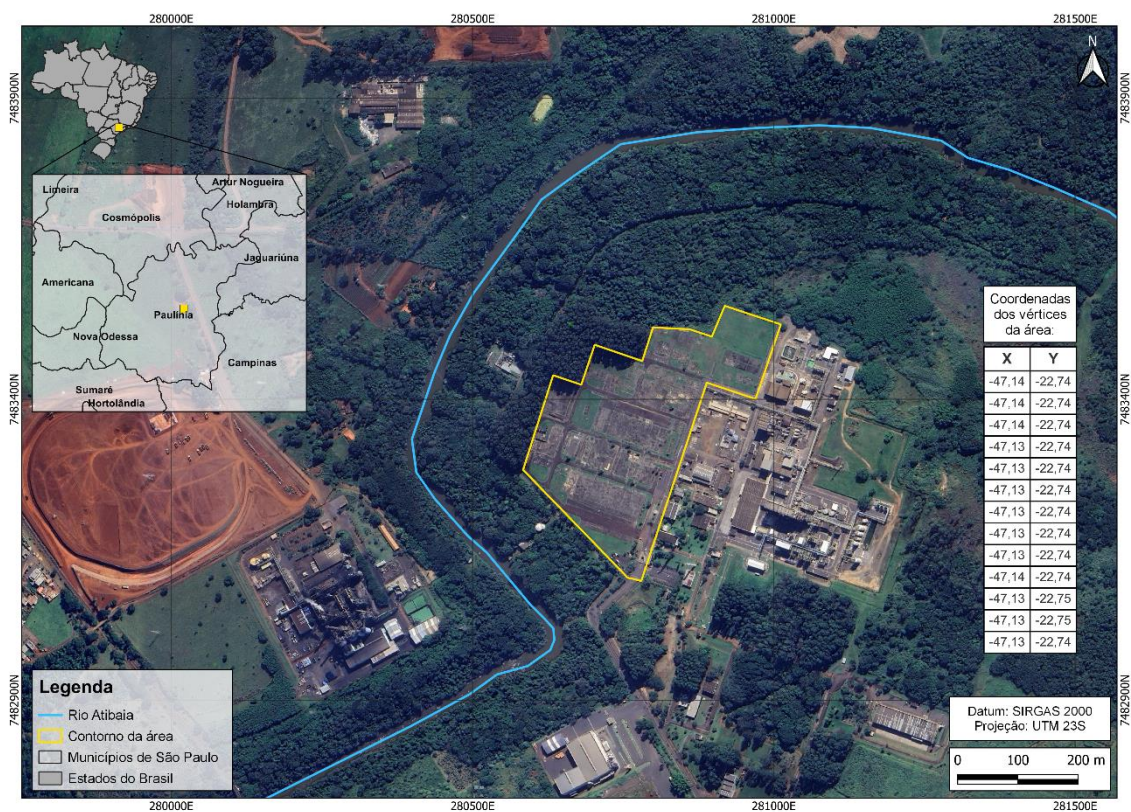
A área de estudo está localizada no município de Paulínia, no interior do estado de São Paulo, distante cerca de 120 km da capital, no sentido noroeste. Paulínia faz parte do Complexo Metropolitano Estendido, também conhecido como Macro MetrÓpole Paulista, onde se localiza cerca de 75% da população do estado, segundo ASQUINO (2010).

Segundo dados do último censo (IBGE, 2022), em 2022, a área do município era de quase 140 km² com uma população de cerca de 110,5 mil de pessoas. Apresenta 94,1% de domicÍlios com esgotamento sanitário adequado e 47,8% de domicÍlios urbanos em vias pÚblicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio). Em comparação com os demais municípios do estado, Paulínia foi responsável pelo maior PIB per capita.

A cidade de Paulínia é, hoje, uma zona industrial e sede de um dos maiores polos petroquímicos da América Latina. A refinaria de Paulínia, a maior da Petrobras (G1, 2024), é a fonte de renda mais proeminente da cidade. Ademais, a partir de 2019, a cidade também se tornou sede do ramo de tecnologia com centro de processamento de dados de empresas multinacionais.

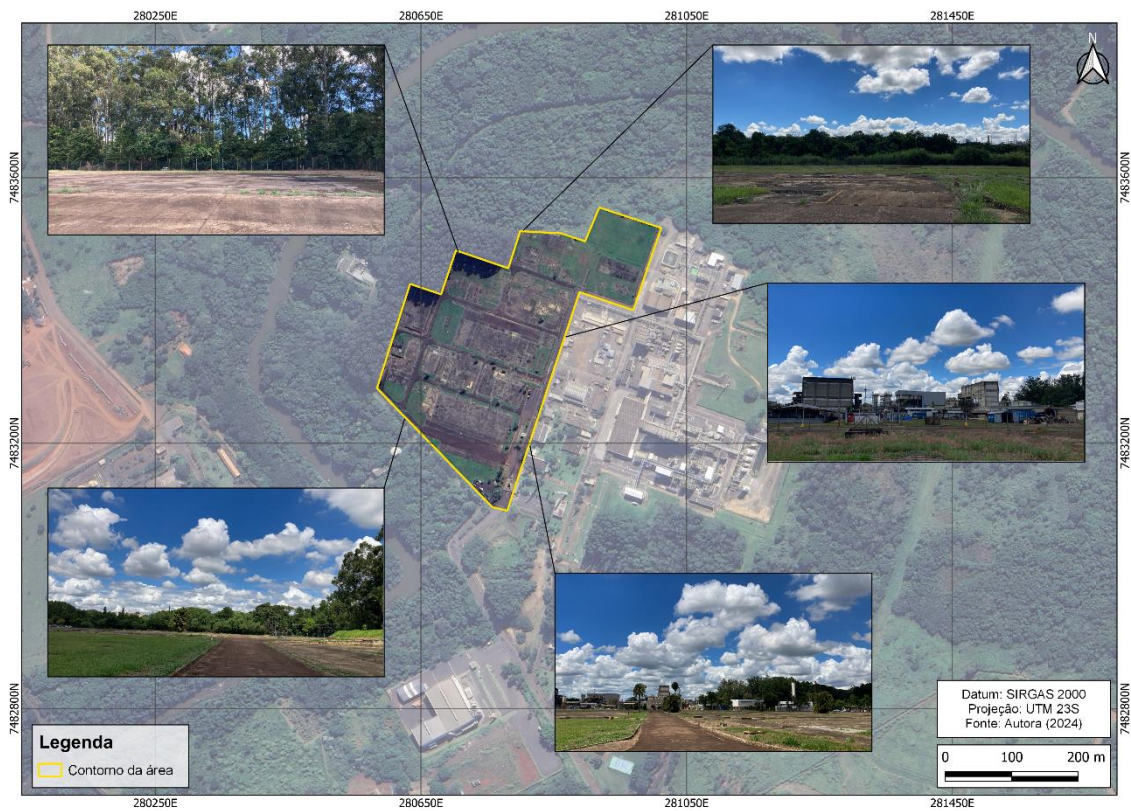
Utilizando o *software* QGIS, o antigo sítio industrial da Shell detém de uma área de 105 mil m², incluindo a parcela reflorestada. A região pavimentada e sem utilização, área de interesse para geração fotovoltaica, é de aproximadamente 87 mil m². Nesta área, foi aplicada uma metodologia a fim de analisar a viabilidade ambiental para implementação de uma usina fotovoltaica no local. Na Figura 33 é apresentada a localização da área de estudo e, na Figura 34, tem-se os limites atuais da área com fotos de 2024.

Figura 33: Localização da área de estudo.



Fonte: Autora (2024).

Figura 34: Limites atuais da área de estudo.

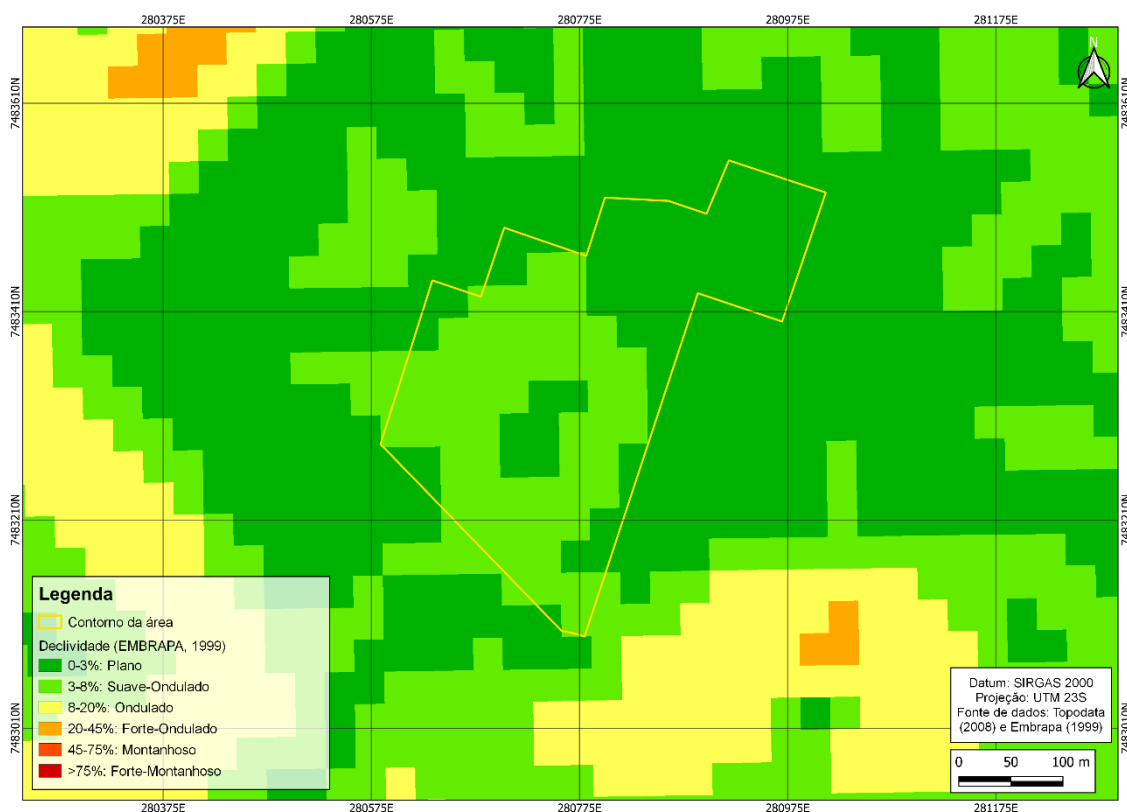


Fonte: Autora (2024).

5.4.1. DECLIVIDADE

Para avaliação da declividade do terreno, foi utilizado como base o modelo digital de elevação (MDE) do TOPODATA (VALERIANO, 2008) com resolução espacial de 30 m. Na Figura 35, tem-se o mapa da declividade considerando a classificação proposta pela EMBRAPA; SANTOS (2018). A área de interesse está inserida em solo plano e suave-ondulado, com inclinações máximas de 8%, o que se mostra interessante para a implementação de uma usina solar, já que grandes declividades de terreno podem aumentar o sombreamento dos módulos, a erosão e os deslizamentos, dificultando as instalações.

Figura 35: Declividade da área de estudo.



Fonte: Autora (2024).

5.4.2. PEDOLOGIA E USO E COBERTURA DO SOLO

O bioma do local é a Mata Atlântica, já muito modificada pela atividade antrópica na região. Fazendo uso da informação vetorial da Embrapa na escala 1:5.000.000, denominado Mapa de Solos do Brasil (IBGE, 2006), elaborado de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, nota-se que o solo da região é o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Latossolos são solos constituídos por material mineral (EMBRAPA; SANTOS, 2018). Esses solos possuem coloração variando entre vermelho-amarelada e amarelo-avermelhada e apresentam saturação por bases inferior a 50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (incluindo o horizonte BA), de acordo com as especificações de EMBRAPA; SANTOS (2018).

As estruturas e edificações, que existiam na época em que a indústria operava, foram demolidas e, atualmente, a cobertura do solo é de concreto. Mesmo assim, há uma vegetação remanescente de gramíneas e pequenas árvores e arbustos (Figura 36).

Figura 36: Cobertura do solo concretada e com vegetação remanescente.

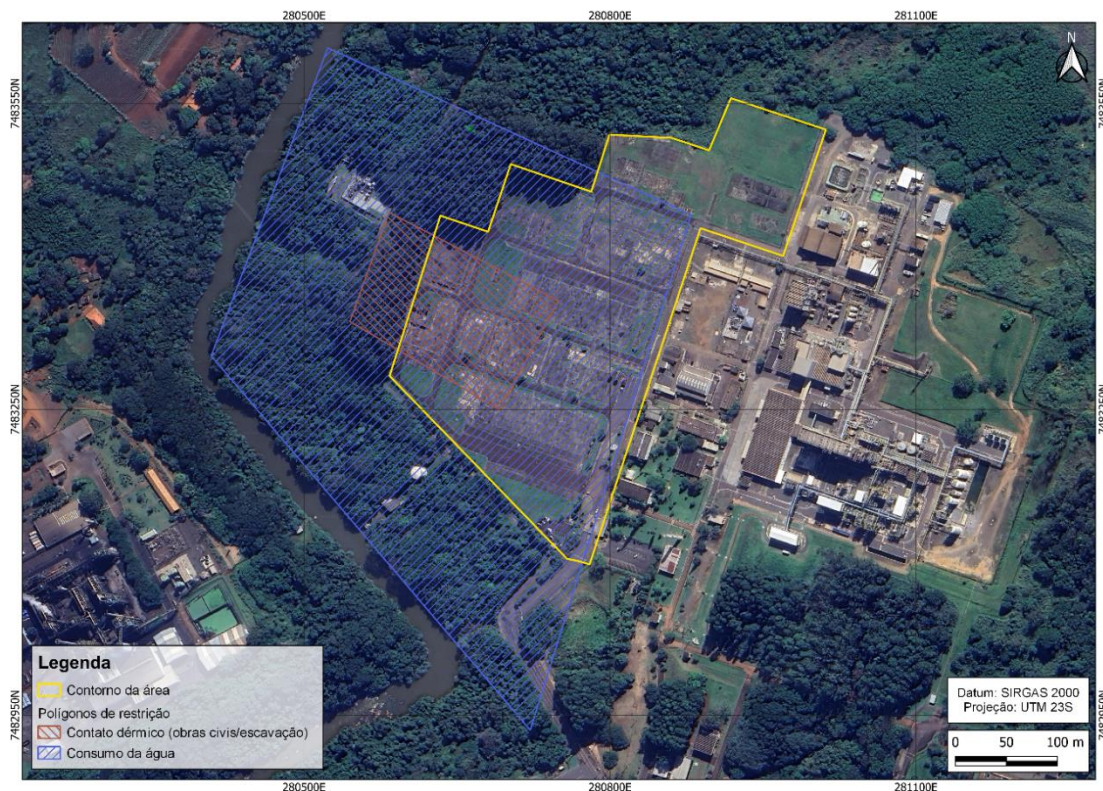


Fonte: Autora (2024).

As vias de acesso foram mantidas, funcionando bem para permitir o acesso e movimentação dentro do futuro parque. O sistema de drenagem da antiga fábrica ainda está operando e é considerado eficiente, sendo essencial para gestão de águas pluviais dentro da usina solar.

Após a reabilitação da área e com base nos resultados mais recentes do monitoramento da água subterrânea, conforme NEWFIELDS (2023), foram delimitadas as plumas residuais dos compostos de interesse. Essas plumas foram divididas em duas categorias: áreas com restrição ao contato dérmico por trabalhadores de obras civis/escavação e áreas com restrição ao consumo da água subterrânea. Na Figura 37 foram delineados os polígonos de controle institucional, que influenciam a escavação e a construção da usina, além do seu gerenciamento.

Figura 37: Polígonos de restrição para controle institucional.



Fonte: Autora (2024).

5.4.3. HIDROGRAFIA

O corpo d'água principal da região é o Rio Atibaia. O Rio Atibaia nasce na cidade de Atibaia, avança pelas regiões das cidades de Campinas e Paulínia e tem sua foz na represa de Americana, onde, com o Rio Jaguari, forma o Rio Piracicaba. Sua cabeceira é formada pelos rios Atibainha e Cachoeira, ambos represados para abastecer o Sistema Cantareira (SILVA; JARDIM, 2006).

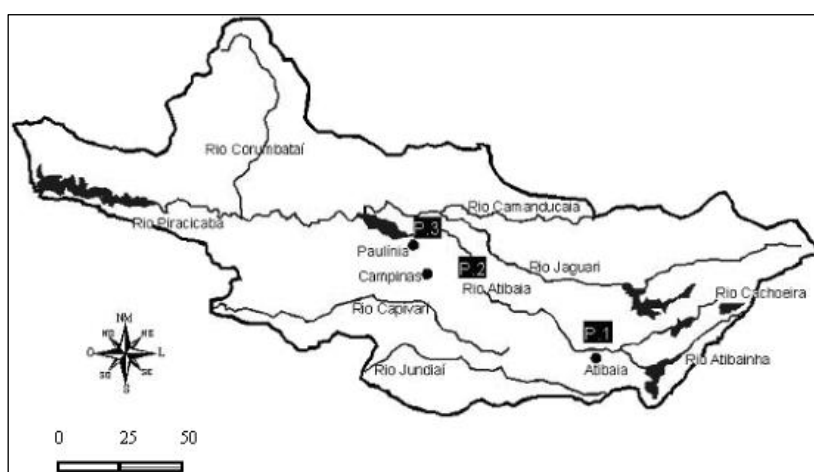
A área está inserida na macrorregião hidrográfica da Bacia do Paraná, a qual ocupa 85% do território paulista (SIGRH, 2024). Segundo SIGRH (2024), o estado de São Paulo tem seu território dividido em 22 Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) e a área de estudo está inserida na UGRHI 05: UGRHI de Piracicaba, Capivari e Jundiáí.

A UGRHI 05 é constituída pelas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba (parte paulista), Capivari e Jundiáí, com exutórios independentes no rio Tietê. Esta Unidade de Gerenciamento está situada a Região Metropolitana de Campinas (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2005).

Segundo Plano Estadual de Recursos Hídricos 2004-2007 (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2005), os recursos hídricos superficiais que compõem a UGRHI 05 não se encontram, em sua totalidade, à disposição para uso nessa bacia, pois uma parcela substancial é transferida, via Sistema Cantareira, para a Região Metropolitana de São Paulo. Isso representa aproximadamente 50% do abastecimento da população.

Segundo SILVA; JARDIM (2006), o Rio Atibaia, na região de Campinas e Paulínia, apresenta-se sob o impacto de uma grande carga poluidora proveniente do esgoto doméstico *in natura* das cidades presentes em sua bacia hidrográfica. Nota-se que a presença de matéria orgânica e amônia são responsáveis, em grande parte, pela degradação da qualidade destas águas, afetando o equilíbrio das comunidades aquáticas. A Figura 38 ilustra as bacias que influenciam no Rio Atibaia.

Figura 38: A bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí. Ponto P.1, nascente do Rio Atibaia, na estação de captação de água da cidade de Atibaia. Ponto P.2, localizado na estação de captação de água da cidade de Campinas e Ponto P.3, logo após a afluência do Ribeirão Anhumas, na cidade de Paulínia.



Fonte: (SILVA; JARDIM, 2006).

5.4.4. UNIDADE AQUÍFERA

Utilizando como base de dados o mapeamento das Áreas Aflorantes dos Aquíferos e Sistemas Aquíferos do Brasil, em escala 1:1.000.000 (ANA, 2016), o sistema aquífero aflorante

na região é o Serra Geral. De acordo com a CETESB (2024a), o aquífero Serra Geral é formado por rochas bastante impermeáveis originadas por derrames basálticos da Formação Serra Geral e intrusões diabásicas.

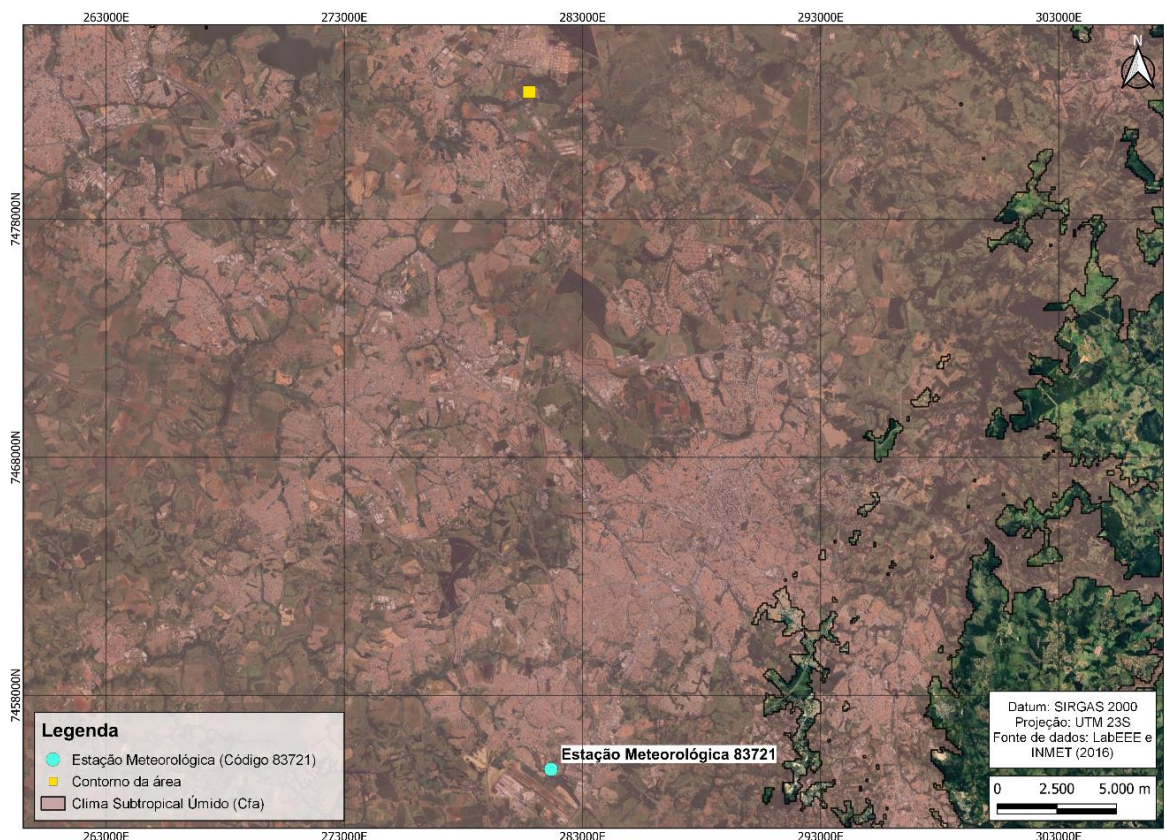
Neste tipo de aquífero, a produção de água subterrânea ocorre somente ao longo de falhas e fraturas das rochas, e na presença de rochas mais permeáveis. A recarga se dá através da precipitação pluvial sobre os solos basálticos, que vão atingir as regiões fissuradas da rocha matriz. Ocorre também um grande intercâmbio de água com outros aquíferos próximos. As principais saídas de drenagem desse aquífero são os rios.

5.4.5. CLIMATOLOGIA

De acordo com a classificação climática proposta por Wladimir Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), a área está inserida no clima subtropical úmido (Cfa). São Paulo apresenta 33,4% de seu território localizado no clima Cfa, sendo um clima típico do sudoeste do estado. Os verões são quentes sem a presença de uma estação seca definida. A temperatura do mês mais frio varia entre -3°C e 18°C e a temperatura do mês mais quente é, normalmente, superior a 22°C.

A estação meteorológica selecionada para obtenção de dados climáticos foi a de Campinas Viracopos (Código 83721), distante aproximadamente 28 km ao sul da área de estudo (Figura 39). Esta é a estação mais próxima e se localiza na mesma zona climática e bioma do *Site*, com uma diferença de altitude de 100 m. O arquivo climático foi obtido através da plataforma do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE, 2016) e foi gerado a partir dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 39: Estação meteorológica selecionada (Código 83721 – Campinas Viracopos).

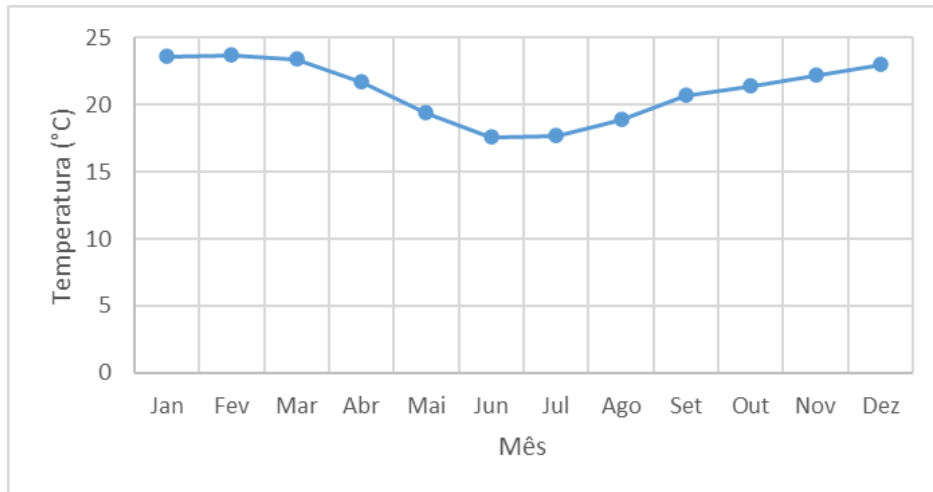


Fonte: Autora (2024).

5.4.5.1. Temperatura

As temperaturas analisadas na estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721) variaram de 23,7°C, em fevereiro, até 17,6°C, em junho, com uma média anual de 21,1°C (Gráfico 1).

Gráfico 1: Estatísticas mensais para temperaturas de bulbo seco para estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721).

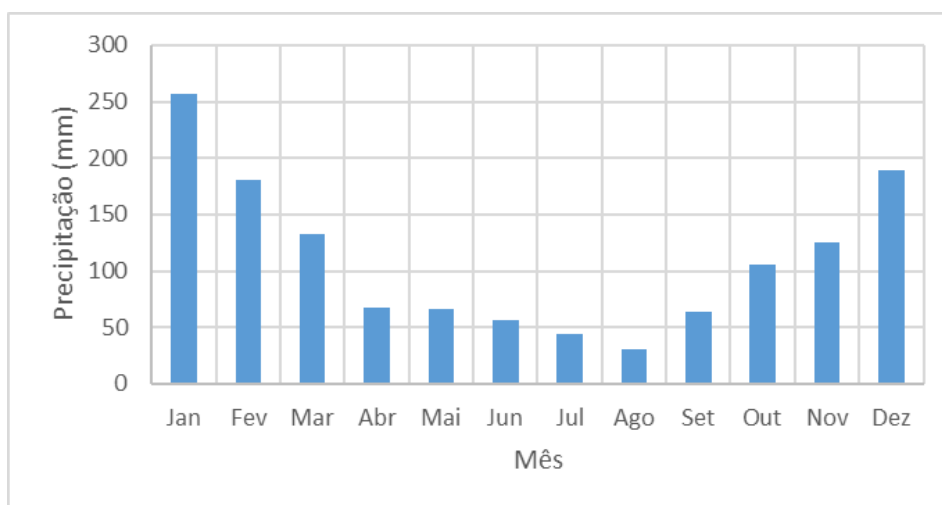


Fonte: Autora (2024).

5.4.5.2. Precipitação

As chuvas podem influenciar um parque solar de maneira negativa, gerando maior nebulosidade e menor incidência solar; ou de maneira positiva, por permitir uma limpeza da poeira que se acumula nos módulos. Na estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721), o maior valor de precipitação padrão média foi observado em janeiro (257 mm) e o menor valor, em agosto (30 mm). No Gráfico 2, tem-se as médias mensais de precipitação líquida e, graficamente, pode-se notar um padrão de chuvas mais acentuadas no verão.

Gráfico 2: Precipitação líquida médio padrão mensal para estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721).



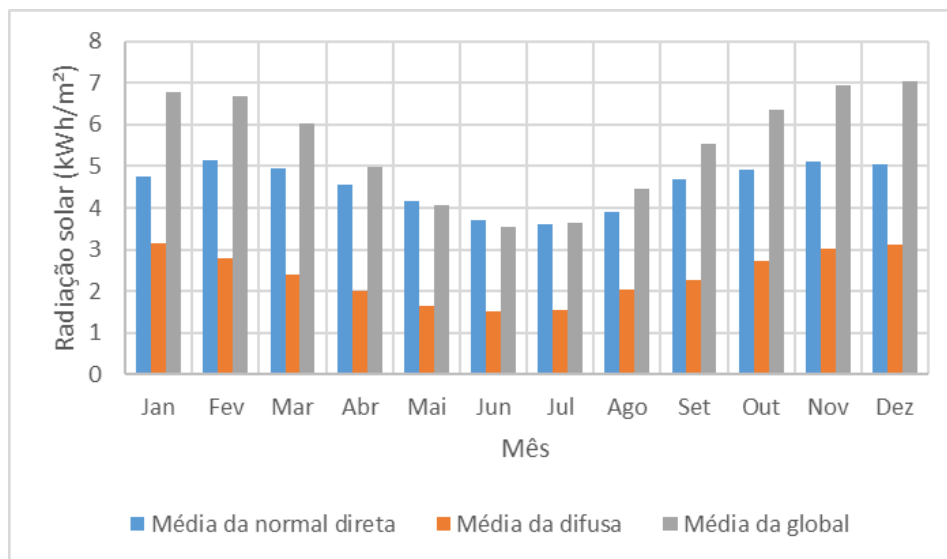
Fonte: Autora (2024).

5.4.5.3. Radiação Solar

Através do arquivo climático foi possível obter os dados de radiação. A radiação direta normal diz respeito àquela recebida de forma direta do sol, sem sofrer dispersão, sendo medida perpendicularmente aos raios solares. A radiação difusa é aquela recebida do sol, mas que já sofreu dispersões em sua trajetória. Por fim, a radiação global horizontal é a total incidente em uma superfície, dada pela soma da direta horizontal e difusa horizontal. A parcela de energia refletida pela superfície atingida pelos raios solares também pode gerar eletricidade, mas é consideravelmente menor em comparação com outras formas de energia solar captada. Por isso, essa parcela geralmente não é considerada nas medições, sendo utilizada apenas em simulações de software.

Os valores de radiação solar normal direta, difusa e horizontal global para estação meteorológica avaliada, de Campinas Viracopos (Código 83721), são apresentados no Gráfico 3, calculadas pelo LABEEE (2016). Notam-se maiores valores no período quente e menores valores no período frio do ano. A maior radiação solar normal direta diária foi de 7936 kW/m², atingida na metade do mês de fevereiro. As médias foram de 4,54 kW/m² por dia para radiação solar normal direta, de 2,34 kW/m² por dia para radiação solar difusa e de 5,50 kW/m² por dia para radiação solar horizontal global.

Gráfico 3: Radiação solar média normal direta, difusa e horizontal global para estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721).

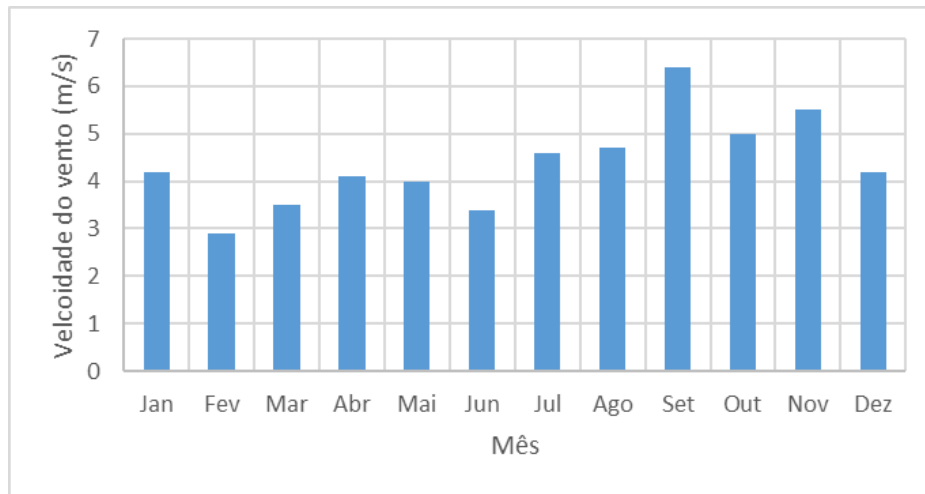


Fonte: Autora (2024).

5.4.5.4. Vento

A velocidade do vento é importante para diminuição da temperatura do módulo. A estatística da estação meteorológica de Campinas Viracopos (Código 83721) varia entre o valor máximo de 5,5 m/s, em novembro, e o valor mínimo de 2,9 m/s, em fevereiro (Gráfico 4). O valor médio anual foi de 4,4 m/s.

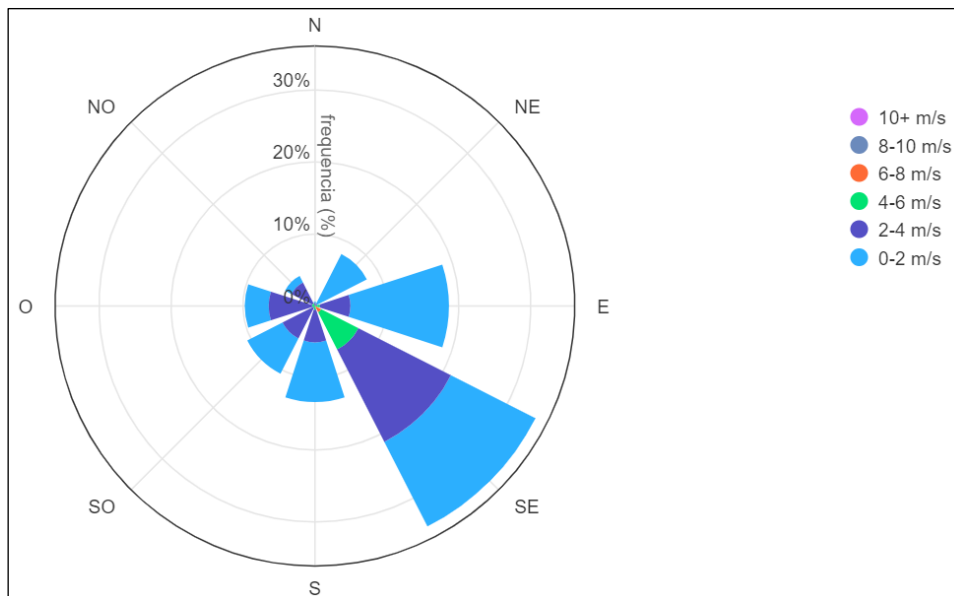
Gráfico 4: Estatística mensal de velocidade do vento para estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721).



Fonte: Autora (2024).

Utilizando como base o arquivo climático supracitado, a Figura 40 mostra a rosa dos ventos gerada pelo Projetando Edificações Energeticamente Eficientes (PROJETEEE, 2016), com direção do vento predominante para sudeste. A direção do vento é importante para confecção da fundação, pois ela é responsável por evitar que o vento cause qualquer rotação nos módulos. Neste caso, a direção sudeste significa vento na parte traseira do módulo (Figura 41), podendo significar problemas das estruturas. Por outro lado, nota-se que a intensidade do vento é relativamente baixa o ano todo, o que diminui a preocupação com relação a movimentação das placas.

Figura 40: Rosa dos ventos para estação meteorológica Campinas Viracopos (Código 83721).



Fonte: PROJETEEE (2016).

Figura 41: Representação da direção do vento na UFV.

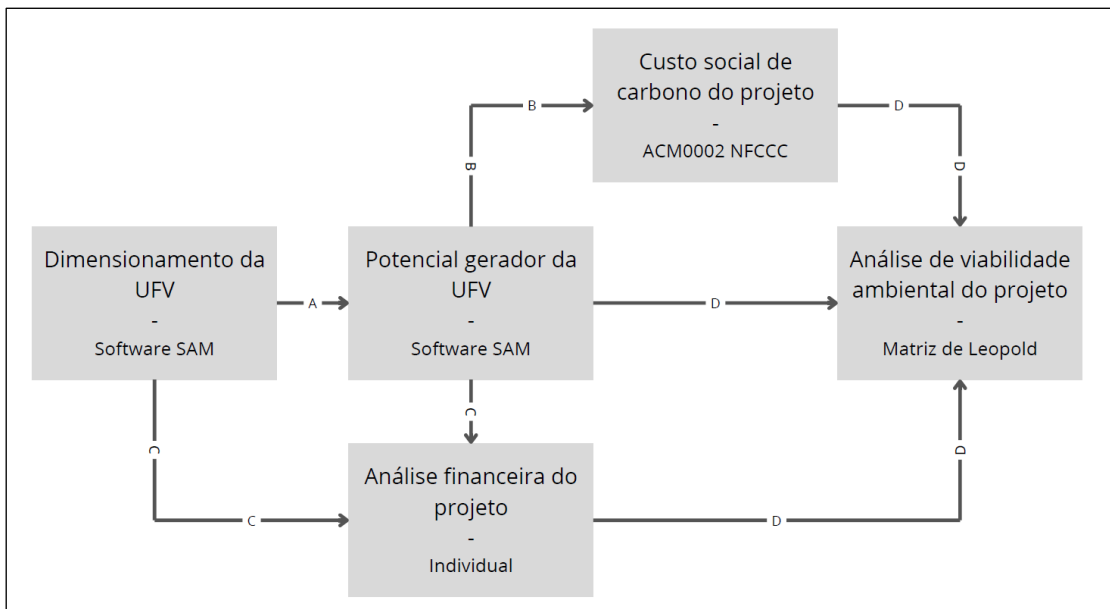


Fonte: Adaptado de SSOLAR (2024).

6. METODOLOGIA

Neste item foi detalhado a metodologia desenvolvida para o trabalho, abordando as ferramentas e técnicas empregadas para a análise dos dados, de modo a alcançar os objetivos propostos. O Fluxograma 2 apresenta um esquema resumido do processo metodológico adotado. Esta seção busca garantir a transparência e a replicabilidade do estudo.

Fluxograma 2: Processo metodológico aplicado no projeto.



Fonte: Autora (2024).

6.1. DIMENSIONAMENTO DA UFV

Para simulação do sistema fotovoltaico na área de estudo, foi utilizado o *software System Advisor Model (SAM)*, que é um aplicativo livre e gratuito para análises de viabilidade técnico-econômicas de alternativas energéticas, sendo capaz de modelar diversos sistemas de energia.

Para esta pesquisa, foi empregado o modelo fotovoltaico detalhado sem avaliação financeira. A avaliação financeira foi feita de forma individual, fora do *software*.

6.1.1. ÁREA ÚTIL

Dos 87 mil m² de área disponível para utilização para geração fotovoltaica, foram retiradas: regiões desniveladas de antiga carga e descarga de caminhões a oeste; área de sombreamento pelos eucaliptos do cortinamento vegetal a oeste e sudoeste; áreas não pavimentadas a norte e nordeste; área de entrada do *site* e estacionamento ao sul; e áreas de vias de acesso.

Além disso, o dreno passivo no local, especialmente referenciado na Figura 19, apresenta sensibilidade devido às profundidades de escavação alcançadas. Por essa razão, não é recomendada a utilização do solo nesta região. Assim, foi estabelecido um buffer de 2 m ao redor do dreno passivo para não ser aproveitada na geração de energia, visando assegurar a integridade total do sistema.

A área útil total considerada para geração de energia solar fotovoltaica foi delimitada e dividida em oito subáreas, com um total de 39 mil m² (Figura 42). As especificações são detalhadas no Quadro 1.

Figura 42: Área útil empregada para geração de energia.



Fonte: Autora (2024).

Quadro 1: Especificações das subáreas de geração.

Subárea	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m ²)	Área (ha)
I	84	63	5.386,3	0,54
II	93	68	6.453,6	0,65
III	89	62	5.722,2	0,57
IV	89	62	6.330,4	0,63
V	88	52	4.674,9	0,47
VI	52	57	3.036,6	0,30
VII	73	51	4.489,6	0,45
VIII	73	51	2.870,8	0,29
TOTAL			38.964,5	3,90

Fonte: Autora (2024).

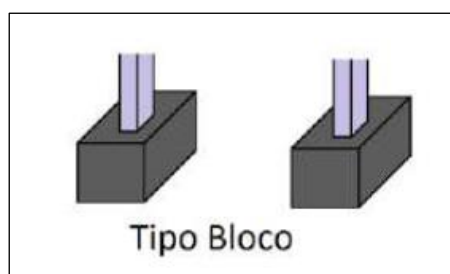
6.1.2. FUNDAÇÃO

A estrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos tem como função posicioná-los de maneira estável. Além disso, ela deve assegurar uma ventilação adequada, permitindo dissipar o calor que normalmente é produzido devido à ação dos raios solares e ao processo de perdas na conversão de energia. Isto é importante porque a eficiência dos módulos diminui com a elevação da temperatura, podendo até comprometer seu funcionamento normal. Deve ainda possibilitar o distanciamento entre módulos, conforme indicação do fabricante, para evitar danos mecânicos aos mesmos conforme sua dilatação (CEPEL, 2014).

Levando em consideração as plumas residuais de contaminação e as restrições de uso do solo previamente estabelecidas (Figura 37), optou-se por não aplicar fundações que precisassem de perfurações e/ou escavações do subsolo. Por isso, a fundação do tipo bloco de concreto foi a mais indicada, promovendo suporte na superfície e economia de material.

Conforme CEPEL (2014), a fundação do tipo bloco (Figura 43) pode ser empregada em diferentes terrenos e locais, sendo necessário menor volume de cimento, quando em comparação com outras técnicas. Sendo relativamente leve e transportável, os blocos podem ser posicionados com razoável facilidade, minimizando os problemas de alinhamento. Os blocos devem ser montados com armaduras e todas as cavidades devem ser completamente preenchidas com concreto ou argamassa.

Figura 43: Fundação do tipo bloco para painéis fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de CEPEL (2014).

Neste caso, foi considerada uma altura para os módulos de 1,5 m, de modo a facilitar a circulação de pessoas dentro do parque e entre as placas. A instalação com estrutura de sustentação no solo proporciona fácil instalação e manutenção e apresenta uma estrutura

robusta. Entretanto, este formato se mostra mais propício ao contato com pessoas, objetos e animais. Desta maneira, destaca-se sobre a necessidade de manutenção adequada e periódica, o que inclui: limpeza dos painéis uma vez ao ano, corte de gramíneas e demais retificações pertinentes.

6.1.3. LOCALIZAÇÃO E RECURSOS

Os dados de localização e as médias anuais de radiação solar, temperatura e vento, foram obtidos através do arquivo climático de Campinas Viracopos (Código 83721).

O albedo foi definido seguindo o modelo difuso de Perez, sendo este um dos mais populares e complexos. De acordo com CEPEL (2014), a radiação solar que chega na superfície terrestre é constituída por uma componente direta e uma componente difusa. No caso em que a superfície estiver inclinada com relação à horizontal, o que acontece em sua maioria, há uma terceira componente que é refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos etc.). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de albedo.

Os valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies (CEPEL, 2014) são apresentados no Quadro 2 e, considerando o uso e cobertura do solo na área de estudo (Seção 5.4.2), adotou-se para a simulação um valor uniforme mensal de albedo de 0,2, o que corresponde ao concreto em construção urbana.

Quadro 2: Valores típicos de albedo para diferentes superfícies.

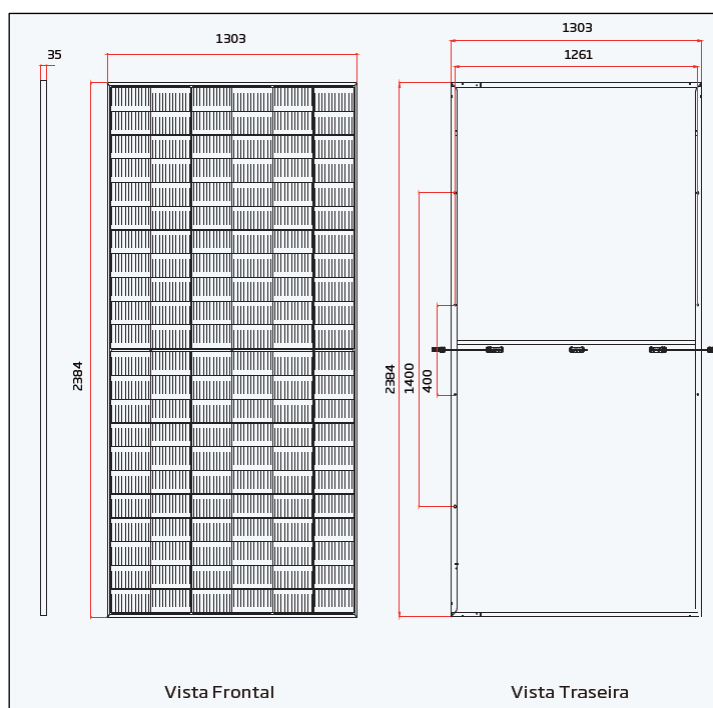
Superfície	Albedo
Gramado	0,18 - 0,23
Grama seca	0,28 - 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo (sem ação de intempéries)	0,55
Concreto (em construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 - 0,9
Água, para diferentes valores de altura solar:	
$\alpha > 45^\circ$	0,05
$\alpha = 30^\circ$	0,08
$\alpha = 20^\circ$	0,12
$\alpha = 10^\circ$	0,22

Fonte: CEPEL (2014).

6.1.4. MÓDULO FOTOVOLTAICO

O módulo escolhido foi o módulo emoldurado monocristalino da Trina Solar modelo TSM-665DE21 com potência máxima de 665W e uma eficiência de até 21,6%, conforme a fabricante. As dimensões do módulo são, na vertical: comprimento de 1,303 m e largura de 2,384 m (Figura 44). O detalhamento elétrico está disposto no Quadro 3. Para modelagem, foi aplicada a correção da temperatura, feita de acordo com a NOCT.

Figura 44: Dimensões do módulo fotovoltaico selecionado.



Fonte: TRINA SOLAR (2020).

Quadro 3: Dados elétricos do módulo fotovoltaico selecionado.

Dados elétricos do módulo	
Potência máxima de pico - Pmax (Wp)	665
Tensão de potência máxima - Vmp (V)	38,0
Corrente de potência máxima - Imp (A)	17,5
Tensão de circuito aberto - Voc (V)	45,9
Corrente de curto-circuito - Isc (A)	18,6

Fonte: Adaptado de TRINA SOLAR (2020).

6.1.5. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Para maximizar a captação de energia solar ao longo do ano, deve ser levado em consideração duas condições: orientação e inclinação dos módulos.

Em geral, para uma operação adequada e eficiente, os módulos devem estar orientados em direção à linha do equador. Nas instalações localizadas no hemisfério Sul, a face dos módulos fotovoltaicos deve estar orientada em direção ao Norte Verdadeiro (CEPEL, 2014). A orientação azimutal do *Site* Shell Paulínia é de, aproximadamente, 20°.

Segundo a CEPEL (2014), o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico deve ser igual à latitude do local onde o sistema será instalado. Por isso, no software SAM, foi definido um ângulo igual à latitude do arquivo climático, que é de 23°.

De maneira complementar, o estudo de "Desempenho de Um Sistema Fotovoltaico em Dez Cidades Brasileiras com Diferentes Orientações do Painei" de GASPARIN; KRENZINGER (2016) mostra que, para a cidade de São Paulo, há uma pequena vantagem energética para arranjos orientados a leste, em comparação com os arranjos orientados a oeste. Assim, para a orientação e o ângulo considerados, a energia anual normalizada do SFCR foi máxima (1,00).

O distanciamento entre as colunas de módulos (*strings*) é essencial para evitar o sombreamento dos módulos e maximizar a produção de energia. Neste caso, o distanciamento também é crucial para permitir a fácil circulação de profissionais dentro do parque, viabilizando o acesso à rede de monitoramento de longo prazo da água subterrânea. Por isso, foi definido que os poços de monitoramento se mantivessem entre as *strings*. A Figura 45 busca representar o esquema de localização dos poços de monitoramento dentro do parque.

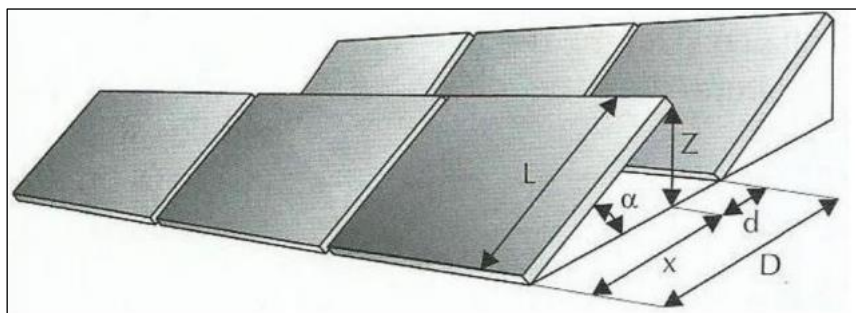
Figura 45: Representação da localização dos poços de monitoramento de água subterrânea, com destaque em vermelho.



Fonte: Adaptado de SSOLAR (2024).

Assim, para definir o design do parque, o distanciamento entre as *strings* foi calculado utilizando como base a metodologia de ZILLES *et al.* (2012), ilustrada na Figura 46 e calculada pela Equação 1.

Figura 46: Distanciamento entre os módulos.



Fonte: ZILLES *et al.* (2012).

$$z = L \cdot \text{sen}(\alpha)$$

$$x = L \cdot \text{cos}(\alpha)$$

Equação 1: Distanciamento dos módulos.

Onde,

z: Distância vertical entre a base do módulo e seu ponto mais alto (m);

x: Projecção horizontal do módulo na base (m);

L: Largura do módulo fotovoltaico (m);

α : Ângulo de inclinação do módulo (°).

De maneira a reduzir o sombreamento e maximizar a eficiência do sistema, a largura total é definida considerando a Equação 2.

$$d = 3,5 \cdot z$$

Equação 2: Largura total.

Onde,

d: Largura total entre as *strings* (m);

z: Distância vertical entre a base do módulo e seu ponto mais alto (m).

Assim, foi possível estimar a quantidade de módulos em série e em paralelo para cada subárea. Como o módulo foi alocado na vertical, a estimativa de módulos em série foi obtida pela divisão entre o comprimento da subárea e o comprimento do módulo (1,303 m). Para o número de *strings*, dividiu-se a largura da subárea pela largura total do módulo (5,094 m). Esse cálculo serviu como base, pois foram feitas correções tendo em vista que a tensão e a corrente do subarranjo de módulos devem respeitar as máximas do inversor.

Portanto, empregou-se menos módulos que os calculados pela área. O total de módulos na usina foi de 5.000 unidades e as especificações adotadas estão dispostas no Quadro 4.

Quadro 4: Configuração dos módulos fotovoltaicos.

Subárea	Nº de módulos em série (em cada subarranjo)	Nº de <i>strings</i> (em cada subarranjo)	Quantidade de subarranjos	Nº total de módulos	Voc (V)	Vmp (V)
I	30	6	4	720	1.377,0	1.140,0
II	30	6	4	720	1.377,0	1.140,0
III	30	6	4	720	1.377,0	1.140,0
IV	30	6	4	720	1.377,0	1.140,0
V	30	5	4	600	1.377,0	1.140,0
VI	20	5	4	400	918,0	760,0
VII	28	5	4	560	1.285,2	1.064,0
VIII	28	5	4	560	1.285,2	1.064,0

Fonte: Autora (2024).

Também foi possível estimar o fator de utilização de área. O fator de utilização de área (Equação 3) mostra que 47% da área é preenchida com módulos e 53% está livre, facilitando a circulação de profissionais para manutenção e operação da UFV, bem como para o acesso a rede de poços de monitoramento a longo prazo.

$$f = \frac{L}{d}$$

Equação 3: Fator de utilização de área.

Onde,

f: Fator de área (adm);

L: Largura do módulo fotovoltaico (m);

d: Largura total entre as *strings* (m).

6.1.6. INVERSOR

A escolha do inversor é influenciada pelo sistema e deve respeitar três premissas:

- Tensão de circuito aberto do subarranjo de módulos deve ser menor que a tensão máxima de entrada do inversor;
- Tensão de potência máxima do subarranjo de módulos deve estar dentro da faixa de operação do inversor, ou seja, entre o valor máximo e mínimo de MPPT;
- A corrente máxima do subarranjo de módulos deve ser menor que a corrente máxima de entrada do inversor.

Assim, optou-se pelo inversor da marca Chint Power Systems America, sendo empregados dois modelos no sistema: CPS ECB200KTL/US-800 [800V] e CPS ECB125KTL/US-480 [480V]. Em cada subárea foram empregados dois inversores. Cada inversor contém duas entradas, as quais se conectam, cada uma, com um subarranjo. A conexão é feita por meio do controlador de carga MPPT. Os dados elétricos de cada inversor estão dispostos no Quadro 5.

Quadro 5: Dados elétricos do inversor selecionado.

Dados elétricos do inversor	CPS ECB200KTL/US-800	CPS ECB125KTL/US-480
Potência máxima em c.a. (kW)	200,744	125,188
Tensão máxima em c.c. (V)	1.500	1.100
Faixa de tensão MPPT em c.c. (V)	950 – 1.500	750 - 1.100
Corrente máxima em c.c. (A)	167,988	139,241

Fonte: Adaptado de CPS (2024).

A configuração do sistema de inversores é detalhada na Tabela 1, com um total de 16 inversores e 32 controladores de carga do tipo MPPT para a UFV.

Tabela 1: Configuração dos inversores e controladores de carga.

Subárea	Nº de inversores	Nº de controladores de carga MPPT	Modelo do inversor
I	2	4	Chint Power Systems America: CPS ECB200KTL/US-800 [800V]
II	2	4	
III	2	4	
IV	2	4	
V	2	4	
VI	2	4	Chint Power Systems America: CPS ECB125KTL/US-480 [480V]
VII	2	4	Chint Power Systems America: CPS ECB200KTL/US-800 [800V]
VIII	2	4	

Fonte: Autora (2024).

A taxa de carregamento dos inversores (do inglês, *Inverter Loading Ratio* - ILR), que representa a relação entre a capacidade c.c. total do inversor e a capacidade c.a. total, atingiu valores de 93% até 119%, se mantendo dentro da faixa comumente empregada de 80% entre 120%, segundo NETO; SORGATO (2022).

6.1.7. PERDAS

Para as simulações, o SAM considera diversas perdas percentualmente aplicadas, de maneira a aproximar o sistema solar da realidade. A porcentagem das perdas foi mantida

conforme sugerida pelo *software*, as quais são: perda na irradiação por sujeira nos módulos (5%), perda na corrente contínua pela *performance* do modelo (4,44%), e perda na corrente alternada pela fiação (1%).

6.2. ANÁLISE DO CUSTO SOCIAL DO CARBONO

Para calcular as toneladas de CO₂ equivalentes que não são emitidas ao se construir e operar uma usina solar fotovoltaica, empregou-se a metodologia de cálculo ACM0002 - Metodologia Consolidada em Grande Escala: Geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis (versão 21.0). Esta metodologia foi desenvolvida pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (do inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change* - NFFCC) e se aplica a projetos de geração de energia renovável conectados à rede, incluindo a construção e operação de uma nova usina solar fotovoltaica.

Estimativas recentes evidenciam valores que variam de US\$ 10/tCO₂ até US\$ 1.000/tCO₂. Em uma avaliação espacial de valores (TOL, 2023), foi avaliado um valor médio de US\$ 24/tCO₂ para o Brasil, variando de US\$ 14/tCO₂ a US\$ 41/tCO₂.

A estimativa é feita por meio da análise das reduções de emissões ou emissões evitadas de CO₂, conforme a Equação 4. Segundo NFFCC (2022), para a maioria das usinas de energia renovável, a emissão de CO₂ do projeto é nulo, pois não há emissões advindas do consumo de combustíveis fósseis durante a operação da usina solar fotovoltaica.

$$RE = Elb_y - Ep_y \quad \text{Equação 4: Redução de emissão de CO}_2.$$

Onde,

RE: Redução de emissão/emissão evitada no ano y (tCO₂/ano);

Elb_y: Emissões de linha de base no ano y (tCO₂/ano);

Ep_y: Emissões do projeto no ano y (tCO₂/ano).

Conforme NFFCC (2022), as emissões de linha de base são estimadas conforme a Equação 5. Ressalta-se que o cenário de linha de base é a eletricidade entregue à rede pela atividade do projeto que, de outra forma, teria sido gerada pela operação de usinas de energia conectadas à rede e pela adição de novas fontes de geração.

$$Elb_y = Eg_y - FE_y \quad \text{Equação 5: Emissões de linha de base.}$$

Onde,

Elb_y: Emissões de linha de base no ano y (tCO₂/ano);

Eg_y: Energia líquida gerada no ano y (MWh/ano);

FE_y: Fator de emissão de CO₂ no ano y (tCO₂/MWh).

Considerando emissões de margem combinada, ou seja, levando em consideração a construção e a operação de uma usina solar, o fator de emissão é calculado a partir da Equação 6 (NFFCC, 2018).

$$FE_{mensal,y} = FE_{o,y} \times P_o + FE_{c,y} \times P_c \quad \text{Equação 6: Fator de emissão.}$$

Onde,

$FE_{\text{mensal},y}$: Fator de emissão de CO₂ mensal no ano y (tCO₂/MWh);

$FE_{o,y}$: Fator de emissão de CO₂ na margem de operação no ano y (tCO₂/MWh);

P_o : Peso da margem da operação (%);

$FE_{c,y}$: Fator de emissão de CO₂ na margem de construção no ano y (tCO₂/MWh);

P_c : Peso da margem da construção (%).

Segundo NFCCC (2018), em projetos de energia solar, devido à sua natureza intermitente e não despachável, os pesos atribuídos são de 0,25 na margem da construção e de 0,75 na margem da operação.

Os fatores de emissão médios de CO₂ para energia elétrica a serem utilizados em inventários têm como objetivo estimar a quantidade de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica determinada. Ele calcula a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia no Brasil (MCTI, 2023).

Portanto, é possível estimar o fator de emissão mensal e, através de uma média arredondada para baixo, encontra-se o fator de emissão propriamente dito. Neste caso, a estimativa foi feita com dados do ano de 2023. O fator de emissão foi definido em 29,55% (Quadro 6).

Quadro 6: Fator de emissão de CO₂ mensal no ano de 2023.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$FE_{c,2023}$	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467
$FE_{o,2023}$	0,2917	0,2377	0,2957	0,3403	0,2951	0,5231	0,4939	0,4190	0,3433	0,3873	0,4882	0,4273
P_c	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
P_o	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
FE_{mensal}	0,2305	0,1900	0,2335	0,2669	0,2330	0,4040	0,3821	0,3259	0,2692	0,3021	0,3778	0,3321
FE_{2023}	0,2955											

Fonte: Autora (2024).

6.2.1. CERTIFICAÇÃO DO PROJETO

Através do desenvolvimento do projeto e do cálculo de emissões evitadas de gases de efeito estufa, a empresa pode buscar uma certificação oficial para comprovar a influência do projeto na neutralidade de carbono. Diversos padrões de certificação são reconhecidos internacionalmente para projetos de energia solar fotovoltaica, destacando-se aqueles válidos para empresas privadas no Brasil:

- *International Renewable Energy Certificates (I-RECs)*: É um certificado de atributo de energia intercambiável. Fornece informações sobre a produção da eletricidade (como e onde ela foi produzida), a capacidade da instalação de produção e a fonte de energia, de modo a comprovar sua fonte renovável, conforme THE INTERNATIONAL TRACKING STANDARD FOUNDATION (2023).
- *Gold Standard, Verified Carbon Standard (VCS)*: É uma referência amplamente reconhecida para medir a eficácia de projetos climáticos e de desenvolvimento sustentável. Essa certificação garante que as iniciativas de combate às mudanças climáticas também contribuam para o bem-estar social e ambiental, segundo SUSTAINABLE CARBON (2024).

- *Climate, Community & Biodiversity Standards (CCBS)*: Este padrão oferece um quadro abrangente para abordar projetos que mitiguem as mudanças climáticas, conservem a biodiversidade e promovam o desenvolvimento comunitário, de acordo com SUSTAINABLE CARBON (2024).
- ABNT NBR ISO 14064:2007: Através da quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa, é possível validar e verificar inventários e projetos de GEE, conforme CETESB (2024b).

As certificações em projetos de neutralidade de carbono trazem diversas vantagens, tanto para o projeto, quanto para a empresa. Elas promovem a credibilidade internacional; auxiliam a empresa a cumprir requisitos ambientais e mitigar riscos regulatórios; facilitam a adaptação às mudanças climáticas e seus impactos potenciais; reduzem a vulnerabilidade operacional e financeira. Além disso, estar alinhado com as metas internacionais de sustentabilidade, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e os Acordos Climáticos Globais, fortalece a responsabilidade ambiental da empresa.

6.3. ANÁLISE FINANCEIRA

A análise financeira foi feita de modo a compreender a viabilidade econômica do projeto, levando em consideração as entradas e saídas, permitindo uma análise de retorno de investimento, uma avaliação de risco e um suporte na tomada de decisão.

A Enel Distribuição São Paulo é a empresa responsável pela distribuição e comercialização de energia elétrica na região de estudo, em São Paulo.

6.3.1. ENTRADAS

A injeção na rede, da energia gerada na UFV, é vinculada com um CNPJ, o que permite a geração de créditos para consumo desta energia em outro local. Ou seja, a energia pode ser gerada em Paulínia e consumida em um prédio administrativo ou em uma planta industrial da mesma empresa, mas em outra localidade.

Neste caso, a entrada é função da capacidade de economizar financeiramente por meio da operação da usina. Para avaliar o potencial econômico vinculado com a geração de energia, aplica-se a Equação 7, a qual leva em consideração a energia gerada e o valor da tarifa comercializadora. Conforme dados da Enel para 2022 (WEBAR, 2023), a tarifa média para consumidores de média tensão foi de R\$ 0,649 por kWh.

$$R = E_g \times T_c$$

Equação 7: Receita da energia.

Onde,

R: Receita (R\$);

E_g: Energia líquida gerada (kWh/ano);

T_c: Tarifa da comercializadora.

6.3.2. SAÍDAS

As saídas relacionadas com a usina podem ser divididas em custos de:

- Investimento inicial do projeto (CAPEX): construção da usina, mão de obra para instalação e fiscalização;

- Investimento para operação (OPEX): operação e manutenção;
- Investimento para contingências (CONT): segurança e emergência.

Para o cálculo, foram considerados os valores unitários multiplicados pela quantidade necessária na UFV. Como referência, foram utilizados orçamentos fornecidos por empresas do mercado. As empresas foram referidas apenas de forma genérica a fim de garantir sua confidencialidade e sigilo.

A operação e manutenção da UFV, segundo SHIMURA *et al.* (2016), podem apresentar valores de 0,8% a 1,2% do CAPEX. De maneira mais conservadora, atribuiu-se 1,2%, do investimento inicial, como custos do OPEX. A contingência foi definida de modo a ter uma segurança em caso de custos não previstos no projeto que, neste caso, foi de 5,0% do CAPEX.

As quantidades utilizadas para cálculo foram baseadas no sistema fotovoltaico preconcebido, conforme o Quadro 7. Ressalta-se que o valor do Watt-pico é obtido através da Equação 8. Por fim, na Tabela 2, é apresentado o detalhamento dos investimentos para o projeto.

Quadro 7: Quantidades empregadas para cálculo financeiro.

Unidades empregadas	
Área total (m ²)	38.964,54
Número total de módulos (un)	5.000
Número total de inversores (un)	16
Watt-pico total da UFV (Wp)	3.325.000,00

Fonte: Autora (2024).

$$Wp_{total} = Wp_{módulo} \times N^{\circ}total_{módulo}$$

Equação 8: Equação do watt-pico.

Onde,

Wp_{total} : Watt-pico total da UFV (Wp);

$Wp_{módulo}$: Watt-pico do módulo selecionado (Wp);

$N^{\circ}total_{módulo}$: Número total de módulos na UFV (un).

Tabela 2: Estimativa de investimentos para implantação da UFV.

Saídas		Valor unitário	Unidade	Valor total	Referência	
CAPEX	Construção	Supressão vegetal	7,00	R\$/m ²	R\$ 272.751,78	Empresa A (2024)
		Módulo	850,00	R\$/un	R\$ 4.250.000,00	Empresa B (2024)
		Inversor	80.000,00	R\$/un	R\$ 1.280.000,00	
		Cabeamento	0,05	R\$/Wp	R\$ 166.250,00	Empresa C (2024)
		Dispositivo de proteção				
	Estrutura de suporte	0,40	R\$/Wp	R\$ 1.330.000,00		
	Mão de obra	Instalação civil	2,00	R\$/Wp	R\$ 6.650.000,00	
		Instalação elétrica				
		Instalação eletromecânica				
	Fiscalização	Engenharia do proprietário	0,15	R\$/Wp	R\$ 498.750,00	
Técnico de segurança						
Fiscalização						
OPEX	Operação e manutenção	Monitoramento	1,20	%	R\$ 173.373,02	SHIMURA <i>et al.</i> (2016)
		Operação				
		Manutenção preventiva				
		Reparo				
		Corte de vegetação remanescente				
Limpeza						
CONT	Contingência	Segurança e emergência	5,00	%	R\$ 722.387,59	Autora (2024)
TOTAL					R\$ 15.343.512,39	Autora (2024)

Fonte: Autora (2024).

Além da UFV, tem-se o custo com o monitoramento de longo prazo da água subterrânea, com previsão para ocorrer uma campanha a cada cinco anos. Ressalta-se que esse custo já existiria, independente da implantação da usina solar. Para estimativa, considerou-se o programa analítico definido no Relatório Complementar do *Site* (NEWFIELDS, 2023), o qual define a necessidade de monitoramento de pesticidas organoclorados, primordialmente, além de compostos orgânicos voláteis (VOCs), compostos orgânicos semivoláteis (SVOCs) e metais. O valor foi definido em R\$ 60.000,00, com base no orçamento apresentado por um laboratório certificado (EMPRESA D, 2024). O preço total incluiu coleta das amostras, envio dos materiais e análises dos SQIs.

De modo a ter maior replicabilidade do estudo a longo prazo, foi considerado dois cenários para o cálculo do investimento, um sem inflação e outro com inflação. A inflação selecionada foi o Índice Nacional de Custo da Construção (INCC-M) da Fundação Getúlio Vargas (FGV), índice desenvolvido para monitorar a evolução dos preços de materiais, serviços e mão-de-obra no Brasil. Considerou-se os valor acumulado para os últimos 12, partindo de julho de 2024. O INCC-M médio foi de 4,42% (FGV IBRE, 2024).

6.3.3. PAYBACK DO INVESTIMENTO

O *payback* de um investimento se refere ao tempo necessário para que o montante inicial investido se iguale a receita acumulada, ou seja, que o fluxo de caixa seja nulo. No contexto de uma usina solar fotovoltaica, o *payback* é o período que leva para recuperar o investimento inicial feito. O cálculo do *payback* simples, aplicado para o estudo, é calculado através da Equação 9.

$$Payback = \frac{Inv_i}{Fluxo\ de\ caixa_{acm}}$$

Equação 9: Payback simples do investimento.

Onde,

Payback: Payback simples do investimento (anos);

Inv_i: Investimento inicial (R\$);

Fluxo de caixa_{acm}: Fluxo de caixa acumulado (R\$).

6.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE AMBIENTAL

Viabilidade ambiental é a propriedade fundamental das atividades humanas, que expressa a possibilidade de adequação frente a padrões de qualidade estabelecidos formalmente ou negociados entre as partes interessadas, levando-se em consideração a qualidade ambiental requerida (MONTAÑO; RANIERI, 2019).

A observação do conceito de viabilidade ambiental como referência para o planejamento das ações humanas causadoras de impactos sobre o meio ambiente constitui uma das necessidades mais prementes nesse sentido, inclusive para respaldar as tradicionais análises econômicas baseada em relações de custo-benefício. Metodologicamente, a análise de viabilidade ambiental deve envolver uma avaliação dos efeitos induzidos por tais ações, de modo a verificar a sua compatibilidade com a capacidade do meio em assimilar tais efeitos sem prejuízo para a produtividade dos sistemas ambientais, considerando níveis de qualidade ambiental adequados ao desenvolvimento das diferentes populações que compõem os ecossistemas (MONTAÑO; RANIERI, 2019). A partir disso é possível, também, definir ações que podem ser tomadas para reduzir os impactos negativos a níveis mais baixos.

O objetivo foi integrar os resultados ambientais, econômicos e sociais do projeto para determinar a viabilidade ambiental da usina solar fotovoltaica na área remediada. A metodologia aplicada foi o método das matrizes de interação, mais especificamente a Matriz de Leopold, a qual permite identificar os impactos diretos da implantação do empreendimento.

A matriz de Leopold original corresponde de uma listagem bidimensional, composta de indicadores versus fatores de impacto, e que permite atribuir valores de grau e de importância de impacto para cada item analisado (ALMEIDA; BASTOS, 2004) sendo uma de suas melhores características a adaptabilidade, o que deu origem a uma série de outras matrizes de avaliação de impacto ambiental (STAMM, 2003).

Neste estudo de viabilidade ambiental da UFV, utilizou-se como base as ações do empreendimento e os possíveis impactos reais de utilização da área como parque de geração de energia fotovoltaica. Para cada situação, ou célula, foram avaliados:

- Ocorrência: imediata, médio prazo ou longo prazo;
- Efeito: direto ou indireto;
- Reversibilidade: reversível ou irreversível;
- Temporalidade: permanente ou temporário.

As análises de impacto ambiental requerem a definição de dois aspectos para cada ação que pode impactar o meio ambiente. O primeiro é a definição da magnitude do impacto sobre setores específicos do meio ambiente. O termo magnitude é usado no sentido de grau, extensão ou escala (LEOPOLD *et al.*, 1971). O segundo aspecto é a ponderação do grau de importância (ou

seja, significância) da ação específica sobre o fator ambiental, no caso específico de análise (LEOPOLD *et al.*, 1971).

A importância de cada impacto ambiental específico deve incluir considerar as consequências da alteração de uma condição particular sobre outros fatores do meio ambiente (LEOPOLD *et al.*, 1971). Ao contrário da magnitude do impacto, que pode ser mais facilmente avaliada com base em fatos, a avaliação da importância do impacto geralmente será baseada no julgamento de valor do avaliador. Os valores numéricos de magnitude e importância do impacto refletem as melhores estimativas da pertinência de cada ação (LEOPOLD *et al.*, 1971).

A magnitude do impacto, sendo ela positiva ou negativa, e o grau de importância para o caso, foram classificados conforme a Tabela 3. A multiplicação entre esses dois fatores resultou no impacto ambiental da implementação daquela ação para o meio natural ou antrópico (Equação 10). Assim, o uso da matriz foi ajustado para analisar a viabilidade ambiental macro, através da avaliação do resultado dos impactos.

Tabela 3: Classificação de magnitude e importância dos impactos.

Magnitude		
1	-1	Impacto de muito baixa magnitude
2	-2	Impacto de baixa magnitude
3	-3	Impacto de média magnitude
4	-4	Impacto de alta magnitude
5	-5	Impacto de muito alta magnitude
Importância		
1		Impacto de baixa importância
2		Impacto de média importância
3		Impacto de alta importância

Fonte: Adaptado de LEOPOLD *et al.* (1971).

$$\text{Impacto} = \text{Magnitude} \times \text{Importância}$$

Equação 10: Peso do impacto.

Onde,

Impacto: Peso atribuído ao impacto (adm);

Magnitude: Magnitude atribuída ao impacto (adm);

Importância: Importância atribuída ao impacto (adm).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a aplicação da metodologia desenvolvida, correlacionando-os com os objetivos propostos para esse estudo. A análise dos resultados busca a validação das hipóteses que, no presente trabalho, trata-se da viabilidade ambiental da implementação de uma usina solar fotovoltaica na área remediada.

7.1. POTENCIAL DE GERAÇÃO

Através da simulação no *software* SAM, foi possível avaliar o potencial de geração da UFV. Para isso, foi considerado um fator de capacidade de 20% e uma performance do sistema de 83%. A energia gerada é função da configuração do sistema, sofrendo uma perda ao ser transformada de corrente contínua em corrente alternada. O Quadro 8 apresenta a geração de

energia que é capaz de ser injetada na rede em corrente alternada. O potencial de energia anual total foi de 5.832,8 MWh.

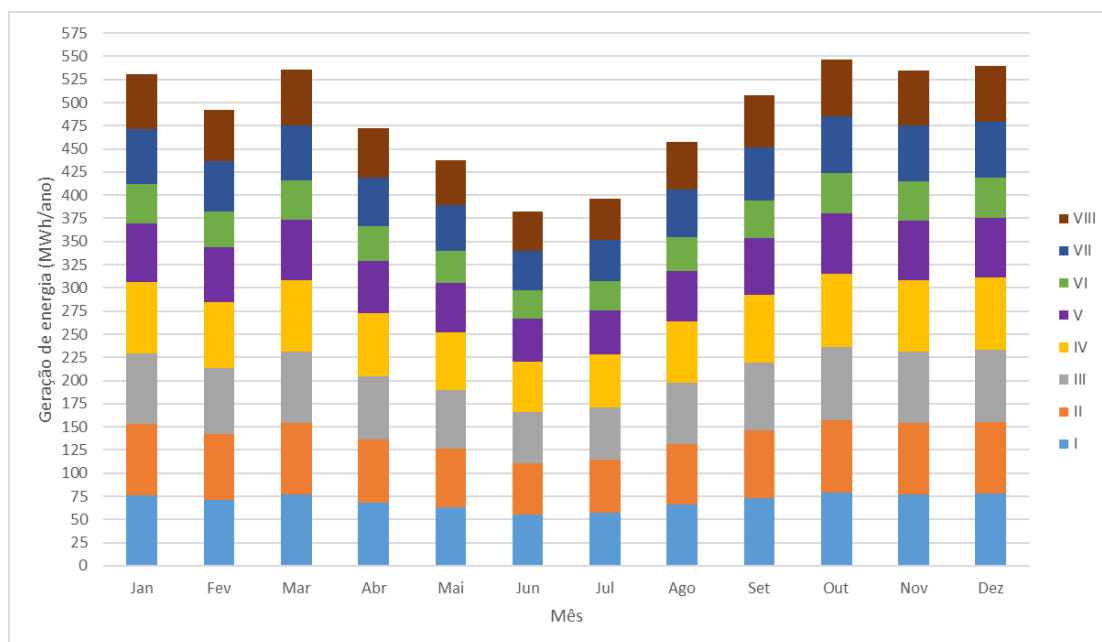
Quadro 8: Potencial anual de geração de energia por subárea.

Subárea	Geração (kWh/ano)	Geração (MWh/ano)
I	84.0781,4	840,8
II	84.0781,4	840,8
III	84.0781,4	840,8
IV	84.0781,4	840,8
V	70.0502,1	700,5
VI	46.3574,5	463,6
VII	65.2812,1	652,8
VIII	65.2812,1	652,81
TOTAL	5.832.826,4	5.832,8

Fonte: Autora (2024).

Graficamente, é possível visualizar o comportamento mensal de geração para cada subárea (Gráfico 5). Nota-se que há um maior potencial gerador nos meses mais quentes (janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro) e um menor potencial nos meses mais frios (abril, maio, junho, julho e agosto).

Gráfico 5: Geração anual de energia por subárea.

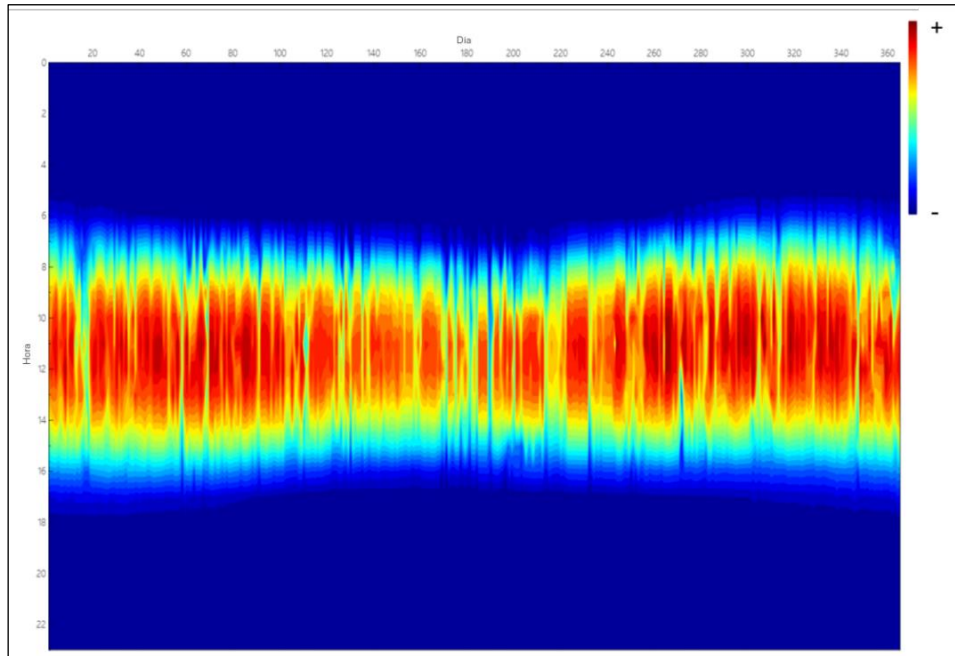


Fonte: Autora (2024).

A capacidade de gerar energia depende da radiação solar e, com base nos dados do arquivo climático, gerou-se um mapa de incidência solar horária por meio do *software* SAM (Figura 47). Percebe-se um maior potencial perto do meio-dia, com geração positiva das 6h30 até 16h, aproximadamente, e geração nula quando não há incidência de luz. Ainda, é possível notar que, no inverno (parcela central), o gradiente de geração horária é menor que no verão (parcelas laterais), o que condiz com o comportamento observado no Gráfico 5.

Ressalta-se que, quanto maior o número de módulos, maior o valor de incidência solar. Tendo em vista as subáreas de estudo, os resultados obtidos de incidência solar horário foram muito semelhantes, e a Figura 47 mostra, de maneira genérica, um dos mapas gerados no SAM.

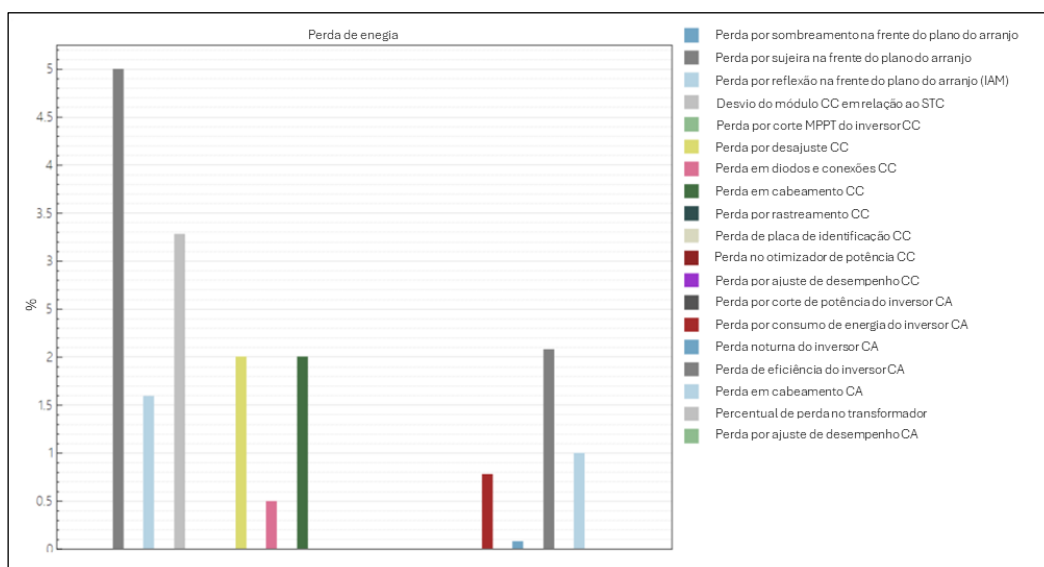
Figura 47: Incidência solar horária.



Fonte: Adaptado do software SAM.

As perdas são inevitáveis no sistema e foram anteriormente definidas para simulação. As mais expressivas foram, respectivamente, perda por sujeira dos módulos, desvio do módulo em relação às condições padrões, perda de eficiência do inversor, perda em cabeamento, perda por desajuste em corrente contínua, perda pela reflexão, além de outras menos significativas (Figura 48).

Figura 48: Perdas de energia no sistema.



Fonte: Adaptado do software SAM.

O lançamento da energia na rede elétrica gerada na usina deve ser feito na mesma frequência e tensão da rede local, a fim de garantir a compatibilidade e eficiência do sistema. Para assegurar que a energia fornecida esteja em conformidade com as especificações da rede, é necessário o emprego de uma subestação. Esta subestação é responsável por ajustar a tensão e a corrente elétrica conforme os padrões da rede, proporcionando a distribuição segura e eficiente da energia elétrica.

7.2. CUSTO SOCIAL DO CARBONO

Para avaliar o custo social do carbono, foi utilizado como base a capacidade de geração de energia de cada subárea (Quadro 8). O fator de capacidade foi definido no SAM em 20%, sendo um pouco menor do que a média dos dados anuais de 2023 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2023). Com base na metodologia, buscou-se analisar as emissões evitadas no período de dez anos, considerando nula as emissões de carbono durante a operação da usina solar.

Estima-se que, ao final do décimo ano, 17.236,00 tCO₂ deixariam de ser emitidas em caso de operação da UFV. O Quadro 9 mostra os resultados das emissões de CO₂ evitadas. Economicamente, considerando o preço de US\$ 24/tCO₂ no Brasil e, definindo a cotação do dólar em R\$ 5,00, o valor monetário economizado em dez anos com a não emissão dessa quantidade de gases de efeito estufa seria em torno de R\$ 2.068.320,24. Isso representa o custo econômico relacionado com os benefícios climáticos resultantes da emissão evitadas de CO₂.

Quadro 9: Emissões evitadas (tCO₂).

Ano	Emissão de linha de base (tCO ₂)	Emissões com o projeto (tCO ₂)	Emissões evitada (tCO ₂)
1	1.723,60	0	1.723,60
2	1.723,60	0	1.723,60
3	1.723,60	0	1.723,60
4	1.723,60	0	1.723,60
5	1.723,60	0	1.723,60
6	1.723,60	0	1.723,60
7	1.723,60	0	1.723,60
8	1.723,60	0	1.723,60
9	1.723,60	0	1.723,60
10	1.723,60	0	1.723,60
TOTAL	17.236,00	0	17.236,00

Fonte: Autora (2024).

A implementação da usina fotovoltaica abre espaço para certificação do sistema como projeto oficial de energia solar para neutralidade de carbono, pois o projeto promove se alinhar com iniciativas de descarbonização e da transição energética. Nesse sentido, a empresa é capaz de obter certificações que emergem como uma validação do seu compromisso ambiental e, também, como uma estratégia inteligente para fortalecer sua reputação no mercado e agregar valor às práticas ambientais.

7.3. DESEMPENHO FINANCEIRO

Com base nas metodologias de cálculo apresentadas, foram estimados o investimento inicial do projeto e os custos de operação e manutenção da UFV. Uma usina solar fotovoltaica

tem uma vida útil de aproximadamente 25 anos, por isso, a análise financeira foi realizada para esse período.

No primeiro ano, foi considerado que a UFV seria construída e entraria em operação, sendo definido o investimento total (CAPEX, OPEX mais CONT) como valor de saída. Para os anos subsequentes (segundo até o 25º ano), onde a usina permaneceria ativa, foram contabilizados apenas os custos de operação e contingência (OPEX mais CONT). Além disso, como os inversores tendem a ser substituídos duas vezes ao longo da vida útil da UFV, foi prevista a troca dos inversores a cada doze anos. Também foram incluídas as despesas com o monitoramento de longo prazo da água subterrânea, com uma campanha a cada cinco anos.

Apenas a partir do segundo ano foi atribuída uma receita com a operação da usina, o qual diz respeito ao potencial de economia financeira ao longo do tempo. Neste caso, a energia gerada não é comprada pela concessionária, mas sim é capaz de ser aproveitada em outra localidade, fazendo com que a empresa deixe de gastar no consumo de energia em algum de seus outros empreendimentos.

Com relação aos investimentos, foram considerados, então, dois cenários: sem inflação e com inflação do INCC-M de 4,42%. O intuito foi encontrar uma faixa de economia de modo a ampliar a replicabilidade deste estudo a longo prazo.

É importante ressaltar que não foram considerados custos referentes a tarifas de energia, pois esses tópicos exigem conhecimentos mais aprofundados de outras áreas de engenharia, que não é o foco principal deste trabalho.

O Quadro 10 (sem inflação) e Quadro 11 (com inflação do INCC-M) apresentam as entradas e saídas calculadas, bem como o fluxo de caixa e o fluxo de caixa acumulado para o período, exemplificando o início do projeto para 2025. Ainda, o Gráfico 6 (sem inflação) e Gráfico 7 (com inflação do INCC-M) ilustram a movimentação do fluxo de caixa ao longo do tempo.

Quadro 10: Fluxo de caixa do projeto em reais *sem* inflação.

Ano	Saídas				Entradas			Fluxo de caixa	Fluxo de caixa acumulado	
	UFV	Monitoramento da água subterrânea	Investimentos	Investimentos acumulado	UFV	Receitas	Receitas acumulada			
1	2025	-R\$ 15.343.512,39	R\$ -	-R\$ 15.343.512,39	-R\$ 15.343.512,39	R\$ -	R\$ -	R\$ -	-R\$ 15.343.512,39	-R\$ 15.343.512,39
2	2026	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 16.239.273,00	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 2.889.743,72	-R\$ 12.453.768,67
3	2027	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 17.135.033,61	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 7.571.008,67	R\$ 2.889.743,72	-R\$ 9.564.024,94
4	2028	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 18.030.794,22	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 11.356.513,00	R\$ 2.889.743,72	-R\$ 6.674.281,22
5	2029	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 18.986.554,83	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 15.142.017,33	R\$ 2.829.743,72	-R\$ 3.844.537,50
6	2030	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 19.882.315,44	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 18.927.521,67	R\$ 2.889.743,72	-R\$ 954.793,77
7	2031	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 20.778.076,05	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 22.713.026,00	R\$ 2.889.743,72	R\$ 1.934.949,95
8	2032	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 21.673.836,66	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 26.498.530,34	R\$ 2.889.743,72	R\$ 4.824.693,67
9	2033	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 22.569.597,27	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 30.284.034,67	R\$ 2.889.743,72	R\$ 7.714.437,40
10	2034	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 23.525.357,88	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 34.069.539,00	R\$ 2.829.743,72	R\$ 10.544.181,12
11	2035	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 24.421.118,49	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 37.855.043,34	R\$ 2.889.743,72	R\$ 13.433.924,84
12	2036	-R\$ 2.175.760,61	R\$ -	-R\$ 2.175.760,61	-R\$ 26.596.879,10	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 41.640.547,67	R\$ 1.609.743,72	R\$ 15.043.668,57
13	2037	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 27.492.639,71	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 45.426.052,00	R\$ 2.889.743,72	R\$ 17.933.412,29
14	2038	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 28.388.400,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 49.211.556,34	R\$ 2.889.743,72	R\$ 20.823.156,01
15	2039	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 29.344.160,94	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 52.997.060,67	R\$ 2.829.743,72	R\$ 23.652.899,74
16	2040	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 30.239.921,55	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 56.782.565,00	R\$ 2.889.743,72	R\$ 26.542.643,46
17	2041	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 31.135.682,16	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 60.568.069,34	R\$ 2.889.743,72	R\$ 29.432.387,18
18	2042	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 32.031.442,77	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 64.353.573,67	R\$ 2.889.743,72	R\$ 32.322.130,90
19	2043	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 32.927.203,38	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 68.139.078,00	R\$ 2.889.743,72	R\$ 35.211.874,63
20	2044	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 33.882.963,99	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 71.924.582,34	R\$ 2.829.743,72	R\$ 38.041.618,35
21	2045	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 34.778.724,60	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 75.710.086,67	R\$ 2.889.743,72	R\$ 40.931.362,07
22	2046	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 35.674.485,21	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 79.495.591,01	R\$ 2.889.743,72	R\$ 43.821.105,80
23	2047	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 36.570.245,82	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 83.281.095,34	R\$ 2.889.743,72	R\$ 46.710.849,52
24	2048	-R\$ 2.175.760,61	R\$ -	-R\$ 2.175.760,61	-R\$ 38.746.006,43	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 87.066.599,67	R\$ 1.609.743,72	R\$ 48.320.593,24
25	2049	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 39.701.767,04	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 90.852.104,01	R\$ 2.829.743,72	R\$ 51.150.336,97
TOTAL		-R\$ 39.401.767,04	-R\$ 300.000,00	-R\$ 39.701.767,04		R\$ 90.852.104,01	R\$ 90.852.104,01		R\$ 51.150.336,97	

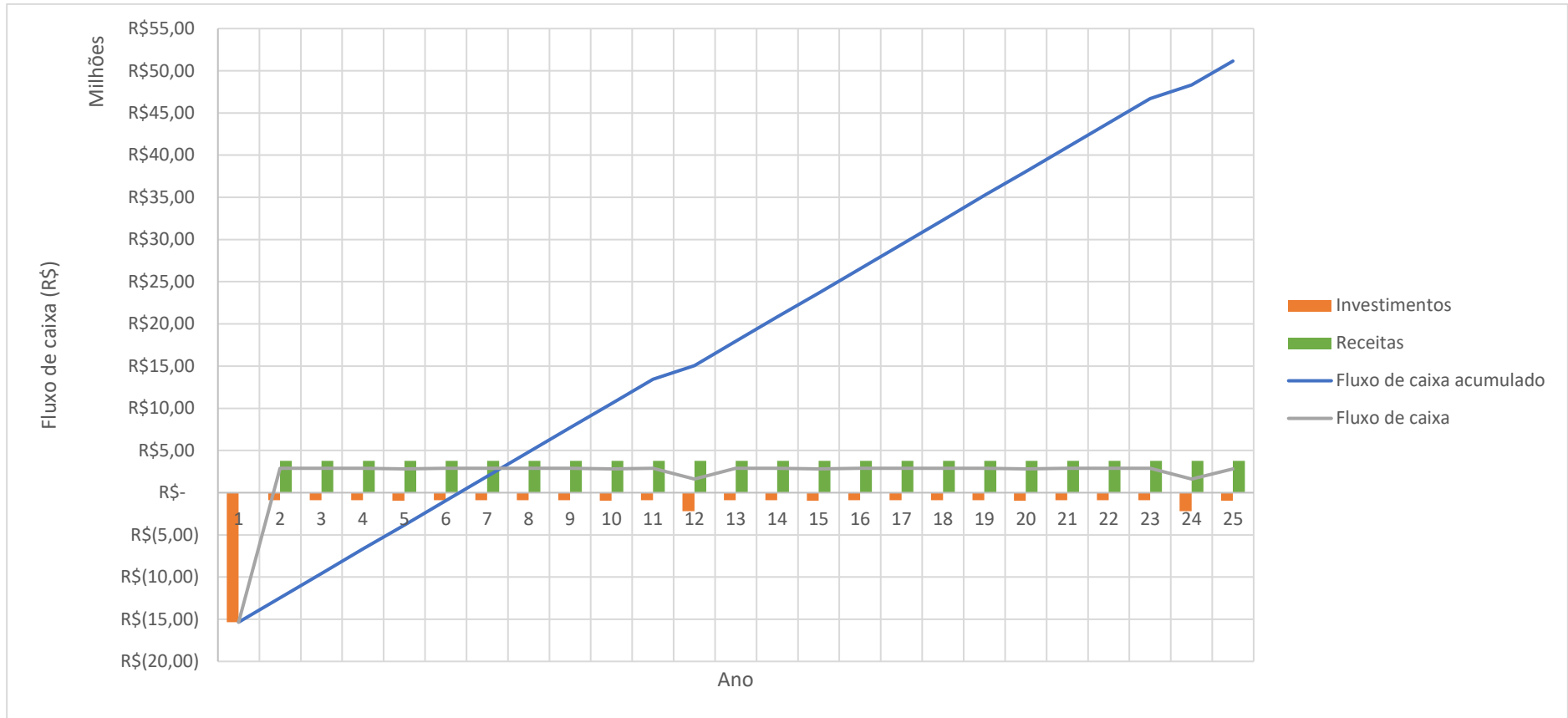
Fonte: Autora (2024).

Quadro 11: Fluxo de caixa do projeto em reais com inflação do INCC-M.

Ano	Saídas					Entradas			Fluxo de caixa	Fluxo de caixa acumulado	
	UFV	Monitoramento da água subterrânea	Investimentos	Investimentos com INCC	Investimentos acumulado	UFV	Receitas	Receitas acumulada			
1	2025	-R\$ 15.343.512,39	R\$ -	-R\$ 15.343.512,39	-R\$ 16.021.695,64	-R\$ 16.021.695,64	R\$ -	R\$ -	R\$ -	-R\$ 16.021.695,64	-R\$ 16.021.695,64
2	2026	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 16.957.048,87	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 2.850.151,10	-R\$ 13.171.544,53
3	2027	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 17.892.402,10	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 7.571.008,67	R\$ 2.850.151,10	-R\$ 10.321.393,43
4	2028	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 18.827.755,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 11.356.513,00	R\$ 2.850.151,10	-R\$ 7.471.242,33
5	2029	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 998.005,23	-R\$ 19.825.760,56	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 15.142.017,33	R\$ 2.787.499,10	-R\$ 4.683.743,22
6	2030	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 20.761.113,78	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 18.927.521,67	R\$ 2.850.151,10	-R\$ 1.833.592,12
7	2031	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 21.696.467,01	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 22.713.026,00	R\$ 2.850.151,10	R\$ 1.016.558,99
8	2032	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 22.631.820,24	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 26.498.530,34	R\$ 2.850.151,10	R\$ 3.866.710,09
9	2033	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 23.567.173,47	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 30.284.034,67	R\$ 2.850.151,10	R\$ 6.716.861,20
10	2034	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 998.005,23	-R\$ 24.565.178,70	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 34.069.539,00	R\$ 2.787.499,10	R\$ 9.504.360,30
11	2035	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 25.500.531,93	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 37.855.043,34	R\$ 2.850.151,10	R\$ 12.354.511,40
12	2036	-R\$ 2.175.760,61	R\$ -	-R\$ 2.175.760,61	-R\$ 2.271.929,23	-R\$ 27.772.461,16	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 41.640.547,67	R\$ 1.513.575,10	R\$ 13.868.086,51
13	2037	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 28.707.814,39	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 45.426.052,00	R\$ 2.850.151,10	R\$ 16.718.237,61
14	2038	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 29.643.167,62	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 49.211.556,34	R\$ 2.850.151,10	R\$ 19.568.388,72
15	2039	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 998.005,23	-R\$ 30.641.172,85	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 52.997.060,67	R\$ 2.787.499,10	R\$ 22.355.887,82
16	2040	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 31.576.526,08	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 56.782.565,00	R\$ 2.850.151,10	R\$ 25.206.038,93
17	2041	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 32.511.879,31	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 60.568.069,34	R\$ 2.850.151,10	R\$ 28.056.190,03
18	2042	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 33.447.232,54	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 64.353.573,67	R\$ 2.850.151,10	R\$ 30.906.341,13
19	2043	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 34.382.585,77	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 68.139.078,00	R\$ 2.850.151,10	R\$ 33.756.492,24
20	2044	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 998.005,23	-R\$ 35.380.591,00	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 71.924.582,34	R\$ 2.787.499,10	R\$ 36.543.991,34
21	2045	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 36.315.944,22	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 75.710.086,67	R\$ 2.850.151,10	R\$ 39.394.142,45
22	2046	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 37.251.297,45	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 79.495.591,01	R\$ 2.850.151,10	R\$ 42.244.293,55
23	2047	-R\$ 895.760,61	R\$ -	-R\$ 895.760,61	-R\$ 935.353,23	-R\$ 38.186.650,68	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 83.281.095,34	R\$ 2.850.151,10	R\$ 45.094.444,66
24	2048	-R\$ 2.175.760,61	R\$ -	-R\$ 2.175.760,61	-R\$ 2.271.929,23	-R\$ 40.458.579,91	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 87.066.599,67	R\$ 1.513.575,10	R\$ 46.608.019,76
25	2049	-R\$ 895.760,61	-R\$ 60.000,00	-R\$ 955.760,61	-R\$ 998.005,23	-R\$ 41.456.585,14	R\$ 3.785.504,33	R\$ 3.785.504,33	R\$ 90.852.104,01	R\$ 2.787.499,10	R\$ 49.395.518,86
TOTAL		-R\$ 39.401.767,04	-R\$ 300.000,00	-R\$ 39.701.767,04			R\$ 90.852.104,01	R\$ 90.852.104,01		R\$ 49.395.518,86	

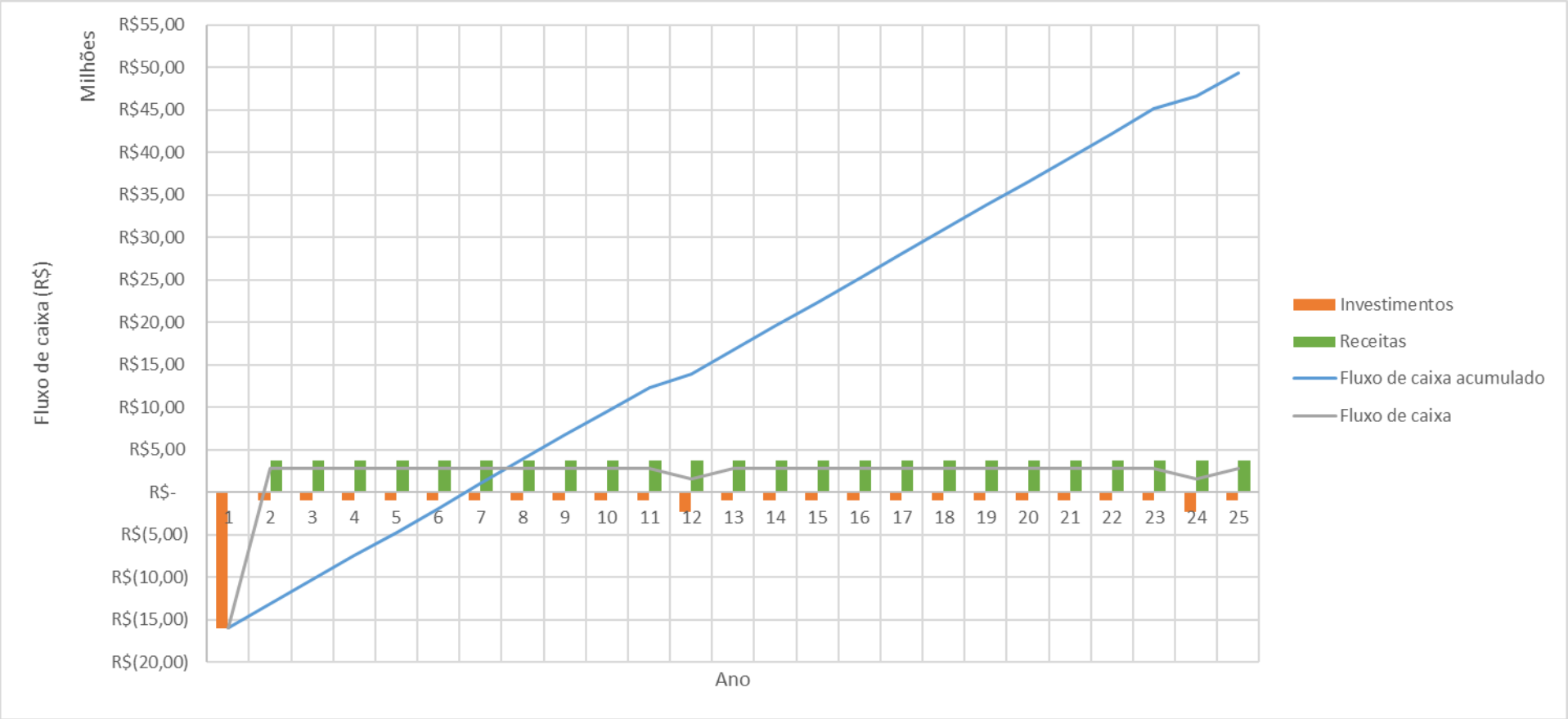
Fonte: Autora (2024).

Gráfico 6: Fluxo de caixa do projeto em milhões de reais sem inflação.



Fonte: Autora (2024).

Gráfico 7: Fluxo de caixa do projeto em milhões de reais com inflação do INCC-M.



Fonte: Autora (2024).

A simulação financeira revelou que os custos superam os lucros nos primeiros seis anos, ou seja, a UFV operaria em prejuízo neste período. Entretanto, a partir do sétimo ano, o cenário se inverte e o empreendimento começa a gerar lucro. O prazo de retorno do investimento (*payback*) foi estimado entre 6 anos e 5 meses e 6 anos e 9 meses.

Portanto, ao final dos 25 anos, o sistema mostrou um desempenho financeiro com economia total variando de R\$ 49.395.518,86 a R\$ 51.150.336,97. Isso permite concluir que, mesmo com a inflação do INCC-M, a UFV apresentou uma viabilidade financeira com retorno de investimentos. Tendo em vista a rede de monitoramento de longo prazo da água subterrânea composta por 56 poços, a receita estimada com a operação da usina solar é amplamente suficiente para cobrir as despesas necessárias do monitoramento no período de análise.

7.4. VIABILIDADE AMBIENTAL

A Matriz de Leopold foi aplicada para avaliar o impacto ambiental da implementação do projeto, levando em consideração as ações do empreendimento que foram divididas em três etapas: planejamento, implantação e operação. O impacto ambiental visa analisar as consequências de um projeto e a viabilidade ambiental determina se essas consequências são aceitáveis e manejáveis para garantir um desenvolvimento sustentável.

Com relação ao momento de divulgação do empreendimento, existe uma possibilidade de impacto positivo na economia, através da atração de investimentos e da expectativa de criação de empregos. Esse impacto é imediato, embora indireto e temporário, sendo classificado como de baixa magnitude e de média importância.

Nessa mesma etapa, destaca-se a relevância dos estudos técnicos. Eles são altamente importantes para a avaliação das zonas de impacto diretas e indiretas, bem como para o diagnóstico do meio biótico e físico. No entanto, considerando que a área já está muito antropizada, a magnitude e a importância dos estudos técnicos podem diminuir, em alguns casos, ao se avaliar os impactos sobre o meio natural. Quanto ao meio antrópico, esses estudos são essenciais para viabilizar a execução do projeto, tanto econômica quanto tecnicamente.

A fase de implementação (principalmente a mobilização de equipamentos e materiais, intensificação do tráfego, construção de infraestruturas de suporte, supressão vegetal, construção e instalação da UFV) tem potencial de impactar negativamente o meio natural, por meio de atributos de ocorrência imediata, efeito direto e respostas irreversíveis. O local, atualmente, possui poucas áreas naturais e vegetadas, com apenas uma vegetação remanescente que cresceu em meio ao concreto. A construção e instalação da usina solar, mesmo assim, são capazes de impactar a fauna e flora que, apesar da antropização da região, ainda estão presentes e ativas. Em contrapartida, os impactos negativos relacionados ao meio físico e biótico não são considerados de tão grande importância, pois a área já se encontra bastante descaracterizada de suas condições originais.

Um dos principais impactos negativos na implantação da UFV é a qualidade atmosférica, pois é sabido que as usinas solares geram resíduos e poeira durante sua construção e instalação. Esse impacto é causado de forma imediata, com efeitos diretos e irreversíveis. Contudo, esse impacto é temporário, pois está ligada somente à fase de implantação do projeto. Durante sua operação há uma substituição de carbono, com emissões evitadas de gases de efeito, impactando positivamente o meio, conforme quantificado pelo custo social de carbono (seção 7.2).

O ciclo de vida dos produtos não foi considerado na matriz, mas é importante ressaltar que, mesmo a UFV sendo uma fonte de energia renovável, a manufatura dos módulos fotovoltaicos e demais equipamentos passam por um processo produtivo poluente. A troca dos módulos fotovoltaicos a cada 25 anos traz, atualmente, uma área de estudo e um mercado em ascensão sobre a reciclagem de painéis. Portanto, ressalta-se a necessidade do descarte correto de resíduos durante a construção da UFV, bem como de equipamentos substituídos ao longo de sua vida útil.

Nesse viés, é trazido para foco a gestão ambiental da UFV a longo prazo. O planejamento adequado do empreendimento é crucial para manter a sustentabilidade do projeto, minimizando os impactos negativos, especialmente, no meio natural.

A usina do presente trabalho está localizada em uma região já industrializada e em terreno de uma antiga fábrica. A operação da UFV serve para aproveitar a área que, atualmente, não tem utilidade definida. Neste sentido, a paisagem é capaz de sofrer um impacto positivo, pois a região está concretada e não apresenta nenhuma manutenção paisagística.

Em todas as etapas do empreendimento, mas principalmente durante sua operação, são previstos aspectos positivos para a economia, com efeitos de médio e longo prazo, tanto diretos quanto indiretos. De maneira geral, a UFV gera energia renovável, possibilitando a redução de custos para a empresa, conforme avaliado financeiramente na seção 0, além de proporcionar maior estabilidade energética pela descentralização da geração de energia. O uso da energia solar contribui para ações de carbono neutro, evitando emissões de carbono e gerando economias futuras para a sociedade como um todo, conforme detalhado na seção 7.2.

O monitoramento de água subterrânea objetiva manter uma verificação contínua da eficácia das medidas de remediação implementadas, promovendo impactos positivos permanentes e de longo prazo para o meio biótico e físico, bem como para a saúde e segurança da região. A instalação de módulos fotovoltaicos, sem obstruir os poços e seus acessos, pode auxiliar nas campanhas de monitoramento, oferecendo sombra para os trabalhadores responsáveis pela amostragem.

De forma direta, a viabilidade da UFV foi avaliada quantitativamente por meio da análise de impactos com a Matriz de Leopold (Tabela 4). A classificação estabelecida considera que impactos negativos correspondem a malefícios, enquanto impactos positivos representam benefícios do empreendimento. Números maiores indicam impactos mais significativos e números menores, impactos menos significativos. Células sem valor consistem em impactos não representativos para o caso avaliado.

Tabela 4: Matriz de Leopold para o projeto da UFV.

Ações do empreendimento		Meio físico						Meio biótico				Meio antrópico			
		Qualidade da água	Qualidade atmosférica	Erosão	Deposição/Sedimentação	Arbustos	Gramíneas	Plantas aquáticas	Peixes	Qualidades da vida selvagem	Espécies raras e únicas	Camping e trilhas	Vistas cênicas e panorâmicas	Saúde e segurança	Economia
Planejamento	Divulgação do empreendimento													4	
	Estudos técnicos	12	9	3			3	3	10	10			8	15	15
Implantação	Mobilização da mão de obra												8	12	
	Mobilização de equipamentos e materiais		-15	-4					-10	-10	-5	-4	-6	8	15
	Intensificação do tráfego		-10						-8	-4		-4		4	3
	Construção de infraestrutura de suporte	-3	-6			-1	-1		-4	-4	-1	-4	6	8	12
	Supressão vegetal	-4	-10	-5	-4	-10	-10		-10	-10	-4	-5			10
	Construção e instalação da UFV	-3	-15						-5	-5	-4	-5	-8	15	15
Operação	Gestão ambiental da UFV	12	4						4	4			8	15	15
	Monitoramento da UFV												9	15	12
	Operação da UFV					-4	-4		-4	-4		6	6	15	12
	Corta de vegetação remanescente		-2	-3	-3	-4	-4		-4	-4	-4	-4			8
	Manutenção da UFV		-4						-4	-4			8	10	15
	Geração de energia		15											15	
	Monitoramento da água subterrânea	15						10	10	10	10	4	4	15	15

Classificação					
-15	-11	Impacto negativo de alta relevância	1	5	Impacto positivo de baixa relevância
-10	-6	Impacto negativo de média relevância	6	10	Impacto positivo de média relevância
-5	-1	Impacto negativo de baixa relevância	11	15	Impacto positivo de alta relevância

Fonte: Autora (2024).

O somatório dos macros impactos negativos e positivos do empreendimento, por meio da Matriz de Leopold, foi de +240. Observa-se que os impactos negativos estão principalmente relacionados com o meio físico e biótico. No entanto, a região já apresenta alto grau de antropização e baixa presença de fauna e flora nativa. Não obstante, destaca-se que, nos limites a oeste do *Site*, o bairro Recanto do Pássaros, que foi recuperado ambientalmente, pode servir como uma área de refúgio para as espécies remanescentes.

Conclui-se que os impactos positivos sobrepõem os impactos negativos. Portanto, a construção e operação da UFV na área remediada com monitoramento ativo da água subterrânea é uma opção viável ambientalmente para a área de Shell Paulínia.

8. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo estudar e compreender a viabilidade ambiental da implementação de uma usina solar fotovoltaica na área remediada de Shell Paulínia, em São Paulo, Brasil. Para atingir esse objetivo, a metodologia aplicada envolveu a avaliação do potencial de geração de energia da usina considerando as especificidades da área, a estimativa e aplicação do custo social do carbono no contexto da neutralidade de carbono, e a análise do desempenho financeiro da usina.

Com relação a área de estudo, nem toda ela pode ser utilizada para geração, pois o dreno passivo ainda está ativo e o monitoramento de longo prazo requer acesso e movimentação de pessoas especializadas para amostragem dos poços de água subterrânea. Também foi definida a fundação do tipo bloco de concreto, para não perfurar ou escavar o terreno, tendo em vista as restrições de uso do solo pelas plumas residuais de contaminação.

Foi delimitada uma área útil adequada para a geração de energia, com uma distância acessível entre os módulos. Através de simulações no *software* SAM, a UFV apresentou capacidade total de gerar 5.832,8 MWh por ano.

Em um esforço para substituição de carbono dentro do contexto do carbono neutro, em dez anos a UFV seria capaz de deixar de emitir 17.236 tCO₂. Isso por causa da geração renovável de energia em meio a matriz energética brasileira e pelo fato de usinas fotovoltaicas não serem emissoras de gases de efeito estufa durante sua operação. Monetariamente, esse custo social de carbono representa um benefício social e ambiental de R\$ 2.068.320,24, tornando o empreendimento capaz de obter certificações oficiais de projeto de neutralidade do carbono.

Na avaliação financeira, durante os 25 anos de vida útil da usina, foram considerados os investimentos com construção, operação e manutenção, e contingência da UFV, além dos custos com o monitoramento de longo prazo da água subterrânea do *Site*. A receita única é representada pela possibilidade de utilizar a energia gerada na UFV em outro local ou estabelecimento. Foram realizadas duas simulações, uma sem inflação e outra com a inflação do INCC-M de 4,42%. Assim, o *payback* do projeto variou de 6 anos e 5 meses a 6 anos e 9 meses. O potencial de economia para a empresa variou de R\$ 49.395.518,86 a R\$ 51.150.336,97 ao final do período.

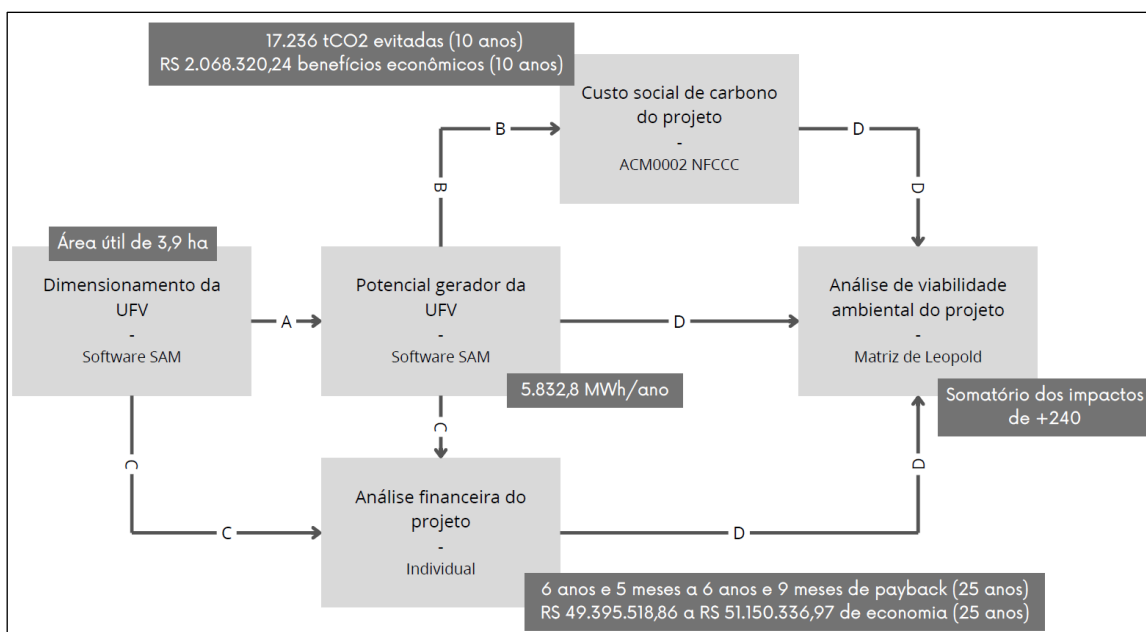
A sustentabilidade da usina solar fotovoltaica foi avaliada de forma abrangente, considerando os aspectos estudados e os resultados estimados no âmbito desta pesquisa. Para tornar a viabilidade ambiental mais tangível, foram avaliados os impactos nos meios físico, biótico e antrópico para cada etapa do projeto.

A matriz de Leopold utilizada permitiu avaliar um impacto negativo na qualidade atmosférica durante a fase de implantação do empreendimento. Esse cenário se altera quando a usina começa a operar, pois a UFV não emite GEEs durante a geração de energia. Os impactos negativos mais expressivos foram observados no meio físico e biótico, devido a ações que podem perturbar as espécies remanescentes. Entretanto, a região industrializada já foi bastante descaracterizada de suas condições naturais, o que diminui, neste caso, a relevância desses impactos. Embora poucos habitats tenham restado, o bairro Recanto dos Pássaros, que foi reabilitado, pode servir como refúgio para a vida silvestre restante no local.

Por outro lado, a economia e a infraestrutura têm grande potencial de desenvolvimento, sendo capazes de reduzir custos para a empresa e diversificar a matriz elétrica regional. Além disso, a construção da UFV aproveitaria uma área antropizada e sem utilidade, vinculando, de forma especial, a geração de energia renovável com o monitoramento da água subterrânea. O somatório total da Matriz de Leopold resultou em um valor positivo de +240.

De forma resumida, o processo metodológico desenvolvido para o projeto resultou no Fluxograma 3.

Fluxograma 3: Resultados do processo metodológico aplicado no projeto.



Fonte: Autora (2024).

Com os resultados qualitativos e quantitativo da metodologia desenvolvida no presente estudo, e levando em consideração as ponderações necessárias para aproveitamento da área estudo, conclui-se que o projeto é ambiental, social e economicamente viável. Por fim, destaca-se a importância da responsabilidade ambiental das empresas na remediação de áreas contaminadas e na utilização posterior dessas áreas, respeitando as restrições de uso do solo e priorizando projetos cada vez mais sustentáveis.

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma avaliação mais aprofundada dos aspectos financeiros, como impostos e tarifas de energia, que são obrigatoriamente empregadas na comercialização da energia solar de grande porte. Ainda, desenvolver o projeto elétrico e da subestação são necessários para execução da UFV, o que traz uma abordagem mais detalhada como sugestão para outras pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABSOLAR. **Ranking Mundial Solar**. São Paulo: ABSOLAR, 2023.
- ABSOLAR. **Entenda como funciona a energia solar fotovoltaica**. São Paulo: ABSOLAR, 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/o-que-e-energia-solar-fotovoltaica/>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- ABSOLAR; ANEEL. **Infográfico da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil (n° 70)**. São Paulo: ABSOLAR, 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 29 maio. 2024.
- ALMEIDA, J. R.; BASTOS, A. C. S. **Licenciamento Ambiental Brasileiro no Contexto da Avaliação de Impactos Ambientais**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasi, 2004.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANA. **Sistema Aquífero Aflorante, escala 1:1.000.000**. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90>>. Acesso em: 3 abr. 2024.
- ANDRADE, R. N. **Entraves e alternativas para a viabilização econômica de projetos de micro e minigeração fotovoltaica**. Trabalho Final de Graduação - Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- ANEEL. **Resolução Normativa n° 482**. Brasília, 2012.
- ANEEL. **Resolução Normativa n° 687**. Brasília, 2015.
- ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de compensação de energia elétrica**. Brasília 2016.
- ARCADIS. **Implantação do Sistema de Drenagem Passiva - Shell CISP**. 2015.
- ASQUINO, M. S. A importância da macrometrópole paulista como escala de planejamento de infraestruturas de circulação e de transporte. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 12, n. 1, p. 83, 31 maio 2010.
- BIOFLORA. **3º Relatório (Primeiro pós plantio) de acompanhamento ao TCRA 77782/2015**. 2017
- CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ROSCIO, M. A. R. **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?** Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2014.
- CEPEL. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.
- CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo: 2001.
- CETESB. **Decisão de diretoria n° 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017**. São Paulo: 2017.
- CETESB. **Ficha de Informação Toxicológica: Aldrin e Dieldrin**. São Paulo: Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Aldrin-e-Dieldrin.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2024a.

CETESB. **Ficha de Informação Toxicológica: 1,2-Dicloroetano**. São Paulo: Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/12-dicloroetano.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2024b.

CETESB. **Águas Subterrâneas - Aquífero Serra Geral**. São Paulo: CETESB, 2024. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-serra-geral/#:~:text=O%20Aq%C3%BC%C3%ADfero%20Serra%20Geral%20%C3%A9,intercala%C3%A7%C3%A3o%20com%20rochas%20mais%20perme%C3%A1veis.>>. Acesso em: 20 mar. 2024a.

CETESB. **NBR ISO 14064**. São Paulo: CETESB, 2024. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-empreendimentos/nbr-iso-14064/#:~:text=ABNT%20NBR%20ISO%2014064%3A2007%2D2%20%E2%80%93%20Detalha%20e%20orienta,plano%20e%20projetos%20de%20GEE.>>. Acesso em: 13 maio. 2024b.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 420, de 28 de Dezembro de 2009**. Brasília, 2009.

CONGRESSO NACIONAL. **Lei nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981**. Brasília, 1981.

CONGRESSO NACIONAL. **Lei nº 14.3000, de 6 de Janeiro de 2022**. Brasília, 2022.

CORREA, T. P. **Avaliação do Gerenciamento de Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo em Postos Revendedores de Combustíveis no Estado do Rio Grande Do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CORSEUIL, H. X.; ALVAREZ, P. J. J. **Implications of the presence of ethanol on intrinsic bioremediation of BTX plumes in Brazil**. New York: Hazardous Waste & Hazardous Materials, 1996. v. 13, 1996.

CPS. **Energy Storage Solutions**. Chint Power Systems, 2024. Disponível em: <<https://www.chintpowersystems.com/energy-storage/>>. Acesso em: 12 maio. 2024.

EMBRAPA; SANTOS, H. G. DOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. *E-book*.

ENGIE. **Entenda a diferença entre energia solar centralizada e distribuída**. 2022. Disponível em: <<https://www.alemdaenergia.engie.com.br/entenda-a-diferenca-entre-energia-solar-centralizada-e-distribuida/>>. Acesso em: 29 fev. 2024.

FGV IBRE. **Relatório - Índice Nacional de Custo de Construção**. Rio de Janeiro: 2024. Disponível em: <https://portalibre.fgv.br/system/files/divulgacao/noticias/mat-complementar/2024-07/INCC-M_FGV_press%20release_Jul24.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2024.

FOLSTER, A. L. A. **Potencial de Geração de Energia Solar Fotovoltaica em Lixões no Brasil**. Brasília, DF: 2019.

FRTR. **Soil Vapor Extraction**. 202?. Disponível em: <<https://www.frtr.gov/matrix/Soil-Vapor-Extraction/>>. Acesso em: 18 fev. 2024.

G1. **Inaugurada 1ª etapa de usina solar flutuante em reservatório da Bahia**. Bahia: 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2019/08/05/inaugurada-1a-etapa-de-usina-solar-flutuante-em-reservatorio-da-bahia.ghtml>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

G1. **Mais diesel, GLP e gasolina: Replan registra maior produção de derivados de petróleo em 10 anos.** Campinas: 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2024/02/05/mais-diesel-glp-e-gasolina-replan-registra-maior-producao-de-derivados-de-petroleo-em-10-anos.ghtml>>. Acesso em: 1 abr. 2024.

GALDINO, M. A. E.; OLIVIERI, M. M. de A. Considerações sobre a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes no Brasil. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, São Paulo, p. 1–7, 2016. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1807>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. Desempenho de Um Sistema Fotovoltaico em Dez Cidades Brasileiras com Diferentes Orientações do Painel. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2016.

GEOKLOCK; ROYAL HASKONING. **Informações Complementares - Estudo do Potencial Impacto de descarte das águas subterrâneas tratadas proveniente da futura barreira hidráulica no Rio Atibaia - SP/P1424/P0753/2001 CSD**. 2001.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Mapa de Potencial de Energia Fotovoltaica**. 2019. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/download/brazil>>. Acesso em: 24 dez. 2023.

GOOGLE EARTH PRO. **Imagens de satélite**. 2005.

GOOGLE EARTH PRO. **Imagens de satélite**. 2024.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei nº 997, de 31 de maio de 1976**. São Paulo: 1976.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano Estadual de Recursos Hídricos 2004 - 2007: UGRHI 05 - PIRACICABA/CAPIVARI/JUNDIAÍ**. São Paulo: 2005.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decreto nº 59.263, de 5 de junho de 2013**. São Paulo: 2013.

HANSEN, É. **Tecnologias de Remediação de Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos**. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

HAZTEC. **Remoção de Solo Impactado e Encerramento de cavas - Amostragem confirmatória**. 2009.

HCC ENERGIA SOLAR. **Controlador de carga solar: o que é e para que serve?** Santa Maria: 2023. Disponível em: <<https://hccenergiasolar.com.br/controladora-carga-solar/#:~:text=A%20fun%C3%A7%C3%A3o%20do%20controlador%20de,mesmo%20tempo%2C%20est%C3%A1%20recebendo%20carga.>>. Acesso em: 29 fev. 2024.

HIDROPLAN. **Técnicas de remediação de áreas contaminadas**. São Paulo: Blog Era da Água, 2022. Disponível em: <<https://www.hidroplan.com.br/site/blog-era-da-agua/74-tecnicas-de-remediacao-de-areas-contaminadas>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

IBGE. **Solos 1:5.000.000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15829-solos.html>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

IBGE. **Panorama das Cidades - Paulínia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/paulinia/panorama>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

ICMBIO. **Instrução Normativa ICMBIO nº 11, de 11 de Dezembro de 2014**. Brasília: 2014.

IMA. **Instrução Normativa Nº 74 Recuperação de Áreas Contaminadas**. Florianópolis: 2018.

IPCC. **Special report: Global warming of 1.5°C**. Genebra: 2018. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 1 jun. 2024.

IRENA. Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper). **International Renewable Energy Agency**, 2019.

IRENA. Renewable power generation costs in 2022. **International Renewable Energy Agency**, 2022.

IRENA. Renewable capacity statistics 2023. **International Renewable Energy Agency**, 2023.

ITRC. **Technical and Regulatory Guidance for Surfactant/Cosolvent Flushing of DNAPL Source Zones**. Interstate Technology & Regulatory Council, 2003.

LABEEE. **Arquivos Climáticos INMET**. Florianópolis: 2016. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>>. Acesso em: 30 abr. 2024.

LEHN, G. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Implantação de Usina Fotovoltaica como Uso Futuro para Recuperação de Área Degradada por Pedreira**. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

LEOPOLD, L. B. *et al.* **A procedure for evaluating environmental impact**. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1971.

LIMA, A. A. *et al.* An overview of photovoltaic energy conversion principles. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.

LIMA, C. M. DE O. **Mapeamento da irradiação solar em áreas degradadas ou perturbadas no estado de São Paulo**. Trabalho de Conclusão de Curso - Santos: Universidade Federal de São Paulo, 2021.

MACHADO, S. L. O uso de critérios do aproveitamento energético na escolha de locais para implantação de futuros aterros sanitários. **Aproveitamento Energético de Aterros Sanitários**, 2007.

MCTI. **Fator médio - Inventários corporativos**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Acesso em: 21 maio. 2024.

MELLO, G. DE. **Estudo de viabilidade econômica referente à sistemas de micro e minigeração fotovoltaica**. Trabalho de Conclusão de Curso - Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. **Mercado, física e processamento de células solares**. Metalurgia e Materiais, 2005. v. 61.

MONTAÑO, M.; RANIERI, V. E. L. **Análise de Viabilidade Ambiental de Projetos**. 2019.

NETO, L. P. DA S.; SORGATO, M. J. **Manual de Simulação de Sistemas Fotovoltaicos**. 1. ed. São Paulo: 2022.

NEWFIELDS. **Análise das Condições Pós-Escavação na Antiga Área de Lavagem de Tambores do Site Shell Paulínia (CISP) – Avaliação de Risco.** São Paulo: 2007.

NEWFIELDS. **Avaliação de Risco à Saúde Humana para a Antiga Área de Formulação Condição Pós-Escavações / Atualização Das Áreas Que Podem Vir A Requerer Controle Institucional.** São Paulo: 2011.

NEWFIELDS. **Avaliação de Risco a Saúde Humana para a Antiga Unidade de Ionol, Condição Pós-Remediação, Site Shell Paulínia – Antigo CISP.** São Paulo: 2013.

NEWFIELDS. **Relatório Complementar - Site Shell Paulínia.** São Paulo: 2023.

NEWFIELDS. **Remediação de área com descarte irregular de pesticidas.** São Paulo: 202?. Disponível em: <https://newfields.com.br/remediacao-de-area-com-descarte-irregular-de-pesticidas/?_gl=1*xr78fo*_up*MQ..*_ga*ODY2ODI0NjgwLjE3MDg1MzU1Mzc.*_ga_XMS2HEJ5M5*MTcwODUzNTUzNi4xLjAuMTcwODUzNTUzNi4wLjAuMA..>. Acesso em: 20 fev. 2024.

NFCCC. **Methodological tool: Tool to calculate the emission factor for an electricity system.** 2018.

NFCCC. **Large-scale Consolidated Methodology: Grid-connected electricity generation from renewable sources.** 2022.

ONS. **Fator de Capacidade.** Rio de Janeiro: 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/fator-capacidade.aspx>>. Acesso em: 21 maio. 2024.

PANKOW, J. F.; CHERRY, J. A. **Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and Remediation.** Portland, Oregon: Waterloo Press, 1996.

POURASL, H. H.; BARENJI, R. V.; KHOJASTEHNEZHAD, V. M. **Solar energy status in the world: A comprehensive review.** *Energy Reports.* Elsevier Ltd, 1 nov. 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723014579>>. Acesso em: 1 nov. 2023.

PROJETEEE. **Dados Climáticos: Gráfico Rosa dos Ventos.** 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/dados-climaticos/?cidade=SP-Campinas&id_cidade=bra_sp_campinas.837210_inmet>. Acesso em: 12 abr. 2024.

RICKE, K. *et al.* Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 10, p. 895–900, 1 out. 2018.

RODRIGUES, J. DE S. **Painéis fotovoltaicos em aterros sanitários: oportunidades de promoção de desenvolvimento sustentável.** Trabalho de Conclusão de Curso - Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2019.

RODRIGUES, P. S. F. *et al.* Plataforma fotovoltaica flutuante de Sobradinho (BA) - desafios e estratégias de implantação. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, São Paulo, 2020. Disponível em: <www.tcpdf.org>. Acesso em: 2 mar. 2024.

ROSIN, L. O. C. **Estudos de Casos de Remediação de Áreas Contaminadas por Derivados de Petróleo em Postos Revendedores de Combustíveis.** Trabalho de Conclusão de Curso—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

SANTOS, E.; UNGARI, H. C. N.; SANTOS, M. B. dos. **Principais técnicas de remediação e gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos no estado de São Paulo**. 2008. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) - Universidade Estadual de Campinas e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Campinas, 2008.

SEMIL. **Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**. Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=77da778c122c4ccda8a8d6babce61b6b>>. Acesso em: 26 maio. 2024

SHIMURA, S. *et al.* **Estimativa do custo de geração de usinas fotovoltaicas usando confiabilidade**. Belo Horizonte: 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/305650499>>.

SIGRH. **Divisão Hidrográfica**. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, 202?. Disponível em: <<https://sigrh.sp.gov.br/divisaohidrografica#:~:text=As%20regi%C3%B5es%20hidrogr%C3%A1ficas%20do%20Estado%20de%20S%C3%A3o%20Paulo&text=%2D%20A%20Bacia%20do%20Paran%C3%A1%2C%20que,rios%20Grande%2C%20Tiet%C3%AA%20e%20Paranapanema>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

SILVA, C. DE A. P. DA. **Estudo de eficiência das tecnologias de remediação de organoclorados - Estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA) - São Paulo: Universidade de São Paulo, 2022.

SILVA, G. S. DA; JARDIM, W. DE F. Um novo índice de qualidade das águas para proteção da vida aquática aplicado ao Rio Atibaia, região de Campinas/Paulínia-SP. **Quim. Nova**, v. 29, n. 4, p. 689–694, 2006.

SSOLAR. **Evolução das placas solares fotovoltaicas: Uma análise histórica**. São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://ssolar.com.br/evolucao-das-placas-solares-fotovoltaicas-uma-analise-historica/>>. Acesso em: 12 maio. 2024.

STAMM, H. G. **Método para avaliação de impacto ambiental (aia) em projetos de grande porte: estudo de caso de uma usina termelétrica**. Tese de doutorado - Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

SUSTAINABLE CARBON. **Padrões e Certificações de Créditos de Carbono de Alta Integridade**. Sustainable Carbon, 2024. Disponível em: <<https://sustainablecarbon.com/padroes-e-certificacao/>>. Acesso em: 13 maio. 2024.

SUTHERSAN, S. S. *et al.* **Remediation Engineering: Design Concepts**. 2. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017.

TECNOHIDRO. **Remediação De Áreas Contaminadas**. São Paulo, 202?. Disponível em: <<https://tecnohidro.com.br/servicos/remediacao-de-areas-contaminadas/>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

THE INTERNATIONAL TRACKING STANDARD FOUNDATION. **I-REC for Electricity**. The International Tracking Standard Foundation, 2023. Disponível em: <<https://www.trackingstandard.org/product-code/electricity/>>. Acesso em: 3 abr. 2024.

- TOL, R. S. J. Social cost of carbon estimates have increased over time. **Nature Climate Change**, v. 13, n. 6, p. 532–536, 1 jun. 2023.
- TRINA SOLAR. **Datasheet Vertex: Módulo Emoldurado Monocristalino (TSM-DE21)**. 2020. Disponível em: <www.trinasolar.com>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- TURNEY, D.; FTHENAKIS, V. Environmental impacts from the installation and operation of large scale solar power plants. **Journal Elsevier**, v. 15, p. 3261–3270, ago. 2011.
- TYAGI, V. V. *et al.* **Progress in solar PV technology: Research and achievement. Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier Ltd, 2013.
- USEPA. Office of Solid Waste and Emergency Response. **A Citizen's Guide to Excavation of Contaminated Soil**. Washington, D.C.: EPA, 2012.
- USEPA; NREL. **Best practices for siting solar photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills**. Washington, D.C.: EPA, 2022.
- VALERIANO, M. DE M. **TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Topodata, 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 27 maio. 2024.
- WEBAR. **Tarifa de Energia Elétrica São Paulo: Valor do kWh**. 2023. Disponível em: <<https://www.webarcondicionado.com.br/tarifa-energia-eletrica-sao-paulo#:~:text=Em%202022%2C%20a%20Enel%20Distribui%C3%A7%C3%A3o,de%20R%24%20%2C649%20por%20kWh.>>. Acesso em: 19 maio. 2024.
- ZILLES, R. *et al.* **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1. ed. São Paulo: 2012.
- ZOU, C. *et al.* The role of new energy in carbon neutral. **Petroleum Exploration and Development**, v. 48, n. 2, p. 480–491, 1 abr. 2021.