



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
CAMPUS CAJAZEIRAS – PARAÍBA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA



LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA JUNIOR

**ENTRE A FÍSICA E A SUSTENTABILIDADE: A VIABILIDADE DA ENERGIA
SOLAR FOTOVOLTAICA NO ALTO SERTÃO PARAIBANO FRENTE À CRISE
ENERGÉTICA DO SÉCULO XXI**

CAJAZEIRAS-PB

2025

LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA JUNIOR

**ENTRE A FÍSICA E A SUSTENTABILIDADE: A VIABILIDADE DA ENERGIA
SOLAR FOTOVOLTAICA NO ALTO SERTÃO PARAIBANO FRENTE À CRISE
ENERGÉTICA DO SÉCULO XXI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Unidade Acadêmica de Ciências Exatas e da
Natureza da Universidade Federal de Campina
Grande (UFCG) – Campus Cajazeiras, como
requisito final e obrigatório para obtenção do
grau de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. João Maria da Silva

CAJAZEIRAS -PB

2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação -(CIP)

S586e	Silva Júnior, Luiz Carlos Pereira da. Entre a física e a sustentabilidade: a viabilidade da energia solar fotovoltaica no alto sertão paraibano frente à crise energética do século XXI / Luiz Carlos Pereira da Silva Júnior. - Cajazeiras, 2025. 238f. : il. Color. Bibliografia. Orientador: Prof. Dr. João Maria da Silva. Monografia (Licenciatura em Física) UFCG/CFP/2025. 1.Energia solar fotovoltaica. 2.Conceitos físicos - energia solar. 3. Sertão Paraibano – geração de energia solar. 4. Usina solar - viabilidade - Centro de Formação de Professores - Universidade Federal de Campina Grande. 5. Física e sustentabilidade. I. Silva, João Maria da. II. Título. UFCG/CFP/BS CDU – 551.521.37
-------	--

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Denize Santos Saraiva Lourenço CRB/15-046

LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA JUNIOR

**ENTRE A FÍSICA E A SUSTENTABILIDADE: A VIABILIDADE DA ENERGIA
SOLAR FOTOVOLTAICA NO ALTO SERTÃO PARAIBANO FRENTE À CRISE
ENERGÉTICA DO SÉCULO XXI**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Maria da Silva, UFCG

Orientador



Documento assinado digitalmente

JOAO MARIA DA SILVA

Data: 14/05/2025 17:18:19-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leandro Luiz da Silva Pereira, UFCG

Examinador Interno



Documento assinado digitalmente

LEANDRO LUIZ DA SILVA PEREIRA

Data: 14/05/2025 19:05:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. José Tavares de Luna Neto, IFPB

Examinador Externo



Documento assinado digitalmente

JOSE TAVARES DE LUNA NETO

Data: 14/05/2025 21:10:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CAJAZEIRAS -PB

2025



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Formação de Professores
Unidade Acadêmica de Ciências Exatas e da Natureza
Campus Cajazeiras - Paraíba

FICHA DE AVALIAÇÃO FINAL DE MONOGRAFIA

Aluno: Wesley Pereira Lima

Título do Trabalho:

ENTRE A FÍSICA E A SUSTENTABILIDADE: A VIABILIDADE DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO ALTO SERTÃO PARAIBANO FRENTE À CRISE ENERGÉTICA DO SÉCULO XXI.

Orientador: Prof. Dr. João Maria da Silva

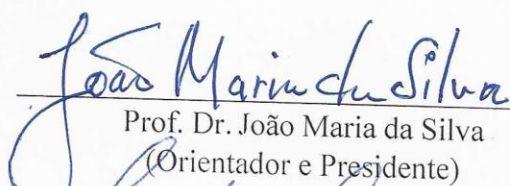
Membro 01 da Banca Examinadora: Prof. Dr. Leandro Luiz da Silva Pereira

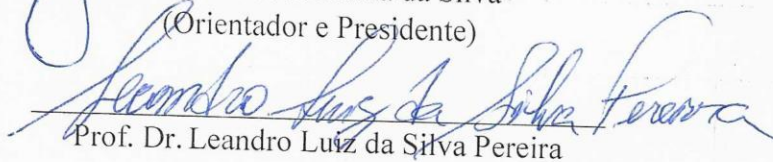
Membro 02 da Banca Examinadora: Prof. Ms. José Tavares de Luna Neto

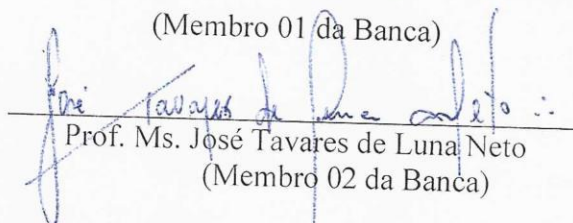
Itens avaliados	Orientador	Membro 01	Membro 02
Trabalho escrito (Nota de 0,0 a 10,0 - Peso 5)			
Apresentação oral (Nota de 0,0 a 10,0 - Peso 3)			
Desempenho na Arguição (Nota de 0,0 a 10,0 - Peso 2)			

NOTA FINAL: A nota final será calculada pela média aritmética das notas finais de cada membro da banca.

Observações: computadas as notas, observou-se que o aluno foi Aprovado com média final 9,6


Prof. Dr. João Maria da Silva
(Orientador e Presidente)


Prof. Dr. Leandro Luiz da Silva Pereira
(Membro 01 da Banca)


Prof. Ms. José Tavares de Luna Neto
(Membro 02 da Banca)

Cajazeiras/PB, 12 de maio de 2025.

Ao Luiz Carlos de 15 anos, que se viu deslumbrado com uma aula de Física sobre circuitos elétricos no 3º ano do seu ensino médio, talvez ali ele tenha encontrado o foco de sua trajetória. Ao de 19 anos, que se viu na necessidade de sair de casa para seguir seus sonhos, e assim fez. E, finalmente, ao de 26 anos, que se mostrou firme durante todo esse percurso, e que deixa um trecho de uma música que mudou sua vida:

*... Talvez não seja fácil Tirar do coração e pôr na sola do sapato
E ver que todo mundo acha que você tá errado
Ter que acreditar numa certeza que é só sua
Fazer isso virar música E seguir sempre focado
E sempre conviver com a incerteza do momento
De se lutar pra ser quem é E eu luto faz tempo
Mas é que a minha escolha é só minha E eu escolho que já é hora do voo
Que hoje o céu já fez silêncio
Eu acho tão bonito quando A gente segue um sonho E não quer mais voltar ...*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que tenho como fonte inesgotável de força e sabedoria, por ele ter iluminado meu caminho nos momentos de indecisão, por ter revigorado minha fé quando o cansaço e as dificuldades pareciam me fazer duvidar e desistir. Foi Ele quem me segurou firme e me deu forças para seguir essa caminhada até esse momento, me lembrando sempre, de todos os dias e que cada esforço valeria a pena.

À Ana Alice, minha noiva, minha companheira de vida e de jornada acadêmica. O destino nos uniu não apenas no amor, mas também no sonho de sermos físicos (E que sonho difícil). Compartilhamos nessa jornada muitos desafios, noites e mais noites em claro de estudo, provas difíceis, momentos que pensamos tanto em desistir desse sonho e, acima de tudo, a certeza de que juntos pudemos superar qualquer obstáculo que viesse a nossa frente. Seu apoio, paciência e incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, nesse exato momento. Que essa seja apenas a primeira de muitas conquistas que celebraremos lado a lado.

Ao meu fiel companheiro, meu Nick, que sempre esteve ao meu lado em todas as madrugadas de estudo, deitado aos meus pés como se soubesse que eu estava precisando de companhia. Muito obrigado pelo seu carinho silencioso, por nunca reclamar das madrugadas em claro e por ser meu lembrete diário de amor incondicional.

A meus pais, Luiz Carlos e Ana Cleide, por todo o amor, apoio, confiança e compreensão. Eles têm participação fundamental em minhas conquistas e sei que mesmo do jeito deles, eles têm orgulho de tudo isso que consegui realizar. Agradeço por todos os ensinamentos, desde pequeno, até o momento de hoje. Agradeço por existirem na minha vida.

A todos da minha família que sempre estiveram ao meu lado e acreditaram em mim. Aos meus colegas de sala, pois todos nós mereceremos os parabéns por toda trajetória que enfrentamos até nossa conclusão.

Ao professor João Maria da Silva, meu orientador, por toda paciência que teve comigo, por todos os ensinamentos e por acreditar no meu potencial. Seu apoio foi único e essencial para que este trabalho se tornasse realidade, e sou profundamente grato por cada momento que vivenciamos nessa etapa.

Ao professor Diego Marcelli Rocha, coordenador do nosso curso de Licenciatura em Física, por todo o apoio durante toda minha trajetória aqui, pela disponibilidade e contribuição, não só acadêmica, mas motivacional.

Ao professor Gustavo de Alencar Figueiredo, que contribuiu de maneira significativa no meu desenvolvimento na área de pesquisa e ensino. Com seu jeito empolgante de ensinar, soube nos mostrar um lado da física que não tínhamos visto antes.

Ao professor Tonires Sales, que foi o primeiro a nos incentivar a não desistir do curso, mesmo com todas as dificuldades iniciais que estávamos passando. Uma pessoa que até hoje, seis anos depois, torce por nós em nossa nova trajetória.

A professora Albaneide, que conseguiu motivar nós alunos de Física, a ficarmos encantados com uma disciplina de Química Orgânica, com seu jeito doce de ensinar nos mostrou que quando se ama o que faz, você consegue cativar outras pessoas a gostarem daquilo também.

Aos meus amigos de curso Aldislândio, Chillaver, Ramon, Luciana, Francisco Thiago, Gislânia, Wesley, Matheus Ryan, Carlos, dentre outros, que se tornaram minha segunda família. Por grande parte dos bons momentos dos últimos anos e todo o apoio durante todo o curso, vocês estiveram comigo nos momentos mais difíceis, oferecendo apoio, palavras de incentivo e, claro, que boas risadas para aliviar o peso da caminhada não poderiam faltar. Agradeço por cada conversa, cada café compartilhado na cantina de Dona Peta e por nunca me deixarem esquecer que eu não estava sozinho nessa jornada.

À Aninha, que, com sua empatia e sorriso no rosto, tornou nossos dias no CA2 mais leves. Obrigado, por nos guiar quando estávamos perdidos entre os corredores e, por demonstrar, em cada gesto, o carinho e a dedicação com que faz seu trabalho. Seus pequenos atos fizeram grandes diferenças, e sua presença tornou nossa caminhada acadêmica mais acolhedora.

Agradeço de forma especial, à Francisco, carinhosamente conhecido como Baixinho, eletricitista do nosso campus, por toda a sua generosidade e disponibilidade ao longo da construção desse trabalho. Seu conhecimento foi fundamental para o mapeamento da infraestrutura elétrica do campus, etapa fundamental para a viabilidade do projeto apresentado nesse trabalho.

Aos meus amigos de fora do curso que me apoiaram de maneira significativa Marlon Fernandes, Marcelo Augusto, Mike Albuquerque, Pablo Fabricio, Mirdenyo Myrgan, dentre outros.

Ao meu sogro Marcos e minha sogra Rubia, que me acolheram como um filho em momentos em que eu mais precisei. Sem a generosidade e a ajuda de vocês em tantos aspectos, minha caminhada com certeza teria sido muito mais difícil. Deixo aqui minha imensa gratidão

por todo o carinho, pelos conselhos e por terem feito da casa de vocês um refúgio, onde nos momentos mais desafiadores consegui me acalmar.

A toda equipe da empresa Voitz Energia, empresa que me proporcionou grandes oportunidades e me permitiu ter flexibilidade para conseguir concluir o curso.

À Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, pelo suporte em minha formação.

A todo o corpo docente do CFP, por permitir meu desenvolvimento pessoal e pelas amizades que fiz.

A todos e todas que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada, deixo aqui o meu mais sincero e profundo agradecimento. Todo esse trabalho é fruto não apenas do meu esforço individual, mas também do apoio e da inspiração que recebi de cada um de vocês por todo esse trajeto.

E por fim, a mim mesmo, por ter me mantido firme diante das adversidades, pelo esforço em cada desafio enfrentado, pela resiliência nos momentos difíceis e pela determinação em seguir em frente, mesmo quando tudo parecia que iria dar errado. Minha jornada até aqui não foi fácil, pelo contrário, foram muitas noites mal dormidas, muitas horas focado no meu objetivo, páginas e mais páginas lidas, momentos que tive que me distanciar de quem mais gostava, para seguir em frente aqui. Este trabalho representa mais do que uma etapa acadêmica, ele é a prova de que fui capaz de não desacreditar em mim mesmo e que transformei toda minha dedicação em realização.

RESUMO

Neste trabalho analisamos a evolução da matriz energética brasileira nas últimas duas décadas, enfatizando a transição para fontes sustentáveis, com foco na energia solar fotovoltaica. Trata-se de uma pesquisa aplicada, de caráter exploratório e descritivo, voltada para a compreensão e aplicação prática dos conceitos estudados. Realizamos um estudo de caso partindo de conceitos físicos fundamentais, como irradiação, radiação, radiância, coeficiente de reflexão, sombras e efeito de sombreamento, destacando sua influência na eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, foram discutidos os aspectos do efeito fotovoltaico, ressaltando sua importância e aplicações. O estudo também abordou o papel das energias renováveis na mitigação das mudanças climáticas, apresentando dados atualizados sobre a regeneração da camada de ozônio. No contexto regional, foi avaliado o potencial do Alto Sertão Paraibano para a geração de energia solar fotovoltaica. Como aplicação prática, foi elaborado um estudo de viabilidade técnica para a implantação de uma usina solar fotovoltaica no campus de Cajazeiras da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), detalhando etapas técnicas, financeiras e os benefícios ambientais, como a redução de emissões de CO₂ com a geração de energia elétrica. O estudo evidenciou o impacto que os ganhos financeiros, sustentáveis que a responsabilidade socioambiental da instituição poderão causar ao adotar uma matriz energética renovável.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica. Conceitos Físicos. Transição. Viabilidade Técnica.

ABSTRACT

This study analyzes the evolution of the Brazilian energy matrix over the past two decades, with an emphasis on the transition to sustainable sources, focusing on photovoltaic solar energy. It is an applied research project with an exploratory and descriptive character, aimed at understanding and practically applying the concepts studied. A case study was conducted based on fundamental physical concepts such as irradiation, radiation, radiance, reflection coefficient, shading, and the shadow effect, highlighting their influence on the efficiency of photovoltaic systems. Additionally, the photovoltaic effect was discussed, emphasizing its importance and applications. The study also addressed the role of renewable energy in mitigating climate change, presenting updated data on ozone layer regeneration. In the regional context, the potential of the Alto Sertão Paraibano for photovoltaic solar energy generation was evaluated. As a practical application, a technical feasibility study was carried out for the implementation of a photovoltaic solar power plant on the Cajazeiras campus of the Federal University of Campina Grande (UFCG), detailing technical and financial stages, as well as environmental benefits such as the reduction of CO₂ emissions through clean electricity generation. The study demonstrated the significant financial and environmental impacts and the potential for strengthening the institution's socio-environmental responsibility through the adoption of a renewable energy matrix.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy. Physical Concepts. Transition. Technical Feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aumento da Temperatura média global	26
Figura 2: Apresentação da contribuição nacionalmente determinada (iNDC)	32
Figura 3: Mapa solarimétrico global	33
Figura 4: Matriz elétrica nacional.....	34
Figura 5: Radiação incidente no plano horizontal no Brasil.....	35
Figura 6: Aumento da temperatura média global entre 1880 a 2024.....	42
Figura 7: Média do aumento da temperatura global entre 1981 e 2023	44
Figura 8: Média do aumento da temperatura global entre 2023 e 2025	45
Figura 9: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 1979	46
Figura 10: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 1985	47
Figura 11: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 1997	48
Figura 12: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 2006.....	50
Figura 13: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 2024.....	51
Figura 14: Projeção esquemática do efeito estufa da Terra	52
Figura 15: Aumento do preço do petróleo após a crise de 1973	56
Figura 16: Aumento do consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos 20 anos	58
Figura 17: Projeção da expansão da fonte solar fotovoltaica na matriz nacional até 2034	61
Figura 18: Expansão em capacidade de energia da MMD na matriz nacional até 2034	62
Figura 19: Esquema de funcionamento do Efeito Fotovoltaico	64
Figura 20: Esquema do fenômeno da Energia dos Fótons vs. Corrente Gerada.....	65
Figura 21: Esquema de funcionamento dos componentes da radiação solar.....	66
Figura 22: Distribuição espectral da Radiação de Corpo Negro (Lei de Planck).....	68
Figura 23: Atenuação da irradiância solar incidente a diferentes condições atmosféricas	71
Figura 24: Resultante das componentes da Irradiação Solar	73
Figura 25: Esquema da redução da potência pelos níveis de sombreamento	76
Figura 26: Curvas características de um modulo fotovoltaico.....	77
Figura 27: Matriz Elétrica Nacional atual em 2025.....	81
Figura 28: Representação do Sistema Interligado Nacional (SIN).....	82

Figura 29: Matriz Elétrica Nacional Conectado ao SIN, atualizada em abril 2025.....	84
Figura 30: Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil de 2013 a 2025	86
Figura 31: Matriz Elétrica Brasileira em 2018	87
Figura 32: Matriz Elétrica Nacional em março de 2025.....	88
Figura 33: Geração Distribuída Solar no Brasil por Classe de Consumo.....	92
Figura 34: Mapa solarimétrico global, índices de irradiação.....	94
Figura 35: Irradiação global no plano horizontal no Brasil.....	95
Figura 36: Estatísticas de índices de irradiação GHI e PVOU no Brasil.....	95
Figura 37: Área demográfica do “cinturão solar”.....	97
Figura 38: Irradiação Solar no Plano Horizontal para UFCG campus Cajazeiras	98
Figura 39: Irradiação Solar no Plano Inclinado para UFCG campus Cajazeiras	99
Figura 40: Irradiação Solar no Plano Inclinado de ângulo igual a latitude, para UFCG campus Cajazeiras	101
Figura 41: Localização das estações SONDA	103
Figura 42: Mapa da base de dados solarimétricos do LABREN	104
Figura 43: Dados de irradiação para o Estado da Paraíba, LABREN	104
Figura 44: Registros de Identificação (ID) dentro da cidade de Cajazeiras-PB, LABREN	105
Figura 45: Quantidade de Registros no estado da Paraíba, LABREN.....	106
Figura 46: Índices de Irradiação no Plano Inclinado para o ID 46048 – Cajazeiras-PB, LABREN	106
Figura 47: Cubículo de Medição e Proteção do CFP	110
Figura 48: Disjuntor de Média Tensão do cubículo.....	111
Figura 49: Relé de Proteção da malha elétrica do CFP	112
Figura 50: Bypass do Relé de Proteção	113
Figura 51: Vista aérea e distribuição dos Transformadores do CFP	114
Figura 52: Vista aérea das áreas disponíveis para instalação dos painéis fotovoltaicos, CFP	116
Figura 53: Drone utilizado para captura das imagens aéreas do CFP.....	118
Figura 54: Mapa de projeção 2D gerada via Software a partir das imagens aéreas capturadas com o Drone	119
Figura 55: Nuvem de pontos gerada pelo DroneDeploy utilizada para modelagem 3D da UFCG	125

Figura 56: Mapas de imagens gerados pelo DroneDeploy a partir das fotos georreferenciadas da UFCG	125
Figura 57: Localização espacial georreferenciada de cada foto utilizada para modelagem 3D da UFCG	126
Figura 58: Visualização em 2D (ortofoto) da área modelada no campus da UFCG.....	127
Figura 59: Níveis de elevação das edificações e árvores da UFCG	128
Figura 60: Modelo 3D gerado pelo DroneDeploy exibindo as superfícies da UFCG, 01	129
Figura 61: Modelo 3D gerado pelo DroneDeploy exibindo as superfícies da UFCG, 02	129
Figura 62: Tarifas de acordo com Modalidade Tarifaria para UC Grupo A EPB	130
Figura 63: Módulo fotovoltaico WEG WPV 550 HMM3	137
Figura 64: Inversor trifásico Huawei/WEG SUN2000-100KTL-M1	138
Figura 65: Visão aérea geral do Layout da Planta Solar Fotovoltaica no Campus da UFCG	140
Figura 66: Vista aérea detalhada 01: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG	141
Figura 67: Vista aérea detalhada 02: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG	141
Figura 68: Vista aérea detalhada 03: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG	142
Figura 69: Vista aérea detalhada 04: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG	142
Figura 70: Estimativa mensal de geração de energia da usina fotovoltaica simulada no software PV*SOL	144
Figura 71: Cálculos manuais da estimativa mensal de geração de energia da usina fotovoltaica com base nos índices de Irradiação média diários dos CRESESB	145
Figura 72: Comparativo mensal da estimativa de geração de energia: Cálculo manual (CRESESB) x Simulação PV*SOL (Meteonorm)	146
Figura 73: Valores pagos de fatura de energia pelo CPF no ano de 2024.....	156
Figura 74: Emissão de GEE do Brasil pelo setor de energia entre 1990 a 2022	168
Figura 75: Fator médio anual de emissão de dióxido de carbono (CO ₂) em ton.CO ₂ /MWh	169
Figura 76: Estimativa mensal de geração de energia da usina fotovoltaica simulada no software PV*SOL	174

Figura 77: Comparativo visual da estimativa de geração de energia: Método Empírico (CRESESB) x Simulação PV*SOL (Meteonorm)	175
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos Recursos Solares.....	74
Tabela 2: Características de Empreendimento simulados e não simulados para a ONS	85
Tabela 3: Comparativo de Estratégias para Escolha do Ângulo de Inclinação	100
Tabela 4: Médias do total diário de irradiação solar no plano inclinado – CAJAZEIRAS	107
Tabela 5: Localização e Potências dos Transformadores do CFO	114
Tabela 6: Média de consumo Ponta e Fora Ponta de janeiro a dezembro de 2024 do CFP	121
Tabela 7: Parâmetros Técnicos do Dimensionamento da Potência Usina Solar Fotovoltaica	136
Tabela 8: Especificações Técnicas dos Equipamentos Fotovoltaicos Projetados	139
Tabela 9: Propostas comerciais de valores para implantação da usina solar no CFP	148
Tabela 10: Garantias apresentadas pelas empresas para implantação da usina solar no CFP	150
Tabela 11: Comparativo entre Tarifa de Consumo e Tarifa de Compensação com Incidência Média de ICMS – ENERGISA PB (Ano de 2024)	151
Tabela 12: Indicadores da estimativa de Economia Sobre o Consumo de Energia Ponta + Fora Ponta (Ano de 2024)	155
Tabela 13: Indicadores da estimativa de economia sobre valor total pago nas faturas mensais de energia no ano de 2024 pelo CFP	158
Tabela 14: Dados de Entrada para Cálculo do Payback Financeiro.....	160
Tabela 15: Valores do Fluxo de caixa ao longo dos 25 anos.....	162
Tabela 16: Indicadores Financeiros Obtidos.....	166
Tabela 17: Quantidades de emissão de CO ₂ baseado nos consumos do ano de 2024	170
Tabela 18: Comparativo das Emissões de CO ₂ da UFCG com e sem Usina Fotovoltaica	172

Tabela 19: Dados técnicos consolidados da simulação no PV*SOL	174
Tabela 20: Comparativo de indicadores: PV*SOL versus Método Empírico	176
Tabela 21: Indicadores Financeiros Consolidados da Usina Fotovoltaica	176
Tabela 22: Justificativas Técnicas e Comerciais para Escolha da Empresa Fornecedora	178
Tabela 23: Emissões Evitadas de CO ₂ com a Usina Solar da UFCG	179
Tabela 24: Conectividade entre as Etapas Metodológicas e os Resultados Obtidos	180

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolução da Fonte Solar em Potência Instalada (MW).....	89
Gráfico 2: Evolução da Fonte Solar em Quantidade de Sistema Conectados.....	89
Gráfico 3: Evolução da Fonte Solar em Quantidade de Consumidores no SCEE.....	90
Gráfico 4: Evolução da Fonte Solar em Potência Instalada GD (MW)	91
Gráfico 5: Comparação gráfica mensal das médias de irradiação solar: CRESESB vs LABREN.....	108
Gráfico 6: Variação no consumo mensal Ponta e Fora Ponta em 2024 do CFP	122
Gráfico 7: Histórico de consumo mensal Ponta e Fora Ponta em 2024 do CFP.....	152
Gráfico 8: Histórico de valores pagos em 2024 apenas pelo consumo mensal Ponta e Fora Ponta do CFP.....	153
Gráfico 9: Estimativa de valores que seriam compensados em 2024 no consumo mensal Ponta e Fora Ponta do CFP.....	154
Gráfico 10: Estimativa de Economia no ano de 2024 sobre consumo mensal Ponta e Fora Ponta do CFP.....	154
Gráfico 11: Estimativa de Economia no ano de 2024 sobre o valor total pago na fatura de energia elétrica do CFP.....	157
Gráfico 12: Fluxo de caixa ao longo dos 25 anos.....	166
Gráfico 13: Fluxo de caixa ao longo dos 25 anos.....	177

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

ASZ – Ângulo zenital solar aparente

BEN – Balanço Energético Nacional

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CCST – Centro de Ciência do Sistema Terrestre CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CFCs – Clorofluorcarbonetos

CFP – Centro de Formação de Professores

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária

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

DHI – Irradiância difusa horizontal (Sigla em Inglês)

DII – Irradiância Solar Difusa Inclinada (Sigla em Inglês)

DNI – Irradiância direta normal (Sigla em Inglês)

EPB – Energisa Paraíba

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FC – Fator de Correção para compensação no horário de ponta

FS – Fator Solar

GD – Geração Distribuída

GEE – Gases de Efeito Estufa

GHI – Irradiância global horizontal (Sigla em Inglês)

GISS – Instituto Goddard de Estudos Espaciais da NASA (Sigla em Inglês)

GNI – Irradiância Solar Global Normal (Sigla em Inglês)

GTI – Irradiância Solar Global Inclinada (Sigla em Inglês)

IA – Inteligência Artificial (Sigla em Inglês)

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Sigla em Inglês)

IR – Infravermelho

IRENA – Agência Internacional de Energia Renovável (Sigla em Inglês)

LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MMGD – Micro e Minigeração Distribuída

NASA – Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (Sigla em Inglês)

NDC – Contribuições Nacionalmente Determinadas (Sigla em Inglês)

NOAA – Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (Sigla em Inglês)

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU – Organização das Nações Unidas

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

POA – Irradiância Solar Global Incidente no Plano Inclinado dos Módulos FV (Sigla em Inglês)

ROI – Retorno sobre o investimento

SCEE – Sistema de Compensação de Energia Elétrica

SFM – Estrutura do Movimento (Sigla em Inglês)

SI – Sistema Internacional de Unidades SIN – Sistema Interligado Nacional

SIRENE – Sistema de Registro Nacional de Emissões

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

STC – Ensaios Padrão de Teste (Sigla em Inglês)

TE – Tarifa de energia

TIR – Taxa Interna de Retorno

TUSD – Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

UC – Unidade consumidora

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UV – Ultravioleta

VIS – Visível

VPL – Valor presente líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície receptora
q	Carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
k	Constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
h	Constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J*s)
I_{string}	Corrente da string inteira
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
I	Corrente elétrica de saída da célula
I_0	Corrente de saturação inversa do diodo
I_{ph}	Corrente gerada pela luz incidente
I_n	Corrente por módulo
$I-V$	Curva de corrente versus tensão
$P-V$	Curva de potência versus tensão
C	Custo anual médio de manutenção da usina
ρ	Densidade espectral de energia por unidade de frequência
CO_2	Dióxido de carbono
E_t	Economia com energia anual
E_1	Economia no primeiro ano
η	Eficiência do módulo
eV	Energia que um elétron ganha (ou perde)
n	Fator de idealidade do diodo

FC_t	Fluxo de caixa anual no ano t
ν	Frequência da radiação
$\int$	Integração
t_0 e t_1	Intervalo de tempo
H	Irradiação
$G_{médio}$	Irradiação solar média diária no plano inclinado
E	Irradiância
$G_{efetiva}$	Irradiância efetiva sobre o painel (em W/m ²), reduzida pela sombra
$E(t)$	Irradiância em função do tempo
CH_4	Metano
PR	Performance Ratio
T	Período analisado
$P_{máx}$	Ponto de máxima potência
W	Potência ativa
Φ	Potência ou fluxo de energia radiante incidente
kWp	Potência pico
P	Potência total
Σ	Somatório
Tr	Taxa de reajuste anual da economia
r	Taxa interna de retorno
T	Temperatura em Kelvin
V	Tensão da célula
V_{string}	Tensão total da string

m^2	Unidade de medida de área de superfície
kWh	Unidade de medida de consumo ou geração de energia (Quilowatt-hora)
J	Unidade de medida de trabalho
dt	Variação infinitesimal de tempo
c	Velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	30
3. JUSTIFICATIVA	36
4. OBJETIVOS	37
4.1 Objetivo Geral	37
4.1 Objetivos Específicos	37
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	38
5.1 Mudanças Climáticas	41
5.2 Camada De Ozônio	45
5.3 Efeito Estufa e Aquecimento Global	51
5.4 Crise Energética Mundial e Nacional	55
5.5 Transição Para Matrizes Sustentáveis	59
5.6 Conceitos Físicos Relacionados à Energia Solar	63
6. METODOLOGIA	78
6.1 Matriz Elétrica Brasileira	79
6.2 Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica No Brasil	85
6.3 Mapeamento do Potencial Energético	93
6.3.1 Análise dos Índices Energéticos Solares	93
6.4 Mapeamento do Campus	109
6.4.1 Infraestrutura Elétrica	109
6.4.2 Áreas Disponíveis para Instalação	116
6.4.3 Inspeção Aérea do Campus	117
6.4.4 Análise de Consumo de Energia Elétrica	120
6.5 Estudo de Viabilidade de Implantação de Usina Solar Fotovoltaica	124
6.5.1 Modelagem 3D via software DroneDepoly	124
6.5.2 Dimensionamento da Potência da Usina	130
6.5.3 Dimensionamento dos Equipamentos	137
6.5.4 Análise e Layout da Usina via software PV*SOL	139
6.5.5 Previsão de Geração da Usina via software PV*SOL	143
6.6 Análise do Impacto Financeiro	147
6.6.1 Investimento Inicial para Implantação	148

6.6.2 Índices de Economia no consumo de energia elétrica	150
6.6.3 Payback Financeiro (Retorno do Investimento)	159
6.7 Análise do Impacto Ambiental	167
6.7.1 Redução de Emissões de CO ₂	167
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	173
7.1 Síntese dos Resultados Obtidos	173
8. CONCLUSÕES	182
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183
10. ANEXOS	189
10.1 Relatório Completo de simulações no PV*SOL.....	189
10.2 Código em Python do gráfico da Distribuição espectral da Radiação de Corpo Negro (Lei de Planck)	231
10.3 Código em Python do gráfico da Atenuação da irradiância solar incidente a diferentes condições atmosféricas	232
10.4 Código em Python do gráfico da resultante das componentes da Irradiação Solar	233
10.5 Código em Python do gráfico do fenômeno da Energia dos Fótons vs. Corrente Gerada	234
10.6 Base de Dados para Calculos de Economia	236

1. INTRODUÇÃO

O mundo é hoje e sempre foi movido por energia, e com os avanços que o mesmo passou ao longo dos tempos, aumenta-se cada vez mais essa demanda envolvendo a energia solar fotovoltaica – como fonte principal para a energia elétrica, seja para atividades do cotidiano ou para uso industrial. Porém, grande parcela da população que faz uso diariamente desse tipo de energia – não sabe a fonte ou até mesmo não dá importância em saber qual foi sua origem. Proveniente dos debates sobre as consequências da geração de energia a partir de fontes não renováveis, o mercado energético se propôs a buscar novas soluções que minimizem os impactos ambientais (Oliveira, 2011).

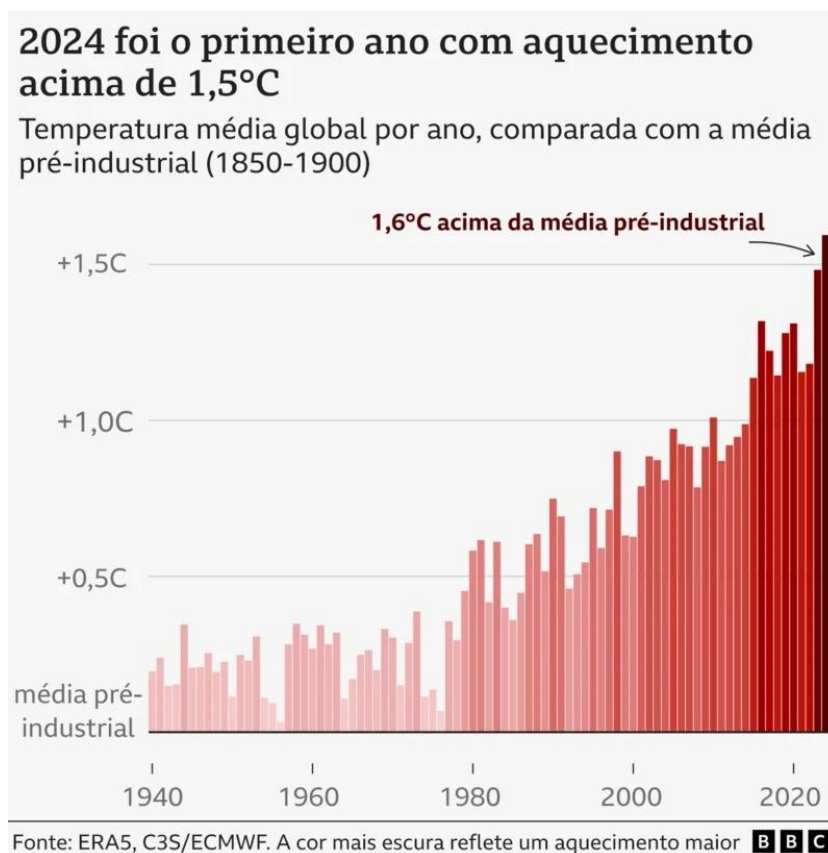
Bondarik, Pilatti e Horst (2018) apontam que, a energia se apresenta como um recurso importante para o desenvolvimento social e econômico de um país. Olhando para um contexto global, a busca por fontes de energia sustentáveis e renováveis vem ganhado cada vez mais destaque no mercado, muito decorrente das preocupações com as mudanças climáticas e a eminente necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa. Observando esse cenário, o Brasil vem se destacando como um grande produtor de energia proveniente de fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica e solar fotovoltaica.

Nesse contexto falando em mudanças climáticas, é visto que nas últimas décadas, o planeta Terra vem enfrentado um processo acelerado de aquecimento global, tendo como principal consequência segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), tais como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), os quais são provenientes da queima de combustíveis fósseis, processos industriais e elevação nos índices de desmatamento. Segundo Le Treut *et al.* (2007), uma das maiores ameaças ao equilíbrio climático da vida na Terra – é o aquecimento global, e essa consequência vem associada às atividades humanas desde o início da era industrial.

De acordo com Marengo e Bernasconi (2015), alguns impactos em grande escala como secas prolongadas, eventos climáticos atípicos, variância nos regimes das chuvas, derretimento das calotas polares, são sérias ameaças à segurança energética, hídrica e até mesmo a alimentar, e todos esses pontos tem em comum sua causa, o aumento da temperatura média do nosso planeta decorrente do aquecimento global. Tais impactos se tornam mais alarmantes quando analisamos como a temperatura média global vem evoluindo ao longo das décadas, como mostram os dados divulgados pelo *Copernicus Climate Change Service* (C3S/ECMWF), onde

por meio das análises do conjunto de reanálise climática ERAS, mostram que existe um aumento constante da temperatura média da Terra, com aumentos sucessivos sendo registrados ano após ano, conforme mostra a Figura 1 abaixo.

Figura 1: Aumento da temperatura média global.



Fonte: ERAS, C3S/ECMWF. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/czj3yem097po>>.

Acesso em 25 de março de 2025.

O relatório mais recente emitido pelo órgão, referente ao ano de 2024, apresenta que o planeta atingiu a maior média anual de temperatura desde o início das medições modernas, ultrapassando, em determinados meses, a marcação de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Diante dessa situação, atingir esse índice representa um sinal de alerta para o planeta, pois, segundo Setzer e Artaxo (2018), ultrapassar esse “limite” poderá causar efeitos climáticos irreversíveis. A Organização das Nações Unidas (ONU, 2023) também reforça a preocupação com essa situação, onde destaca a aproximação arriscada do limite estabelecido pelo Acordo de Paris, o que nos leva a uma urgente de transição para fontes de energia limpas e sustentáveis.

Diante desse cenário crítico e alarmante, se torna evidente a urgência em repensar a matriz energética global, e consequente a isso, a nacional e regional, com foco na matriz elétrica. Segundo Goldemberg (2009), a crise energética global que vem sendo marcada pelo esgotamento de fontes fósseis e pelos impactos das mudanças climáticas, vem reforçando a eminente necessidade de transição para um futuro energético mais sustentável. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022) enfatiza que, além de combater o desmatamento e as queimadas, a solução passa pela adoção de tecnologias que minimizem as emissões de gases de efeito estufa, incluindo a substituição dos combustíveis fósseis por outras fontes energéticas. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica emergiu como uma solução promissora, oferecendo benefícios ambientais, econômicos e sociais. O avanço tecnológico e a redução dos custos de instalação e manutenção tornaram essa fonte cada vez mais competitiva e acessível.

Na última década, a matriz elétrica brasileira passou por transformações bastantes significativas, onde historicamente, a mesma sempre dependeu de fontes hidrelétricas. Isso se torna um problema a partir do ponto que país tiver que enfrentar desafios relacionados a períodos de estiagem nos mananciais que abastecem essas hidrelétricas. Nessa situação, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que é a responsável por regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal, se vê com a necessidade de buscar outras fontes para suprir a necessidade de geração para atender ao crescimento da demanda. Esses fatores evidenciaram a importância de diversificar as fontes de energia elétrica, incorporando alternativas renováveis que reduzam a vulnerabilidade do sistema elétrico nacional.

É nesse contexto que se insere o presente trabalho, isto é, buscou-se mostrar as relações entre o avanço das energias renováveis e os esforços internacionais e nacionais para mitigar as mudanças climáticas, mostrando com destaque o impacto das ações humanas voltadas para diminuição do buraco na camada de ozônio. Nessa parte foi apresentada imagens de satélite recentes que mostram o cenário atual da regeneração da referida camada. A pesquisa também apresentou o desenvolvimento de fontes renováveis, tal como a energia solar fotovoltaica, está inserido em um movimento global por um planeta mais equilibrado e menos dependente de combustíveis fósseis.

Por meio da análise histórica e científica, o trabalho reforçou a importância de investimentos em energia solar fotovoltaica, voltada em regiões como o sertão da Paraíba, cuja alta incidência solar se apresenta como uma oportunidade estratégica para potencializar o impacto sustentável que essa fonte de energia pode causar no cenário a nível local. Dessa forma, foi foram conectados aspectos do conhecimento físico, ambiental e histórico em prol de um

debate necessário para o cenário energético atual e futuro.

O potencial desta pesquisa reside em refletir sobre a necessidade urgente de um futuro energético mais sustentável, considerando o cenário global, nacional e regional. Foram apresentados dados comparativos para mostrar como o cenário energético do Brasil se moldou ao longo das duas últimas décadas, isso devido à necessidade real da utilização de fontes mais sustentáveis para geração de energia elétrica. O trabalho abordou de maneira mais específica o papel da energia solar fotovoltaica como alternativa viável, tendo em vista vários parâmetros que viabilizaram a utilização dessa fonte na última década. Foi feita uma análise mais substancial para a região do alto sertão paraibano, uma área de grande potencial solar fotovoltaico que vem sendo explorada de maneira considerável.

Um ponto essencial deste Trabalho foi a abordagem aprofundada dos conceitos físicos envolvidos nos processos da energia solar fotovoltaica, descrevendo como a Física fundamenta o processo de conversão da radiação ou luz solar em energia elétrica. Dentro dessa perspectiva, foram explorados fenômenos como Irradiação, Radiação, Irradiância, Irradiação Direta e Difusa, Coeficiente de Reflexão, Efeito de Sombreamento, entre outros fenômenos, mostrando, portanto, como os mesmos impactam diretamente a eficiência dos sistemas fotovoltaicos e a importância dos mesmos para o efeito final de todo o processo.

Além da parte teórica e conceitual que foi explanada, o trabalho também apresentou o cenário atual da matriz energética e elétrica do Brasil, destacando a importância crescente da fonte solar fotovoltaica. Tais informações foram obtidas através de dados atualizados de fontes como a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) e relatórios oficiais de energia de institutos credenciados e especializados na área. Com base nessas informações, foi possível demonstrar o avanço da energia solar como alternativa viável e sustentável dentro da matriz nacional e estadual. Foram apresentados também dados reais de centro de medições de índices solares em nossa região, dados esses que são necessários para justificar o avanço que temos no cenário energético atual.

Atualmente, o Brasil já está entre os maiores geradores de energia solar fotovoltaica do mundo. Esse marco foi alcançado em 2023, fruto de grande empenho no desenvolvimento no setor dentro país. Hoje nosso país é o 6º maior gerador de energia solar fotovoltaica do mundo, como mostra relatórios da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), isso com bastante destaque para a crescente expansão de usinas e sistemas de microgeração e minigeração distribuída. No contexto regional, o trabalho buscou apresentar como nosso estado, que possui alta incidência solar, vem aproveitando esse potencial, fortalecendo a justificativa para a proposta de implantação de uma usina solar fotovoltaica no campus da UFCG, em

Cajazeiras, como solução viável e sustentável para o cenário energético atual e futuro.

A conclusão que foi apresentada nos desfechos do trabalho, é marcada pela apresentação de um estudo de viabilidade para a implantação da matriz fotovoltaica, que busca justificar todas as análises apresentadas ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, sendo as mesmas aplicadas de maneira prática e efetiva para obter resultados reais. Foram detalhadas todas as etapas necessárias para a concretização do projeto, incluindo aspectos técnicos, físicos, tecnológicos, sustentáveis, estruturais e financeiros, com o propósito de avaliar a capacidade real dessa usina em suprir a demanda energética do campus.

Além de apontar a viabilidade prática para a implantação da usina no campus, foram apresentados estudos que mostram números reais sobre a diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO₂) que a universidade deixará de lançar na atmosfera ao optar em substituir as fontes tradicionais de geração de energia elétrica, pela fonte proveniente da energia solar fotovoltaica, contribuindo assim com métricas de sustentabilidade e combate às mudanças climáticas.

A partir deste cenário, observa-se que a implantação de uma usina solar fotovoltaica no campus de Cajazeiras da UFCG pode contribuir consideravelmente para a transformação da matriz energética institucional, promovendo assim ganhos ambientais, econômicos e sustentáveis no contexto regional do sertão paraibano, a partir de uma abordagem aplicada sobre conceitos físicos fundamentais do processo fotovoltaico e suas inferências na eficiência e desempenho do sistema?

2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

Historicamente, o sistema elétrico nacional se caracterizou pelo seu fluxo de energia elétrica, provenientes de grandes usinas geradoras, como hidrelétricas, termelétricas e em menor capacidade, nucleares, indo em direção a seus consumidores finais. Esse tipo de estrutura, tem sido a base da matriz energética no Brasil e no mundo por décadas. Porém, com a crescente demanda que se observou nas últimas décadas, o interesse por fontes energéticas de menor impacto ambiental – tidas como sustentáveis – e com os consideráveis avanços tecnológicos, observou-se um aumento no desenvolvimento e implantação de matrizes sustentáveis, como exemplo podemos citar os sistemas solares fotovoltaicos de pequeno, médio e grande porte.

Para que uma matriz energética possa ser definida como sustentável, ela deve atender a algumas condições sobre durabilidade e toxidade (JACCARD, 2005). A condição sobre durabilidade refere-se à utilização de fontes energéticas renováveis, como eólica, solar e hidrelétricas, que possuem a característica de se regenerarem naturalmente e não se esgotam. A característica da toxidade está atrelada ao impacto ambiental das matrizes, sobrepondo aquelas que possuem baixos níveis de poluentes e gases de efeito estufa.

É essencial que as fontes energéticas tenham boas perspectivas de durabilidade em termos do tipo e nível de serviços que oferecem, visando mitigar os impactos negativos que exponha ao meio ambiente e à saúde da população. Diante disso, observamos que o sistema energético global predominante há mais de dois séculos, ainda não atende a tais requisitos para que suas matrizes possam ser definidas como sustentáveis, pois ainda fazem o uso – em uma parcela – de combustíveis fósseis finitos, o que provoca desequilíbrios ecológicos significativos durante seu processo de exploração e geração de energia.

De acordo com esse pensamento, a realidade da matriz energética brasileira, ainda depende em grande parte de uma só fonte, a geração hídrica, a qual, com base nos dados de março de 2025 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a fonte hídrica corresponde a 44,5% da totalidade da matriz elétrica brasileira. A afirmação que nosso país possui uma das matrizes elétricas mais "limpas" do mundo, hoje é amplamente difundida e aceita. Essa repercussão é resultado de décadas de investimentos nas grandes usinas hidrelétricas que foram construídas nos principais rios do Brasil. Segundo Garcez (2017), essa estratégia consolidou a predominância da energia hidráulica na matriz elétrica brasileira.

Atualmente, é bem conhecido que o Brasil é um grande líder mundial na utilização de fontes convencionais de energia renovável. Porém, se mudarmos um pouco de cenário e analisarmos parâmetros voltados para fontes de energias renováveis não convencionais, veremos que essas fontes tem alcançado resultados consideráveis nas últimas décadas, mostrando-se como soluções estratégicas para mitigar a dependência de combustível fóssil e das grandes usinas hidrelétrica. Todo esse movimento é impulsionado não apenas pelos ganhos ambientais, mas também pelos incentivos sociais e financeiros associados à redução dos custos de implantação e à economia na aquisição de energia elétrica. Quando falamos em descentralizar o setor elétrico nacional, vemos como alternativas de enorme potencial a energia solar fotovoltaica, eólica e de biomassa (MELO *et al.*, 2018).

Diante da abundância de recursos hídricos no Brasil, graças a sua vasta rede de rios e de planaltos favoráveis à implantação de usinas, a energia hidrelétrica ainda se apresenta como a espinha dorsal do setor de geração de energia elétrica nacional. Porém, mesmo sabendo que a utilização desse recurso é muito vantajosa no que se refere a emissão de gases de efeitos estufa, as severas estiagens nos locais onde estão instaladas as usinas hidrelétricas, colocaram em xeque a dependência do setor elétrico em relação as vulnerabilidades da hidroeletricidade, especialmente em períodos de escassez hídrica.

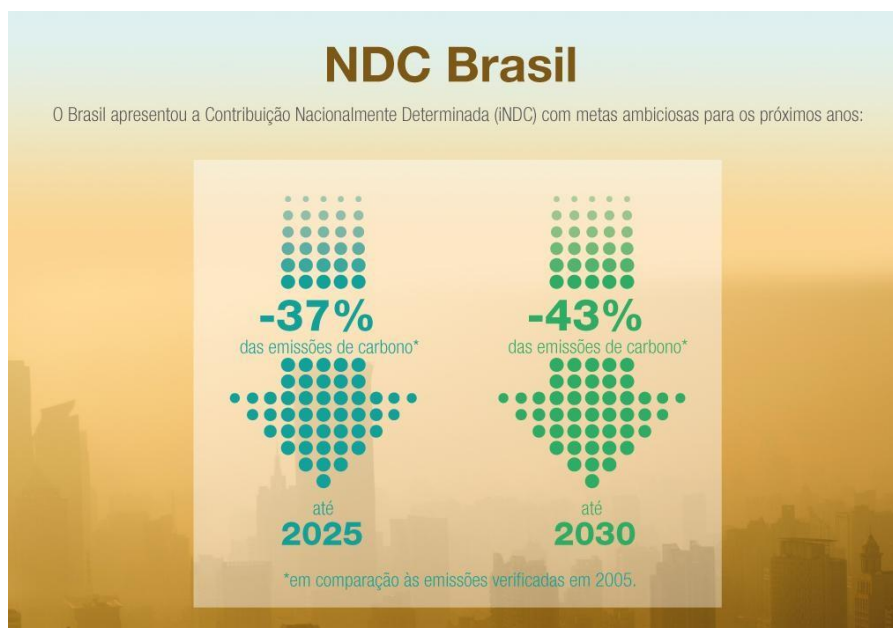
Estiagens prolongadas nos últimos anos, mostraram que com a redução drástica dos níveis dos reservatórios, a capacidade de geração em relação a demanda elétrica nacional foi comprometida, conduzindo o cenário à necessidade de acionar usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis. Essa alternativa, além de ser mais cara, proporciona o aumento da emissão de gases dos efeitos estufa (GEE), causa impactos ambientais para produção da fonte que será utilizada para geração de energia e aumenta o preço final da conta de luz da população. Segundo Texeira e Pessoa (2022):

As energias renováveis funcionam como iniciativas adaptativas às mudanças climáticas a partir de sua atuação no contexto da redução da pobreza e das vulnerabilidades. Questões estas intrinsecamente relacionadas à abordagem da adaptação, tendo em vista que este processo visa justamente antecipar os possíveis e potenciais impactos das mudanças climáticas de modo a reduzir vulnerabilidades a situações de riscos. (Texeira; Pessoa, 2022, p. 151)

Neste contexto, a diversificação da matriz elétrica nacional por meio da incorporação de fontes renováveis não convencionais, como a energia solar fotovoltaica, torna-se solução estratégica, principalmente por conta dos compromissos apresentados no Acordo de Paris nas Nações Unidas para a diminuição de gases do efeito estufa, nas chamadas Contribuições

Nacionalmente Determinadas (NDC - sigla em inglês, 2016), conforme apresenta a Figura 2 abaixo.

Figura 2: Apresentação da contribuição nacionalmente determinada (iNDC).



Fonte: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<https://autossustentavel.com/2018/11/o-meio-ambiente-com-bolsonaro.html>>. Acesso em 26 de março de 2025.

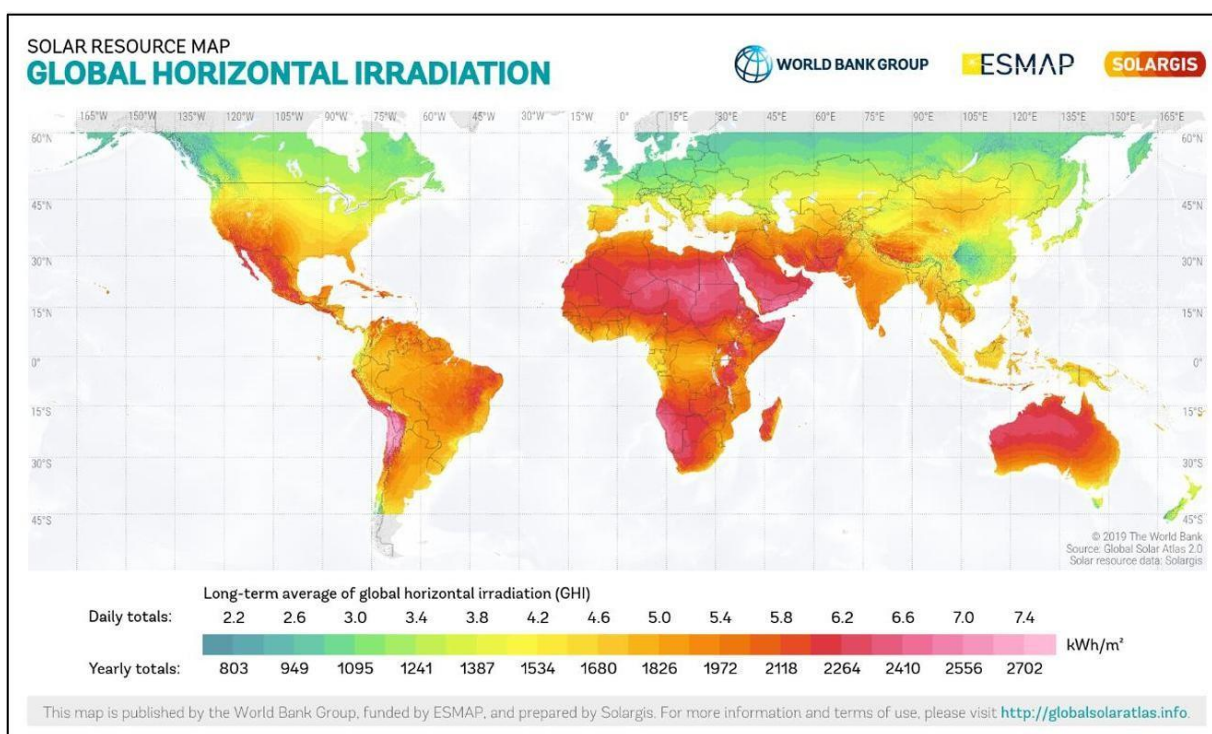
Dentre os pontos principais apresentados no documento oficial, podemos citar três que mostraram o tamanho do empenho que seria firmado em tal acordo:

- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025;
- Alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030;
- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, até 2030.

Diante dessas metas, novos projetos e investimentos foram feitos para projetar essa diversificação da matriz energética nacional, com foco na geração de energia elétrica. O Brasil por possuir um elevado potencial de irradiação solar e substanciado por alcançar as metas estabelecidas, teve grande impulso e investimentos significativos no setor de energia solar

fotovoltaica. Desse ponto de vista e analisando a perspectiva para o aproveitamento de energia solar em todo território mundial, os dados do Mapa Solarimétrico Global mostram com destaque, o potencial de radiação global incidente no plano horizontal, o que fornece subsidio para as análises de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, e de forma ainda mais significativa, sobre a Região Nordeste do país. Toda essa abundância de radiação solar que incide sobre nosso território nacional, consolida a energia solar fotovoltaica como alternativa estratégica e necessária para a diversificação da matriz energética de nosso país, como apresenta a Figura 3.

Figura 3: Mapa solarimétrico global.



Fonte: Atlas Solar Global. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em 30 de março de 2025.

Nosso país apesar de ter índices de irradiação média superior à de países líderes que se destacam na geração solar, à exemplo da Alemanha e China, se tinha apenas uma fração desse imenso potencial solar explorado. Porém, com os avanços das tecnologias e a redução de custos dos sistemas fotovoltaicos, juntamente com à crescente demanda por fontes renováveis e à necessidade cada vez mais eminente de se ter uma segurança energética, a energia solar fotovoltaica ganhou espaço na matriz elétrica nacional.

De acordo com dados publicados em relatórios de março de 2025 pela ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) e ANEEL (Agência Nacional de Energia

Elétrica), a Solar Fotovoltaica já corresponde a 22,2% da matriz elétrica nacional, sendo hoje a segunda maior fonte na geração de energia elétrica do país, conforme apresenta a Figura 4.

Figura 4: Matriz elétrica nacional.

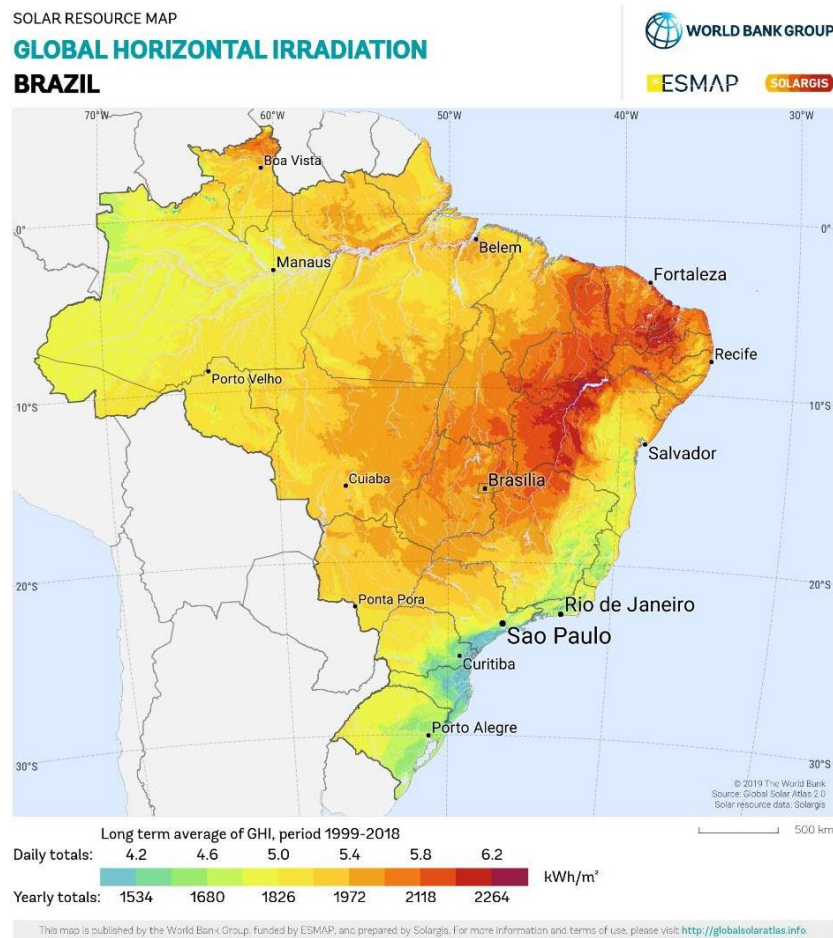


Fonte: ANEEL/ABSOLAR. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso de 15 de abril de 2025.

De acordo com Villalva e Gazoli (2012) o Sol é a nossa principal fonte de energia disponível para o planeta, sendo o mesmo responsável por processos essenciais para a manutenção da vida na Terra e também para a geração das mais diversas formas de energia utilizadas hoje. A quantidade de energia solar que incide sobre a superfície da Terra supera em algumas milhares de vezes a demanda energética mundial atual. Porém, apenas uma pequena parcela desse potencial é devidamente aproveitada (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Nesta mesma linha, Pereira *et al* (2017), reafirma essa ideia mostrando que os estados da região Nordeste do Brasil tomam posição de destaque como algumas das áreas mais viáveis e promissoras para a implantação de usinas solares fotovoltaicas no país, especialmente devido a características de alta incidência solar e ao baixo índice de nebulosidade em boa parte do ano, conforme disponibilizado pelo (INPE, 2017), conforme mostra a Figura 5 abaixo.

Figura 5: Irradiação incidente no plano horizontal no Brasil.



Fonte: Atlas Solar Global. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em 15 de abril de 2025.

Atualmente nossa matriz elétrica está muito mais diversificada que na última década, muito disso se deve a quebra de barreiras que dificultavam o crescimento dessa fonte no Brasil, foram implementadas uma série de políticas e incentivos com o intuito de promover a expansão da energia solar fotovoltaica, visando ter um mix de fontes para compor a matriz energética. Acompanhando esse processo de expansão, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2012, criou e implementou a Resolução Normativa nº 482/2012, que passou a regulamentar o uso da energia solar fotovoltaica por meio do sistema de compensação de energia elétrica, buscando incentivar a expansão da geração proveniente desse tipo de fonte.

3. JUSTIFICATIVA

Os crescentes esforços em montar a diversificação da matriz energética global, vem fomentando o mercado de energia pela procura por fontes renováveis não convencionais, tal movimento busca promover a sustentabilidade ambiental, econômica e social. Devido a suas condições climáticas muito favoráveis, o Brasil tem investido cada vez mais na fonte solar fotovoltaica como uma alternativa estratégica e viável para mitigar a dependência de fontes não renováveis, e minimizar os impactos ambientais envolvidos nos processos de geração de energia elétrica. Olhando para um cenário mais regional, o sertão paraibano se apresenta como um local estratégico para a implementação de sistemas fotovoltaicos, isso devido a sua alta incidência Solarimétrica ao longo do ano, o que favorece a captação eficiente da radiação solar, convertendo isso em um alto rendimento energético.

Com isso, todas as análises apresentadas na pesquisa, possuem fundamentação para serem aplicadas de maneira prática e efetiva para obter resultados reais. No âmbito social, a implementação de uma usina solar fotovoltaica no campus de Cajazeiras da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) se apresenta como uma oportunidade singular para alinhar a eminente necessidade de soluções energéticas sustentáveis com base em pesquisa e inovação tecnológica. Além de suprir a demanda energética da instituição, essa iniciativa pode servir como um modelo replicável para outras universidades e órgãos públicos, promovendo a divulgação do conhecimento sobre tecnologias fotovoltaicas e suas aplicações.

Ao realizarmos a integração de aspectos físicos ao modelo de projeto proposto, o trabalho não busca apenas justificar características práticas para implantação de uma usina solar fotovoltaica, mas também conceder uma compreensão aprofundada dos princípios científicos que amparam as aplicações da tecnologia fotovoltaica no atual mercado de energia. Dessa maneira, esperamos que os resultados obtidos ao final do trabalho, possam contribuir para a difusão de soluções energéticas sustentáveis e para o enriquecimento do conhecimento científico no campo da física aplicada às energias renováveis.

4. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo analisar e apresentar com detalhes, o processo de transição para uma matriz energética mais sustentável que o Brasil vem implantando nas últimas décadas, isso atrelado com a constante busca de mitigação dos impactos ambientais. Foi apresentado também, vários aspectos relacionados a impactos que essa transição trouxe, apresentando também os aspectos físicos que estão presentes no processo desse tipo de fonte de energia renovável não convencional. Este estudo abrangeu desde a avaliação do potencial Solarimétrico local, passando por todas as etapas de dimensionamento do sistema fotovoltaico, até chegar à análise dos benefícios econômicos e ambientais decorrentes da sua implantação.

4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral de trabalho, é desenvolver um estudo de viabilidade de implementação de uma usina solar fotovoltaica de geração distribuída no campus Cajazeiras da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), objetivando beneficiar todo público com a informação colhida, analisada e apresentada neste trabalho.

4.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir todas as análises apresentadas no objetivo geral, esse trabalho se propõe a cumprir os aspectos apresentados nos seguintes objetivos específicos:

1. Investigar o contexto histórico evolucionário da matriz energética nacional, considerando as fontes renováveis de geração de energia elétrica, aspectos técnicos, econômicos e impactos ambientais;
2. Reunir dados empíricos sobre energia solar na Paraíba e no local da usina de geração fotovoltaica proposta, observando as variáveis físicas envolvidas e as condições para viabilidade econômica na implantação;
3. Avaliar os impactos ambientais e econômicos na projeção da implantação da usina solar no campus da UFCG, em substituição à fonte convencional, considerando o atendimento da demanda energética atual de forma sustentável.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Goldemberg (2009), “a forma como a energia é produzida e utilizada tem profundas implicações ambientais, econômicas e sociais”, tornando-se um dos principais desafios contemporâneos da humanidade. Trazendo esse contexto para os séculos XIX e XX, temos o uso crescente do petróleo e do gás natural como principais matrizes energéticas, isso acarretou em grande processo de urbanização e expansão industrial, principalmente em países desenvolvidos. A energia tomou, então, um papel como elemento geopolítico estratégico, mediando conflitos, desigualdades e uma dependência de recursos finitos, não renováveis. Junto a isso, esse modelo energético mostrou seus limites, tanto do ponto de vista da disponibilidade de matéria prima quanto dos impactos ambientais gerados.

A emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e o aquecimento global, se intensificou diante do avanço que essa revolução trouxe, tornando urgente o debate sobre os custos sociais e ambientais do modelo energético que está atuando na época (Primavesi, 2002). Isso nos leva a pensar que a matriz elétrica atual é insustentável quando falamos a longo prazo. Além disso, fatores como a vulnerabilidade a crises geopolíticas reforçam a necessidade de diversificação e segurança energética (Goldemberg, 2009).

Quando analisamos por outra vertente, Buckeridge (2006), mostra que o termo "efeito estufa" costuma ser associado a uma ideia negativa, como se o mesmo representasse um desequilíbrio atmosférico. Porém, assim como argumenta Rodrigues (2014), o autor destaca que tal fenômeno é essencial para que exista a vida no planeta Terra. Para evidenciar sua importância, Buckeridge (2006) faz uma comparação das condições da Terra com as da Lua, utilizando tal analogia para demonstrar como o efeito estufa contribui sim, para manter a temperatura terrestre dentro de limites essenciais à vida, segundo ele:

Para se ter uma ideia da importância do efeito estufa, pode-se comparar a Terra e a Lua. Enquanto a camada de ar que envolve a Terra se mantém entre extremos aproximados de 10°C e 50°C, a Lua, que até onde sabemos não possui seres vivos, apresenta extremos de 150°C à noite e 100°C na superfície exposta ao Sol. Estas diferenças existem a despeito do fato de que ambos os corpos celestes se encontram à mesma distância do Sol. Estas diferenças existem porque a Terra possui uma camada de gases capazes de absorver parte da radiação emitida pelo Sol. De toda a radiação que chega à Terra, apenas a luz visível e parte das ondas de rádio atingem a superfície da Terra sem interferência, enquanto a luz ultravioleta é absorvida na estratosfera, provocando seu aquecimento. A energia absorvida faz com que as moléculas de certos gases vibrem, promovendo produção de calor o qual em parte acaba sendo reemitido para o espaço e em parte é responsável pela

manutenção dos sistemas vivos na superfície terrestre. Este é o efeito estufa benéfico, sem o qual a vida na Terra seria impossível. (Buckeridge, 2006, p. 1).

Buckeridge (2006) por meio de sua pesquisa, não se limita apenas a destacar os aspectos naturais e positivos do efeito estufa, mas também aponta suas consequências negativas. O autor, diz que o chamado "lado prejudicial do efeito estufa" refere-se ao crescimento acelerado e artificial de concentrações de certos gases na atmosfera terrestre, como o Clorofluorcarbono (CFC), o óxido nítrico, o ozônio e o dióxido de carbono (CO₂). Tais gases intensificam o aquecimento global, pois ao potencializarem o efeito estufa natural, resultam no aumento da temperatura média do planeta.

Fazendo uma breve analogia, caso esse crescimento acelerado de emissão de GEE para a atmosfera do planeta continue, segundo Damasio e Steffani (2007):

O planeta mais parecido com a Terra é uma lembrança dramática do que uma quantidade excessiva de efeito estufa pode causar. Trata-se de Vênus. Se não fosse pelo efeito estufa, a temperatura de Vênus seria menor que a da Terra – mesmo Vênus estando mais próximo do Sol. Porém, com o efeito estufa, a temperatura na superfície de Vênus é cerca de 470 °C. (Damasio e Steffani, 2007, p. 594).

Diante dessa reflexão, a forma como se passou a analisar os impactos ambientais das atividades humanas, especialmente na esfera de geração e consumo de energia, começou a ganhar destaque no final da década de 1980. Foi durante esse período, que uma parcela da comunidade científica, começou a emitir alertas sobre as perspectivas de que o uso contínuo de combustíveis fósseis, estariam contribuindo de forma direta para o aquecimento global, ou seja, para a elevação da temperatura média da Terra (Miller, 2008).

Nesse cenário, um novo conceito ganha força dentro do movimento, qual seja, o da transição energética. O mesmo pode ser entendido como o processo de substituição gradual das fontes não renováveis e poluentes por fontes renováveis, eficientes e ambientalmente responsáveis. A transição energética não se limita apenas à troca tecnológica, mas envolve uma reestruturação profunda das relações sociais, econômicas e ambientais relacionadas à energia. Esse movimento é impulsionado tanto por compromissos internacionais — como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU — quanto por pressões sociais e científicas que alertam para os riscos de um colapso climático caso o atual padrão de consumo se mantenha (Rogner *et al.*, 2012). Portanto, compreender a trajetória histórica da energia e os desafios atuais é essencial para fundamentar ações conscientes e sustentáveis, orientadas para um futuro energético equilibrado.

A década de 1990 e os anos seguintes marcaram o fortalecimento da agenda ambiental global e a ampliação das discussões sobre a sustentabilidade das matrizes elétricas em diferentes países. Nesse período, tornou-se evidente que os modelos tradicionais de geração de eletricidade, fortemente dependentes de fontes fósseis, precisavam ser reavaliados diante do esgotamento dos recursos naturais e dos impactos socioambientais. A crise energética da Califórnia no início dos anos 2000 e os frequentes apagões em países em desenvolvimento reforçaram a urgência de se repensar os sistemas elétricos sob a ótica da segurança, diversificação e sustentabilidade (Souza, 2020).

Segundo Junior (2008) é notório que a exploração demasiada de reservas esgotáveis de fontes energéticas, aliada aos prejuízos ambientais e impactos sociais provocados pela utilização desses recursos, cria um cenário preocupante para a sociedade já no próximo século. Nesse âmbito, instigou-se uma grande e atenciosa busca por fonte de energia alternativas, com foco em especial nas renováveis convencionais e não convencionais, tidas como “não-poluente”, a exemplo da fonte solar fotovoltaica.

Diferente das fontes convencionais baseadas em combustíveis fósseis, a energia solar fotovoltaica aproveita diretamente a radiação solar, um recurso abundante, gratuito e ambientalmente benigno. Segundo Creutzig *et al* (2017), a energia solar possui o maior potencial técnico dentre todas as fontes renováveis, sendo essencial para alcançar as metas climáticas propostas no Acordo de Paris. A sua adoção também responde às necessidades de descentralização e democratização do acesso à energia elétrica, principalmente em regiões remotas e de difícil acesso à rede tradicional.

No Brasil, a questão da matriz elétrica toma desfechos específicos devido à sua dependência histórica da hidroeletricidade. Embora essa fonte seja considerada renovável, sua vulnerabilidade a longos períodos de estiagem e os impactos ambientais decorrentes da construção de grandes usinas têm exposto fragilidades estruturais do sistema. A crise energética de 2001, por exemplo, revelou a falta de diversificação da matriz elétrica brasileira e a ausência de investimentos estratégicos em tecnologias limpas e complementares (Tolmasquim, 2016).

Diante desse panorama histórico apresentado e dos desafios decorrentes do atual modelo energético, torna-se imprescindível aprofundar a compreensão sobre os fatores que motivam a busca por soluções sustentáveis para a geração e o consumo de energia. A crise climática, os impactos ambientais provenientes da exploração de fontes fósseis, e a crescente demanda por segurança energética colocam em evidência a necessidade urgente de mudanças estruturais dentro dos processos energéticos.

Nesse contexto, é necessário abordar de maneira mais detalhada as principais

consequências ambientais do modelo energético vigente, dentre elas podemos citar as mudanças climáticas, o comprometimento da camada de ozônio e o agravamento do efeito estufa. Tais fenômenos, estão relacionados diretamente com o uso intensivo de combustíveis fósseis, e revelam a proporção e a complexidade da crise ambiental e energética que vivenciamos. Paralelamente, é necessário fazer uma análise dos contornos da crise energética mundial e nacional, que evidenciam a fragilidade das matrizes tradicionais e reforçam a urgência de uma transição para matrizes sustentáveis. Por último, para consolidar essa transição de maneira crítica e fundamentada, será feita uma discussão sobre os conceitos físicos associados à energia solar fotovoltaica, com ênfase nos mecanismos que tornam essa fonte uma alternativa promissora para o futuro energético do Brasil e do mundo.

5.1 Mudanças Climáticas

Desde o início década de 1960, questões ambientais vêm tomando um espaço cada vez mais significativo em noticiários internacionais. Esse protagonismo se justifica pelo agravamento considerável dos problemas ambientais, que têm gerado alertas em uma escala global. O aquecimento global, podemos tomar como exemplo, tem se intensificado devido ao aumento contínuo da emissão de GEE, especialmente aqueles oriundos da queima descontrolada de combustíveis fósseis, como o petróleo, em níveis superiores aos que o planeta consegue absorver. Todos os eventos citados mostram a constatação de mudanças climáticas que nosso ecossistema vem sofrendo.

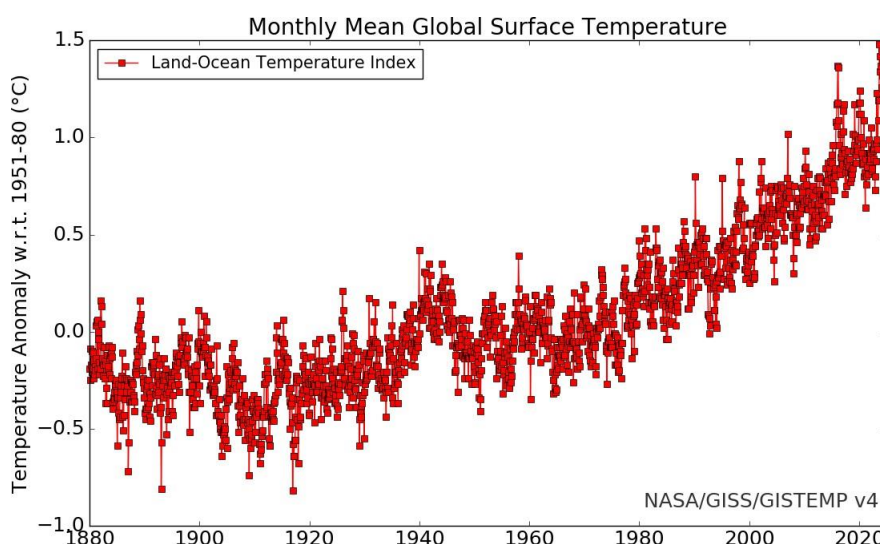
Os efeitos das mudanças climáticas vão muito além do puro aumento de temperatura média do planeta. Suas consequências à crise climática possuem dimensões globais e está sendo cada vez mais comum e frequente nos depararmos com notícias de eventos não convencionais que ocorrem ao redor do planeta: derretimento das geleiras, alterações na precipitação, circulação atmosférica, eventos climáticos extremos, aumento do nível do mar, entre outros. Todos esses pontos citados possuem seus impactos ligados fortemente ao nosso sistema socioeconômico (Artaxo, 2020), tendo como agravantes a rápida globalização e a super população, juntamente com a falta de políticas públicas efetivas.

Os impactos das ações humanas sobre o meio ambiente tornaram-se cada vez mais evidentes nas últimas décadas, especialmente no que se refere às alterações climáticas. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a ação antrópica é considerada uma das, ou se não, a principal causa do aquecimento global observado nas últimas décadas. O

Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (2014) aponta que a temperatura média do nosso planeta aumentou cerca de $0,85^{\circ}\text{C}$ entre os anos de 1880 e 2012, revelando uma tendência preocupante de elevação térmica global. Essa elevação está diretamente associada à emissão de GEE oriundos da queima de combustíveis fósseis, do desmatamento e de processos industriais, que intensificam o desequilíbrio energético do planeta. Além desse aumento da temperatura média global, é possível observar que esse aquecimento não ocorre de forma homogênea. Diversas regiões do mundo já apresentam aquecimentos em escala regional mais elevada. De acordo com os dados do IPCC (2014), entre 20% e 40% da população mundial já vive em regiões onde foi registrado um aumento superior a $1,5^{\circ}\text{C}$ em pelo menos uma das quatro estações do ano, dependendo do conjunto de dados utilizado na análise.

Essa disparidade regional no aquecimento acentua os riscos associados às mudanças climáticas, afetando padrões de precipitação, aumentando a frequência de eventos extremos e comprometendo diretamente a segurança energética de milhões de pessoas. Tais impactos se tornam mais alarmantes quando analisamos como a temperatura média global vem evoluindo ao longo das décadas, como mostram os dados de *Instituto Goddard de Estudos Espaciais (GISS)* da NASA, onde é apresentado que existe sim, um aumento constante da temperatura média da Terra, com aumentos sucessivos sendo registrados ano após ano, as próximas imagens irão justificar esse aumento gradativo, baseado em dados coletados a partir de estações de monitoramento do clima na Terra.

Figura 6: Aumento da temperatura média global entre 1880 a 2024.



Fonte: NASA. Temperatura global. Disponível em: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/>. Acesso em

05 de abril de 2025.

A Figura 6 apresenta esse constante aumento da temperatura média global, onde nos últimos séculos, o crescimento urbano e o aumento acelerado da exploração dos recursos naturais causaram uma elevação nos efeitos do aquecimento global e, com isso, percebe-se que as questões ambientais não estão desassociadas das questões sociais (Lima, 2013). Dados climatológicos recentes indicam um aumento expressivo da temperatura média da superfície terrestre quando comparada ao período de referência entre 1951 e 1980. O ano de 2024 foi registrado como o mais quente desde o início das medições sistemáticas em 1880, de acordo com análises conduzidas pelo Instituto Goddard de Estudos Espaciais da NASA (GISS).

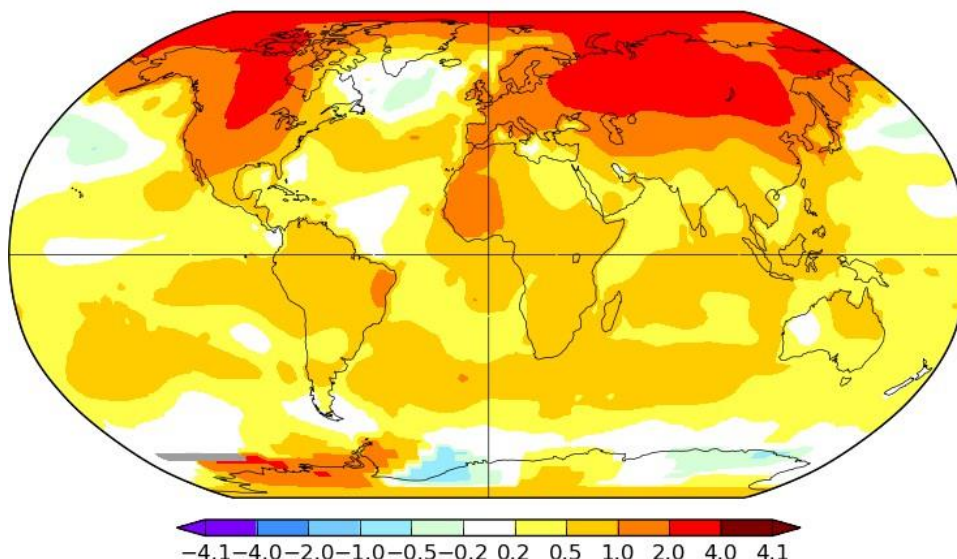
Esse padrão também tem sido atestado por instituições independentes, como a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA) e por outros centros internacionais de monitoramento climático. Em relação à média do período pré-industrial (entre 1850 e 1900), estima-se que a temperatura média global em 2024 tenha sido aproximadamente 1,47 °C (ou 2,65 °F) mais elevada. Destaca-se ainda que os últimos dez anos representam, de forma consecutiva, a década mais quente de toda a série histórica registrada.

A anomalia do aumento de temperatura da superfície terrestre é um dos principais indicadores do aquecimento global e das mudanças climáticas em escala global. Para a construção de representações que evidenciam essas anomalias, são utilizados diferentes conjuntos de dados provenientes tanto de medições *in situ* quanto de sensoriamento remoto. No que se refere à temperatura do ar da superfície terrestre, a análise baseia-se no banco de dados do Global Historical Climatology Network, versão 4 (GHCNv4), atualizado mensalmente e utilizado pelo Instituto Goddard de Estudos Espaciais da NASA (GISS). Já para as temperaturas da superfície do mar, emprega-se a base ERSST v5 (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature), desenvolvida pela NOAA/NCEI, que reúne séries temporais reconstruídas com alto grau de confiabilidade. Complementado os dados fornecidos pelo sensoriamento remoto, temos os fornecidos pelos sensores AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) a bordo do satélite Aqua da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2022), nas versões AIRSv6 e AIRSv7, são empregados para recuperar informações mensais com resolução espacial de 1° x 1°.

Utilizando os índices globais fornecidos pela Análise de temperatura de superfície GISS (v4) da NASA, podemos ver na Figura 7 que a média da temperatura global entre os anos de 1981 à 2023 era de aproximadamente 0,64 °C mais elevada em relação à média do base de estudo dos satélites utilizados pelo órgão (entre 1951 e 1980).

Figura 7: Média do aumento da temperatura global entre 1981 e 2023.

March 1981-2023 L-OTI(°C) Anomaly vs 1951-1980 0.64



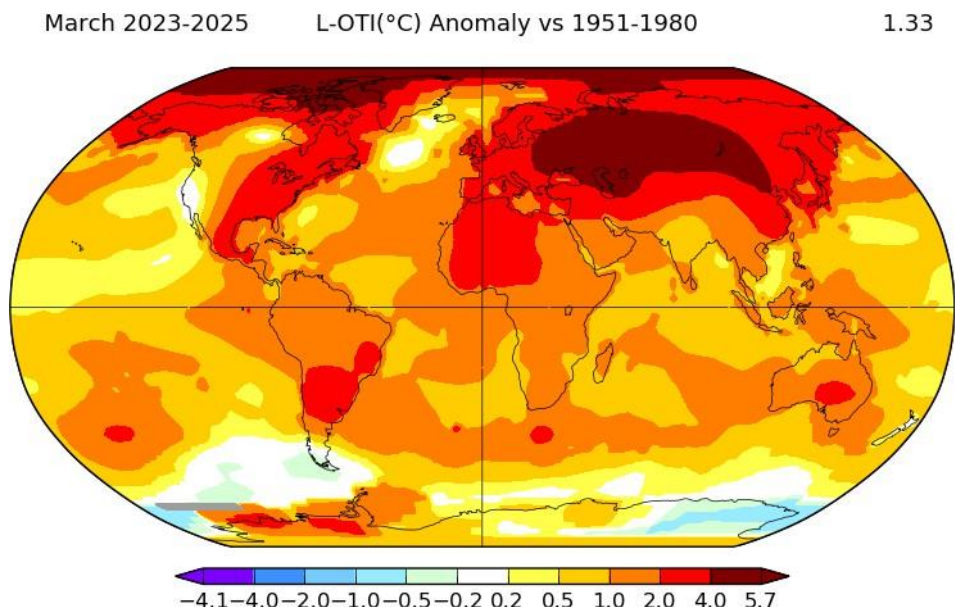
Fonte: Análise de temperatura de superfície GISS (v4). Disponível em:

<<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/#inputelements>>. Acesso em 05 de abril de 2025.

Esse crescimento, embora gradual durante o período apresentado, já indicava uma tendência de aquecimento contínuo do planeta. No entanto, analisando os dados mais recentes é possível observar uma intensificação desse fenômeno, ao se considerar o intervalo entre 2023 e março de 2025, a temperatura média global alcançou a marca de 1,33 °C acima dos níveis do período-base, demonstrando uma elevação acelerada e preocupante, que reforça ainda mais a urgência da adoção de medidas efetivas para mitigação das mudanças climáticas em todas as esferas, conforme apresentando na Figura 8.

De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR5), o aquecimento do sistema climático é inequívoco (IPCC, 2014, p. 2). O relatório aponta ainda que as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa atingiram níveis sem precedentes, sendo a principal causa do aumento observado nas temperaturas globais. Diante disso, evidencia-se a necessidade urgente de ações coordenadas em nível global para mitigar os impactos ambientais, promover a adaptação às novas condições climáticas e assegurar a sustentabilidade dos ecossistemas e da sociedade humana nas próximas décadas.

Figura 8: Média do aumento da temperatura global entre 2023 e 2025.



Fonte: Análise de temperatura de superfície GISS (v4). Disponível em:

<<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/#inputelements>>. Acesso em 05 de abril de 2025.

De maneira consistente, é nítido que os últimos dez anos foram os mais quentes já registrados desde o início das medições instrumentais modernas, em 1880. Tais registros anuais de temperatura servem para compor o banco de dados histórico da temperatura global, sendo por meio dessa base temporal que os cientistas conseguem evidenciar, com base empírica, o contínuo aquecimento do nosso planeta.

5.2 Camada De Ozônio

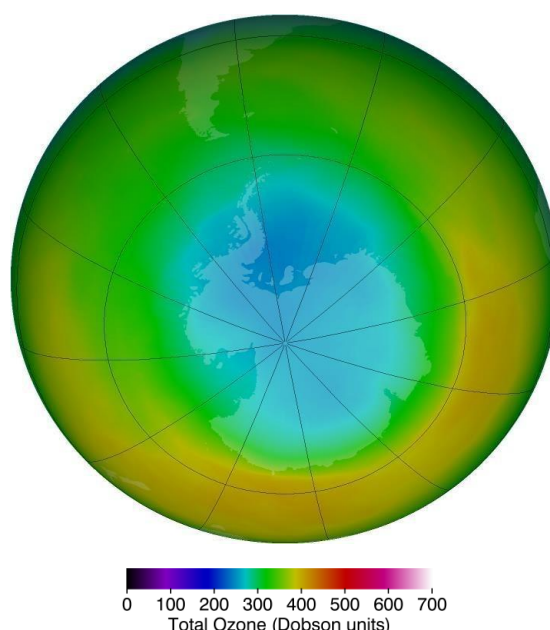
A descoberta da camada de ozônio reporta-se ao século XIX, quando o químico britânico Charles Fabry e o físico Henri Buisson, em 1913, identificaram e estudaram uma concentração específica de ozônio na atmosfera que bloqueava a radiação ultravioleta que vinha do Sol (Rowland; Molina, 1975). Tal constatação foi depois aprofundada por G.M.B. Dobson, que, nos anos de 1920, desenvolveu o primeiro instrumento para medir a quantidade de ozônio na atmosfera da Terra — o espectrofotômetro de Dobson.

Os estudos de Dobson forneceram os primeiros dados sistemáticos sobre a disposição de ozônio na estratosfera e estabeleceram o embasamento científico para o monitoramento da camada ao longo do século XX (Dobson, 1957). Naquele período, a atenção a camada de ozônio

ainda não era alvo de preocupação mundial, mas seu papel na proteção da vida na Terra já começava a ser reconhecido dentro da comunidade científica.

A Figura 9 é uma representação de como era o cenário em setembro de 1979, ano que se iniciou o mapeamento da camada de ozônio do planeta, tais dados são fornecidos pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), por meio do Centro de Voo Espacial Goddard fazendo uso do satélite Nimbus-7, equipado com o instrumento Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS). Todas as imagens apresentadas nessa subseção mostram a evolução do buraco na camada de ozônio da Antártida. As imagens analisadas nessa etapa, terão como base o dia 16 de setembro (Dia Internacional para a Preservação da Camada de Ozônio).

Figura 9: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 1979.



Fonte: NASA. Disponível em: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/monthly_1979-12_SH.html>. Acesso em 12 de abril de 2025.

De acordo com as próprias previsões da NASA, a representação de uma visão em cores falsas do ozônio total médio mensal sobre o polo antártico, devem ser interpretadas da seguinte maneira: As cores azul e roxa são as regiões onde existem menos ozônio, e os amarelos e vermelhos onde existe mais ozônio.

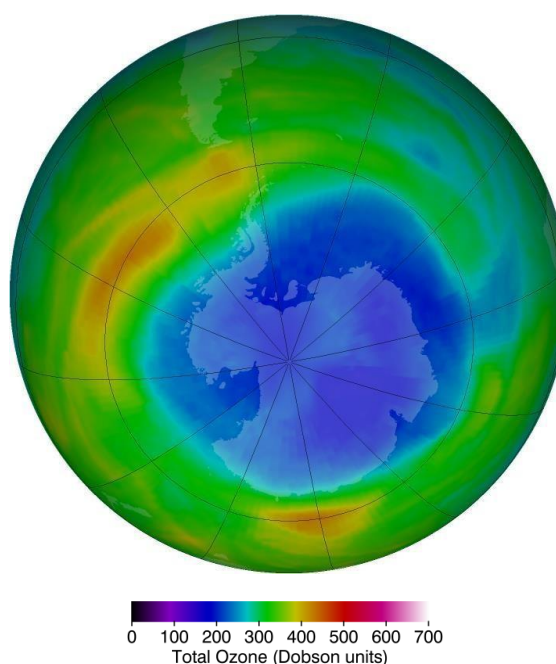
Dentro de um cenário mundial, a crise ambiental atrelada à camada de ozônio ganhou dimensões globais a partir dos anos 1970, quando Mario Molina e Frank Sherwood Rowland publicaram um artigo pioneiro, diga-se por sinal, que associava os clorofluorcarbonetos (CFCs) à degradação do ozônio estratosférico (Molina; Rowland, 1974). Tal estudo gerou forte impacto

internacional, levando à intensificação das pesquisas atmosféricas. O alarme global se manifestou em 1985, com a publicação dos dados do *British Antarctic Survey* que revelaram um grande buraco na camada de ozônio sobre a Antártida (Farman *et al.*, 1985), a Figura 10 apresenta a realidade nesse ano.

O declínio da camada de ozônio resultou em um dos marcos mais importantes da cooperação ambiental internacional das nações: o Protocolo de Montreal, assinado em 16 de setembro de 1987, e que teve 24 nações que assinaram o tratado inicialmente sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio, tendo mais 173 assinaram contrato nos anos seguintes. Esse tratado visou a redução e eliminação progressiva da produção e uso de substâncias destruidoras do ozônio.

De acordo com informações do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2020), tal acordo foi considerado um dos tratados ambientais mais eficazes e consolidados já estabelecidos, e seus resultados já demonstram impactos muito positivos, como a estabilização e sinais de recuperação da camada de ozônio. A Figura 10 apresenta como o cenário em setembro de 1985 – ano de publicação dos dados do *British Antarctic Survey* – onde a camada de ozônio do planeta já havia se alterado em relação ao primeiro ano de análises, 1979.

Figura 10: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 1985.



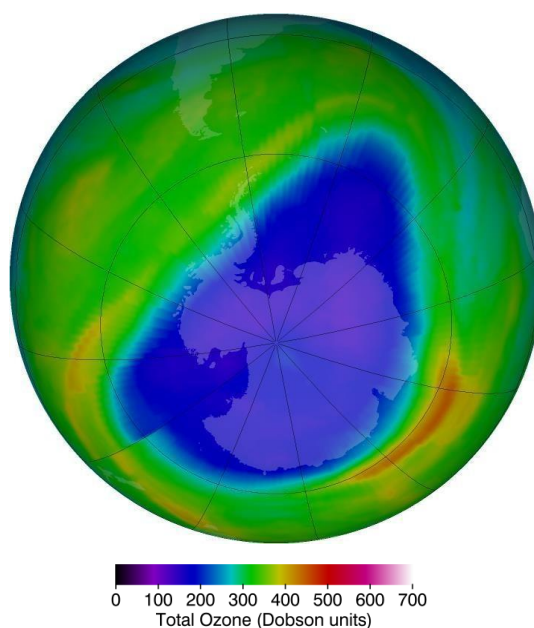
Fonte: NASA. Disponível em:

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/Scripts/big_image.php?date=198509&hem=S§ion=MAPS>. Acesso em 12 de abril de 2025.

No entanto, apesar dos avanços significativos no combate à destruição da camada de ozônio, outro problema ambiental global já ganhava proporção preocupante: o aquecimento global, causado principalmente pela elevação na concentração de GEE, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Essa nova ameaça exigia um acordo mais amplo que abrangesse as emissões desses gases. Foi nesse cenário que, em 11 de dezembro de 1997, os países membros da ONU aprovaram o Protocolo de Quioto, cujo foco era a mitigação das mudanças climáticas por meio da redução de emissões de GEE.

Diferentemente do Protocolo de Montreal, que teve como base um consenso científico mais consolidado e ações tecnológicas viáveis (substituição de SDOs), o Protocolo de Quioto enfrentou maiores desafios políticos e econômicos, pois estabelecia metas diferenciadas de redução de emissões para países desenvolvidos, sem obrigações iniciais para os países em desenvolvimento. Ainda assim, ele representou uma evolução na governança ambiental global, estendendo a preocupação com a atmosfera terrestre para além do ozônio, agora incluindo também os impactos do aquecimento global. A Figura 11 mostra com o cenário da camada de ozônio se apresentava em setembro de 1997, ano da aprovação e implantação do Protocolo de Quioto e de ações já consolidadas desde 1987 do Protocolo de Montreal.

Figura 11: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 1997.



Fonte: NASA. Disponível em:

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/Scripts/big_image.php?date=198509&hem=S§ion=MAPS>. Acesso em 12 de abril de 2025.

A partir de ações propostas pelo Protocolo de Quioto em 1997, os países signatários comprometeram-se a reduzir, no período de 2008 a 2012, as emissões de seis gases de efeito estufa (GEE) em pelo menos 5,2% em relação aos níveis médios de 1990. Tal tratado foi um marco ao estabelecer metas quantitativas de redução de emissões, especialmente para os países industrializados, que historicamente foram os maiores emissores. No entanto, o protocolo enfrentou desafios estruturais significativos. Grandes emissores em crescimento, como China, Índia e Brasil, foram enquadrados como países em desenvolvimento e, portanto, não estavam obrigados a cumprir metas obrigatórias de redução de emissões. Essa assimetria gerou críticas ao mecanismo e afetou sua efetividade.

Foi baseado nesse contexto que surgiu o Acordo de Paris, aprovado em dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21), na França. Tal acordo definitivamente substituiu o Protocolo de Quioto como marco regulatório internacional e trouxe uma mudança de paradigma: ao invés de metas rígidas e diferenciadas por grupos de países, como em Quioto, o Acordo de Paris estabeleceu que todos os países devem apresentar suas próprias metas voluntárias, chamadas de *Contribuições Nacionalmente Determinadas* (iNDC's, 2016). O objetivo principal passou a ser limitar o aumento da temperatura média global a bem abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para limitar esse aumento a 1,5 °C.

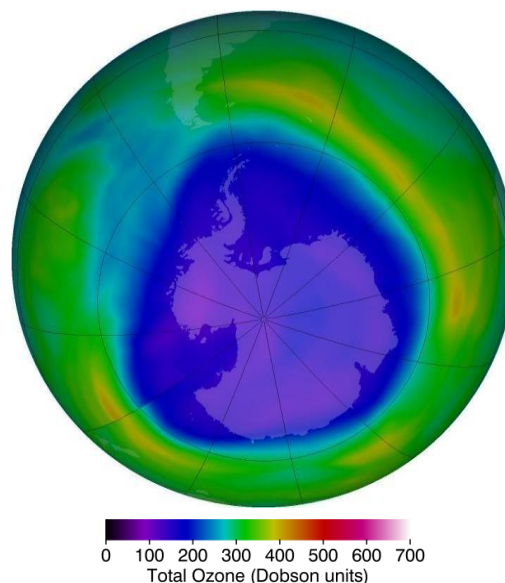
Alguns anos anteriores a aprovação do acordo, 2006 foi marcado como o ano mais crítico em relação à extensão do buraco na camada de ozônio. Segundo dados da (NASA, 2012), em setembro daquele ano, o buraco chegou a atingir aproximadamente 29,6 milhões de quilômetros quadrados, representando uma das maiores áreas já registradas desde o início das medições por satélite em 1979. Esse recorde ocorreu durante o período entre a adoção do Protocolo de Quioto, em 1997, e o Acordo de Paris, em 2015, destacando a persistência dos desafios ambientais mesmo após iniciativas globais significativas.

Solomon (1999), alerta que mesmo com os índices da redução das emissões de CFCs, os efeitos persistem por décadas devido à longa vida atmosférica desses compostos, o que torna indispensável a continuidade longa dos esforços de monitoramento e controle dessas emissões. Logo, a discussão sobre o tema da camada de ozônio se insere diretamente no debate climático a nível global, pois sua preservação está relacionada não apenas à proteção contra radiação ultravioleta, mas também à estabilidade térmica do planeta.

A principal causa desse aumento foi a presença contínua de substâncias destruidoras de ozônio, como os CFCs, na atmosfera, apesar das restrições impostas pelo Protocolo de Montreal de 1987. A Figura 12 mostra o momento mais crítico já enfrentado pela camada de ozônio,

baseados em registros da NASA.

Figura 12: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 2006.



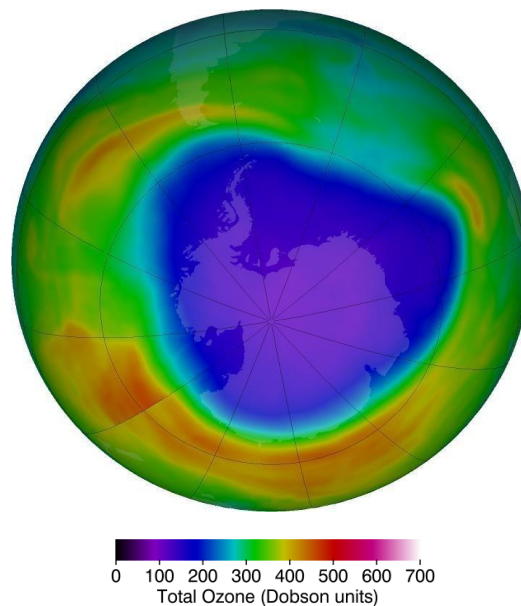
Fonte: NASA. Disponível em: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/Scripts/big_image.php?date=2006-09-16&hem=S>. Acesso em 12 de abril de 2025.

Após esse momento crítico em 2006, e com os avanços obtidos com políticas de controle de emissão de substâncias prejudiciais da camada de ozônio, os cientistas ainda destacam que o processo de recuperação não está completamente consolidado. Bhartia (NASA, 2024), um dos pesquisadores pioneiros a identificar por satélite o buraco na camada de ozônio, ressalta que "o buraco antártico está se estabilizando e pode estar se recuperando lentamente", sendo necessário que se continue um monitoramento rigoroso para verificar se essa recuperação está ocorrendo conforme o esperado, acreditam-se que a faixa de gás poderá se recuperar completamente até 2066 (NOAA, 2024).

A Figura 13 mostra como nossa camada ozônio se encontrava em 16 setembro de 2024,. Nesse período, observou-se que o buraco na camada de ozônio atingiu cerca de 22,4 milhões de quilômetros quadrados, uma área significativamente menor do que os registros do início dos anos 2000, quando o fenômeno chegou a ultrapassar os 29 milhões de quilômetros quadrados (NASA, 2024). Essa redução é um indicativo dos avanços obtidos a partir da implementação do Protocolo de Montreal e de medidas globais que restringiram o uso de substâncias destruidoras da ozonosfera, como os CFCs. Apesar disso, os dados também ressaltam a necessidade de manter a vigilância e os esforços internacionais para garantir a recuperação

completa da camada de ozônio nas próximas décadas.

Figura 13: Relógio de Ozônio da NASA em 16 setembro de 2024.



Fonte: NASA. Disponível em: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/Scripts/big_image.php?date=2024-0928&hem=S>. Acesso em 12 de abril de 2025.

5.3 Efeito Estufa e Aquecimento Global

De acordo com Cruz (2006), a atmosfera terrestre constitui a camada gasosa que circunda o planeta, desempenhando papel fundamental para a manutenção da vida. Sua altitude tem uma extensão aproximada de 500 quilômetros, é nessa camada que se apresenta maior concentração de gases nas regiões mais próximas à superfície, onde ocorre a maior parte das interações biológicas e climáticas. À medida que se ascende em altitude, verifica-se uma redução gradual na densidade desses gases, tornando o ar mais rarefeito nas camadas superiores. Esse comportamento é determinante para diversos fenômenos físicos, como a propagação de ondas sonoras, a regulação térmica e os processos de absorção e reflexão da radiação solar.

A composição e a estrutura da atmosfera, influenciam, portanto, diretamente no equilíbrio energético do planeta e são fundamentais para a compreensão das dinâmicas relacionadas ao clima e à sustentabilidade ambiental. Existe uma contribuição do gás carbônico (CO_2) e do vapor d'água (H_2O) para o planeta se manter aquecido, tal efeito hoje conhecemos como efeito estufa. O gás carbônico é utilizado para respiração e o ozônio é usado na forma de

uma barreira que protege o planeta dos raios nocivos do Sol (Cruz, 2006).

As origens da compreensão científica sobre o efeito estufa se remetem ao início do século XIX, quando o físico francês Joseph Fourier propôs uma hipótese pioneira acerca da influência da atmosfera terrestre na regulação da temperatura do planeta. Em seu trabalho apresentado à *Académie Royale des Sciences* em 1824, o mesmo sugeriu que a atmosfera funcionaria como uma espécie de isolante térmico, permitindo que a radiação solar penetrasse mais facilmente do que a radiação térmica emitida pela superfície terrestre, a qual encontraria maior resistência para se dissipar de volta ao espaço.

Tal observação apontava que certos componentes atmosféricos poderiam reter calor, influenciando diretamente o equilíbrio térmico da Terra (Fourier apud Fleming, 1998). A hipótese de que a atmosfera funcionava como uma espécie de “cobertor térmico” natural foi uma contribuição inovadora para a ciência do clima, ainda no século XIX. Fourier sugeria que, sem a presença desses gases, a Terra seria significativamente mais fria, pois parte da energia irradiada pela superfície escaparia diretamente para o espaço. A Figura 14 abaixo evidencia o papel da atmosfera na retenção de parte da radiação térmica que é irradiada pela superfície terrestre.

Figura 14: Projeção esquemática do efeito estufa da Terra.



Fonte: Adaptado de Efeito Estufa, U.S. Global Change Research Program. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-do-efeito-estufa-na-Terra-Fonte-adaptado-de-Efeito-Estufa-US-Global_fig1_266374402>. Acesso em 15 de abril de 2025.

Essa percepção pioneira lançou as bases para a formulação moderna do conceito de efeito estufa, hoje considerado um dos pilares para o entendimento das alterações climáticas globais. Com o passar do tempo, e com o avanço dos métodos de observação e medição, confirmou-se que o acúmulo de gases poluentes na atmosfera, especialmente o dióxido de carbono (CO_2), potencializa esse efeito natural, agravando o aquecimento global. Assim, a teoria de Fourier permanece essencial para compreendermos os atuais desequilíbrios climáticos e seus impactos no sistema terrestre.

Após a incidência da radiação solar sobre a Terra, cerca de 30% dessa energia é refletida de volta ao espaço, enquanto o restante é absorvido pela superfície e pela atmosfera, aquecendo o planeta. Uma porção significativa da energia térmica emitida pela superfície é absorvida por gases específicos, como o dióxido de carbono (CO_2), o vapor d'água (H_2O), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o ozônio (O_3), que compõem os chamados GEE.

Esses gases dificultam a saída da radiação infravermelha para o espaço, promovendo uma espécie de “rebatimento” do calor de volta à superfície, mantendo o equilíbrio térmico terrestre. Contudo, o aumento da concentração desses gases, principalmente devido a atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, tem intensificado esse processo natural, levando ao fenômeno conhecido como aquecimento global. Esse aquecimento anômalo tem causado mudanças significativas no clima do planeta, como o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, derretimento das calotas polares e elevação do nível dos oceanos, representando uma ameaça direta à sustentabilidade ambiental e à biodiversidade global, conforme já mencionado anteriormente.

É possível afirmar que a atmosfera desempenha um papel essencial na manutenção das condições necessárias à vida no planeta. Contudo, esse equilíbrio não depende apenas da presença da atmosfera em si, mas também de mecanismos naturais associados a ela, como o efeito estufa. Nesse sentido, Rodrigues (2014):

O efeito estufa é um fenômeno natural e essencial à vida na Terra e serve para manter o planeta aquecido. Se não houvesse o efeito estufa, quando o Sol parasse de emitir os seus raios em determinado local do planeta, chegando a noite, este local iria congelar, havendo a variação de muitos graus centígrados na temperatura entre os dias e as noites. Desta forma é possível a vida na Terra. O problema é que, ao lançar muitos gases de efeito estufa na atmosfera, o planeta se torna quente cada vez mais, podendo levar à extinção da vida na Terra (p.1).

É comum encontrar a ideia equivocada de que o aumento da temperatura média do planeta está relacionado a uma maior incidência de radiação solar. No entanto, o que realmente

acontece é que, com o fortalecimento do efeito estufa, ocorre uma alteração no equilíbrio energético da Terra. Quando há uma maior retenção de calor devido à presença ampliada de GEE na atmosfera, a saída de energia térmica para o espaço é dificultada. Como consequência, o sistema climático terrestre responde a esse desequilíbrio elevando sua temperatura, buscando assim restabelecer o fluxo energético de saída.

Buckeridge (2006), afirma que a presença elevada de determinados gases na atmosfera pode desencadear transformações climáticas significativas, com impactos diretos sobre a preservação da vida no planeta. Estudos baseados em simulações computacionais indicam que elevações aparentemente modestas na temperatura média global — da ordem de 1 a 2 °C — podem, na prática, provocar alterações drásticas no equilíbrio climático. Entre os efeitos possíveis, destaca-se o derretimento acelerado das calotas polares, o que pode desencadear eventos extremos em escala global.

Esse aumento da temperatura média está diretamente relacionado ao acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, em especial o dióxido de carbono (CO₂). Conforme sua concentração se eleva mais, ocorre uma intensificação da capacidade atmosférica de reter calor, o que desencadeia um efeito em cadeia: a elevação térmica facilita a evaporação da água, resultando em maior presença de vapor d'água — outro gás com forte potencial estufa — que, por sua vez, contribui para agravar ainda mais o aquecimento. Trata-se de um ciclo que reforça o desequilíbrio climático global. Segundo Vieira e Bazzo (2007):

O aquecimento global pode ser definido como o aumento da temperatura média do nosso planeta. A principal evidência desse fenômeno vem das medidas de temperatura de estações meteorológicas em todo o globo terrestre desde 1860 (p.1).

Diante do apresentado, podemos compreender que a atmosfera terrestre não apenas abriga os elementos essenciais à nossa vida, mas também regulamenta de maneira única a temperatura do planeta por meio de processos naturais como o efeito estufa. Porém, a intensificação antrópica desse fenômeno tem gerado desequilíbrios preocupantes no sistema climático global. O conhecimento histórico e científico sobre a composição atmosférica e os mecanismos de retenção de calor demonstram a urgência de reformular os modos de produção e consumo atuais. A crescente emissão de GEE, impulsionada principalmente pelas atividades humanas, exige respostas sustentáveis e políticas ambientais eficazes e precisas, a fim de preservar a estabilidade climática e garantir a continuidade da vida na Terra. Assim, torna-se indispensável promover uma educação ambiental crítica e fundamentada, que permita à sociedade compreender os riscos atuais associados ao aquecimento global e agir de forma

consciente frente aos desafios do século XXI.

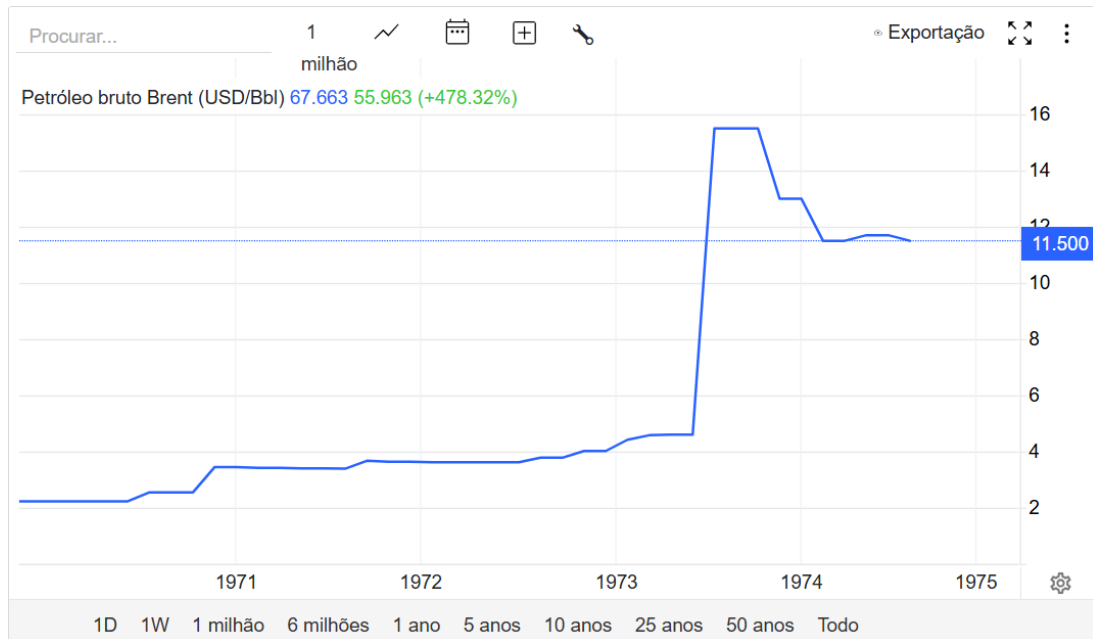
5.4 Crise Energética Mundial e Nacional

A crise energética é um efeito que tem se intensificado cada vez mais ao longo das últimas décadas, impulsionado por alguns fatores como o crescimento populacional, o aumento da demanda industrial e a dependência contínua de fontes não renováveis, como petróleo, carvão mineral e gás natural. Segundo Sachs (2007), “o atual modelo de desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis não é sustentável a longo prazo, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico”.

Essa afirmação evidencia a vulnerabilidade do sistema energético mundial frente à escassez de recursos e às mudanças climáticas, que agravam os problemas de fornecimento, sobretudo em países com infraestrutura energética deficiente. O atual modelo de desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis não é sustentável a longo prazo, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, pois além de intensificar a emissão de gases de efeito estufa, contribui para a instabilidade dos mercados globais devido à volatilidade dos preços desses recursos. Portanto, torna-se urgente a transição para uma matriz energética mais limpa e diversificada, capaz de garantir segurança energética, reduzir os impactos ambientais e promover o desenvolvimento econômico de forma mais equilibrada e duradoura.

A história recente da matriz energética mundial é marcada por instabilidades que evidenciam a vulnerabilidade das economias diante de crises de abastecimento energéticos. Um dos marcos históricos e possivelmente um dos mais emblemáticos foi a crise do petróleo de 1973, provocada pela decisão da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) de interromper o fornecimento aos países que apoiaram Israel durante a Guerra do Yom Kippur e, como consequência elevou consideravelmente o preço do produto, conforme mostra a Figura 15 abaixo.

Figura 15: Aumento do preço do petróleo após a crise de 1973.



Fonte: TRADING ECONOMICS. Petróleo Bruto Bent. Disponível em:

<<https://tradingeconomics.com/commodity/brent-crude-oil>>. Acesso de 14 de abril de 2025.

O choque repentino nos preços do barril de petróleo, que quadruplicaram em poucos meses, causou um grande desequilíbrio econômico em nações fortemente dependentes dessa fonte de energia, gerando recessão, desemprego e inflação em uma grande escala (Yergin, 2008).

É nesse sentido que consideramos que o fator energético deve ser considerado um dos elementos mais sensíveis na equação do desenvolvimento global, sendo continuamente afetado por aspectos econômicos, ambientais e políticos, se tornando assim um elemento central das preocupações do desenvolvimento sustentável. Essa crise mostrou um aspecto importante que culminou nos fatos ocorridos, a centralidade da energia como ativo geopolítico, onde foi destacado os riscos de dependência de fontes fósseis. Como observa Sachs (2007) “a vulnerabilidade energética das nações se traduz em fragilidade econômica, tornando urgente a diversificação das fontes de energia e o incentivo à eficiência no consumo”.

A década de 1970 inaugurou, portanto, um ciclo de preocupação mundial com a segurança energética, levando os países desenvolvidos a investirem em alternativas como energia nuclear, carvão e, posteriormente, fontes renováveis para geração de energia. No entanto, a instabilidade continuou sendo uma constante.

Analisando agora um cenário nos anos 2000, uma nova série de eventos reemergiu

novos aspectos voltados para o cenário de crise. Países como os Estados Unidos e o Reino Unido, por exemplo, enfrentaram apagões de grandes proporções, motivados tanto por falhas na infraestrutura elétrica quanto por picos de demanda associados à urbanização acelerada e à falta de investimentos em modernização da rede elétrica. Em 2003, por exemplo, um grande apagão afetou o nordeste dos Estados Unidos e partes do Canadá, deixando cerca de 50 milhões de pessoas sem eletricidade. Adicionalmente a isso, tiveram os constantes conflitos geopolíticos em regiões produtoras de petróleo e gás natural, como o Oriente Médio, o que afetou diretamente a estabilidade do mercado energético mundial. Como destaca Goldemberg (2006) “a interdependência entre energia e geopolítica impõe aos países a responsabilidade de se prepararem para choques de oferta e demanda que comprometem o crescimento econômico”.

Observa-se, portanto, ver que um fator central em diversos conflitos geopolíticos, atualmente é a energia. A guerra entre a Rússia e a Ucrânia, iniciada em 2022, é um exemplo recente de como disputas territoriais podem impactar o fornecimento energético global. A Europa, altamente dependente do gás natural russo, enfrentou desafios significativos em seu abastecimento, levando a uma reavaliação de suas políticas energéticas e a uma busca por fontes alternativas. Esse conflito evidenciou a importância da diversificação das fontes de energia e da redução da dependência de fornecedores únicos.

No caso do cenário nacional, podemos citar como sendo o episódio mais marcante, a crise energética de 2001, quando o país enfrentou um racionamento inédito de energia elétrica. A principal causa foi a elevada dependência da matriz hidrelétrica, somada a uma estiagem severa que reduziu drasticamente os níveis dos reservatórios, tornando o cenário crítico. Entre os anos de 1990 e 2000, o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu 49%, enquanto a capacidade instalada de geração aumentou apenas 35%, (MME, 2002).

O painel de consumo disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPB) dos últimos 20 anos, mostra gráficos de evolução do montante e da taxa de variação interanual do consumo mensal total de eletricidade no Brasil. A Figura 16 abaixo mostra o gráfico de crescimento do consumo.

Figura 16: Aumento do consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos 20 anos.



Fonte: EPE. Painel de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica. Disponível em:

<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso de 17 de abril de 2025.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2002), esse descompasso entre oferta e demanda só não resultou em racionamentos anteriores porque foram utilizadas, ao longo dos anos, reservas hídricas planejadas para garantir o abastecimento em situações críticas. Com o esgotamento dessas reservas, o país se viu diante de uma grave crise estrutural no setor elétrico, evidenciando a ausência de um planejamento de longo prazo e a pouca diversificação da matriz atual à época. Essa dependência histórica da fonte hidroelétrica, embora considerada uma fonte renovável (convencional), traz consigo fragilidades importantes. A partir disso, a ideia de diversificação da matriz elétrica do país ficou em evidência. Como explica Tolmasquim (2016):

A sazonalidade e a variabilidade dos regimes hídricos, intensificadas pelas mudanças climáticas, tornam as usinas hidrelétricas vulneráveis a longos períodos de estiagem, o que compromete a segurança do abastecimento.

A crise de 2001 representou então o que podemos chamar de ponto de inflexão nas políticas energéticas brasileiras, motivando a criação de programas emergenciais na época para a construção de usinas termelétricas e um pouco incentivo à eficiência energética. Entretanto, tais medidas, embora necessárias, não resolveram os problemas estruturais da matriz. Ao

contrário, estimularam a dependência de fontes fósseis em determinadas regiões e com isso ocorreu o aumento do custo da energia, principalmente para o consumidor final. Além disso, o modelo centralizado de geração continuou predominantemente forte, sem considerar suficientemente a descentralização e a inserção de fontes alternativas e sustentáveis como estratégia de segurança e sustentabilidade.

Diante desse cenário de instabilidade apresentado, tanto em nível mundial quanto a nível nacional, se tornou evidente que a transição para matrizes energéticas mais resilientes, sustentáveis e diversificadas era uma necessidade urgente dentro da matriz energética. As crises energéticas não se configuram apenas como um problema técnico ou circunstancial, mas como questões estratégicas de desenvolvimento sustentável de uma nação, exigindo soluções que contemplem aspectos ambientais, econômicos e sociais. Assim, a discussão sobre a transição para matrizes sustentáveis, surge como resposta direta às fragilidades expostas por essas crises históricas e como um caminho viável para garantir segurança energética de longo prazo.

5.5 Transição Para Matrizes Sustentáveis

A base para o desenvolvimento econômico sustentável de qualquer nação está diretamente ligada à sua capacidade de oferecer infraestrutura logística e energética que favoreça o crescimento produtivo de forma segura, competitiva e ambientalmente responsável. No caso do Brasil, é plenamente justificável sua classificação como uma potência mundial tanto em termos energéticos quanto ambientais, devido à vasta diversidade de fontes disponíveis para geração de energia elétrica. A grande oferta de recursos naturais e o potencial para produção em grande escala tornam o país um modelo a ser observado por outras nações (Tolmasquim, 2012).

A crescente preocupação com os impactos ambientais provocados pelo modelo energético tradicional, uma parte baseada em combustíveis fósseis, tem impulsionado uma reestruturação nas matrizes energéticas ao redor do mundo. Esse processo, conhecido como transição energética, busca promover a substituição gradual de fontes poluentes e não renováveis por alternativas sustentáveis e renováveis. Segundo Rogner *et al* (2012), essa transição representa não apenas uma mudança tecnológica, mas também uma transformação econômica, política e social, capaz de redefinir a forma como as sociedades produzem, distribuem e consomem energia elétrica.

O desenvolvimento de um plano energético eficiente deve ir além da simples capacidade de fornecimento de energia à sociedade. É necessário também, considerar a equidade no acesso, com atenção especial às regiões mais vulneráveis nos requisitos sociais econômicos. No contexto brasileiro, ampliar a oferta energética é um passo essencial para fomentar o crescimento econômico e, por consequência, promover a melhoria das condições de vida da população. Para garantir a esperada segurança energética, é recomendável que essa oferta seja composta por uma matriz diversificada, explorando múltiplas fontes. Contudo, essa diversificação precisa estar alinhada com as características econômicas do país, respeitando a disponibilidade natural das fontes predominantes no território nacional (Goldemberg; Moreira, 2005).

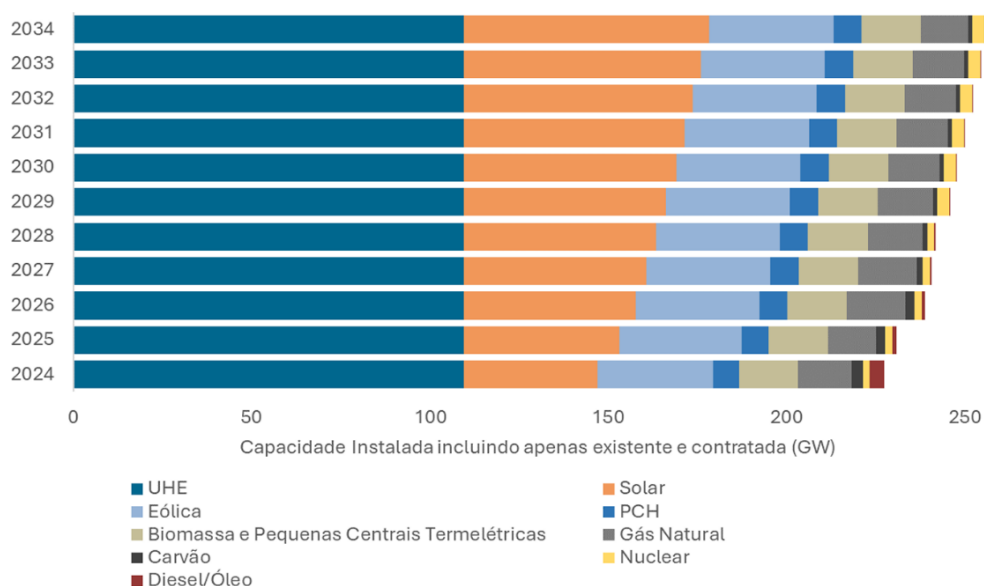
O ato de planejar envolve a definição antecipada de ações estratégicas voltadas à solidificação de objetivos futuros. Trata-se além de prever cenários, antecipar demandas e traçar caminhos viáveis para alcançar metas ainda não realizadas. No contexto energético, o planejamento deve considerar não apenas as necessidades atuais, mas também as projeções futuras de consumo, definindo de que forma o país poderá garantir o suprimento energético de maneira segura, eficiente e sustentável (EPE, 2023).

Tratando do contexto nacional, a transição energética ganha contornos específicos, muito em função da predominância histórica da energia hidrelétrica na matriz elétrica do país. Embora essa fonte seja renovável (porém, convencional), sua dependência de regimes hidrológicos e a ocorrência de longos períodos de estiagem revelam a importância da transição e diversificação por meio de outras fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, a eólica e a biomassa (Tolmasquim, 2016). Assim, a inserção progressiva dessas fontes, associada a políticas públicas de incentivo e inovação tecnológica, constitui um pilar estratégico para a consolidação de uma matriz energética sustentável e diversificada.

Tratando agora das projeções para um sistema transitório da matriz elétrica nacional, foi tomado como base os estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). A mesma publica periodicamente o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), um documento estratégico que traça as diretrizes para o desenvolvimento do setor elétrico no horizonte de dez anos. Esse plano contempla estimativas para a ampliação da capacidade de geração de energia e das principais interligações entre os sistemas regionais, sempre com base em critérios que conciliam sustentabilidade socioambiental e segurança no suprimento. Dessa forma, o PDE orienta o planejamento do setor e subsidia os processos de licitação voltados à expansão da oferta elétrica nacional, com o objetivo de garantir o atendimento à demanda crescente do país (Tolmasquin, 2012).

Visto isso, analisando os dados de projeção do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034), é visto que a fonte solar fotovoltaica é uma alternativa para transição para uma matriz elétrica mais sustentável e diversificada, com projeção de alcançar aproximadamente 59 GW de capacidade instalada até 2034. Esse avanço reflete a sua crescente relevância na matriz elétrica nacional e evidencia o papel estratégico que desempenha na transição energética do Brasil. Tal expansão é impulsionada, principalmente, pela Mini e Microgeração Distribuída (MMGD), destacando com isso a forte presença dessa fonte renovável no SIN. A Figura 17 mostra a projeção da expansão da fonte até 2034.

Figura 17: Projeção da expansão da fonte solar fotovoltaica na matriz nacional até 2034.



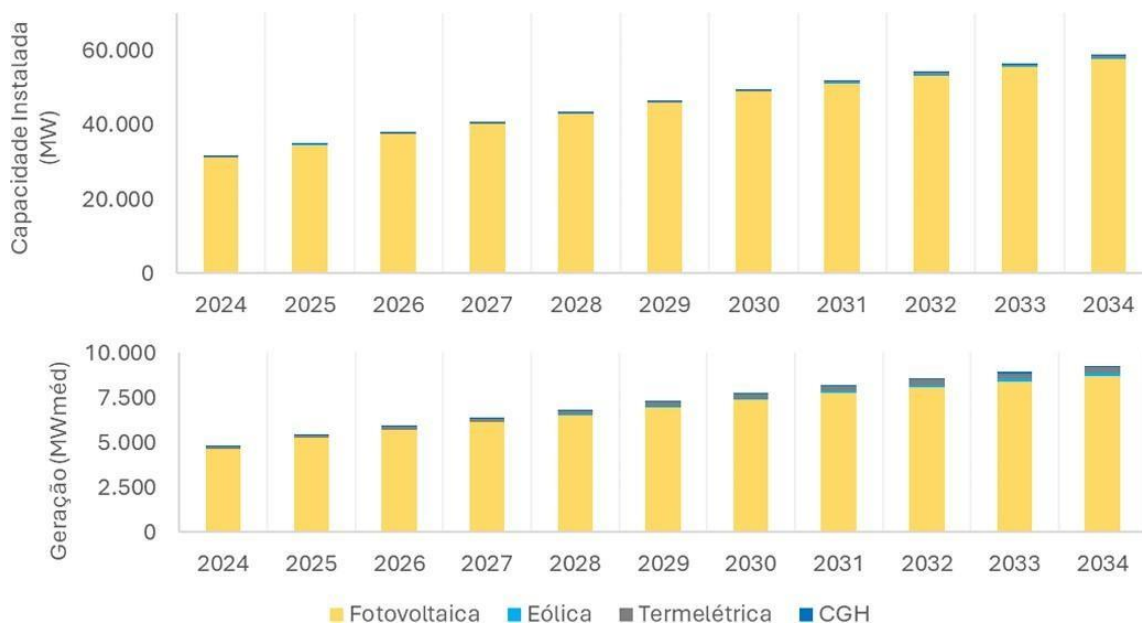
Fonte: EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2034. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-756/PDE2034_Aprovado.pdf >. Acesso de 10 de abril de 2025.

Dentro do cenário de projeção da fonte solar fotovoltaica no país, a Mini e Microgeração Distribuída (MMGD) se destaca amplamente, sendo responsável por cerca de 98% da potência total projetada para esse segmento. Tal predominância reafirma a importância da energia solar não apenas como alternativa sustentável, mas também como protagonista na transformação do perfil de consumo e geração elétrica no país, promovendo autonomia energética em nível local, redução de perdas na transmissão e maior engajamento da sociedade na busca por soluções energéticas ambientalmente responsáveis.

Isso deve forte ligação com diretrizes instituídas por políticas públicas do Marco Legal da Geração Distribuída, estabelecido pela Lei nº 14.300/2022, que trouxe para o setor segurança

regulatória e incentiva investimentos. A Figura 18 abaixo apresenta as projeções de crescimento para desse tipo de segmento dentro do setor.

Figura 18: Expansão em capacidade de energia da MMGD na matriz nacional até 2034.



Fonte: EPE. Plano Decanal de Expansão de Energia 2034. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-756/PDE2034_Aprovado.pdf >. Acesso de 10 de abril de 2025.

Com os embasamentos de toda a discussão apresentada, fica claro que a transição para matrizes energéticas sustentáveis não é apenas uma tendência mundial mediante crises que aconteceram ao longo dos anos recentes, mas uma necessidade urgente para garantir o desenvolvimento econômico com responsabilidade ambiental.

No contexto brasileiro, tal transição encontra um terreno abundante devido à disponibilidade de recursos naturais, à estrutura regulatória que está se mostrando favorável e ao crescente protagonismo da energia solar fotovoltaica, especialmente no âmbito da Mini e Microgeração Distribuída (MMGD).

Logo, a proposta deste trabalho de apresentar análises de viabilidade da implantação de uma usina solar fotovoltaica, considerando aspectos históricos, físicos e socioeconômicos, além de atender à crescente demanda energética com uma fonte limpa e renovável, também dialoga com políticas públicas atuais e contribui diretamente para a consolidação de um modelo energético mais seguro, eficiente e ambientalmente sustentável.

5.6. Conceitos Físicos Relacionados À Energia Solar

A compreensão dos conceitos físicos envolvidos nos processos da energia solar é essencial para ter o embasamento técnico tanto o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos quanto a análise de viabilidade de sua aplicação prática. A energia proveniente do Sol é uma forma de radiação eletromagnética, cujo aproveitamento exige o domínio de fundamentos da Física, como radiação, irradiância, irradiação, efeito fotovoltaico, Coeficiente de Reflexão (Albedo), efeitos de sombreamento, entre outros fenômenos envolvidos no processo. A Física, nesse sentido, desempenha papel fundamental ao permitir a modelagem, a simulação e a otimização de sistemas solares por meio de parâmetros mensuráveis, fornecendo assim embasamento científico necessário à engenharia e ao planejamento energético sustentável (Giampietro; Mayumi, 2000).

A Física, como ciência que estuda os fenômenos naturais e suas interações, oferece os instrumentos conceituais e matemáticos necessários para interpretar desde o comportamento da radiação solar até os efeitos elétricos que ela induz nos materiais semicondutores. Tais conhecimentos permitem entender como a energia solar se propaga, interage com as superfícies e se converte em energia elétrica nos módulos fotovoltaicos. Conforme destaca Duffie e Beckman (2013) “à análise do desempenho de sistemas solares requer o entendimento dos parâmetros que descrevem a geometria solar, as características da radiação e os processos de conversão de energia”.

Nesse contexto, o estudo desses conceitos não é apenas um exercício acadêmico, mas um requisito técnico essencial para o correto dimensionamento, instalação e monitoramento de usinas solares. Vamos apresentar a seguir alguns dos conceitos físicos elencados acima, de maneira a entender seu funcionamento e sua ligação com nosso objeto de estudo atual, a energia solar fotovoltaica.

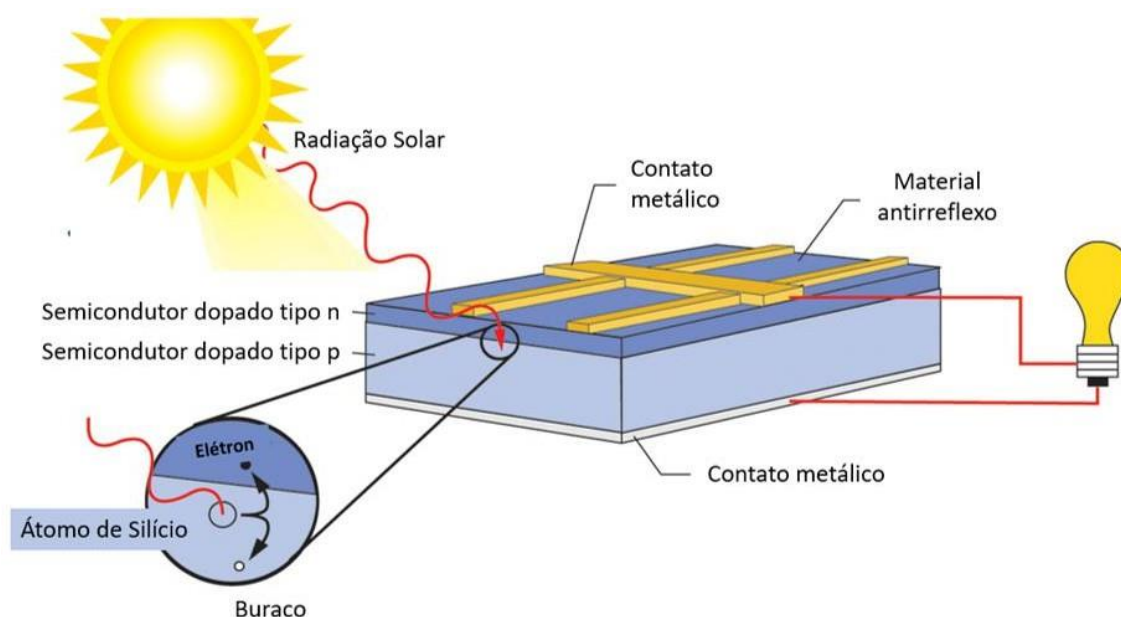
- **Efeito Fotovoltaico**

O Efeito Fotovoltaico Foi Observado Originalmente Pela Primeira Vez Em 1839 Pelo Físico Francês Edmund Becquerel, Quando Nas Extremidades De Uma Estrutura De Material Semicondutor Surgiu O Aparecimento De Uma Tensão Entre Os Polos, Devido À Incidência De Luz (Nascimento, 2004). Esse processo ocorre quando a radiação solar incide sobre certos materiais semicondutores, como o silício por exemplo, promovendo a liberação de elétrons que, ao serem direcionados por um campo elétrico interno, geram uma corrente elétrica contínua.

A estrutura básica do referido efeito sobre uma célula fotovoltaica consiste em uma

junção tipo p-n, formada por duas camadas de semicondutores com diferentes características de dopagem: a camada tipo p (rica em lacunas) e a camada tipo n (rica em elétrons livres). Quando os fótons da luz solar atingem essa junção, sua energia pode ser suficiente para excitar os elétrons da banda de valência para a banda de condução, criando pares elétron-lacuna. Esses portadores de carga são então separados pela barreira de potencial da junção, originando a corrente elétrica que flui para o circuito externo (Gonçalves *et al.*, 2015), conforme esquema da Figura 19 abaixo.

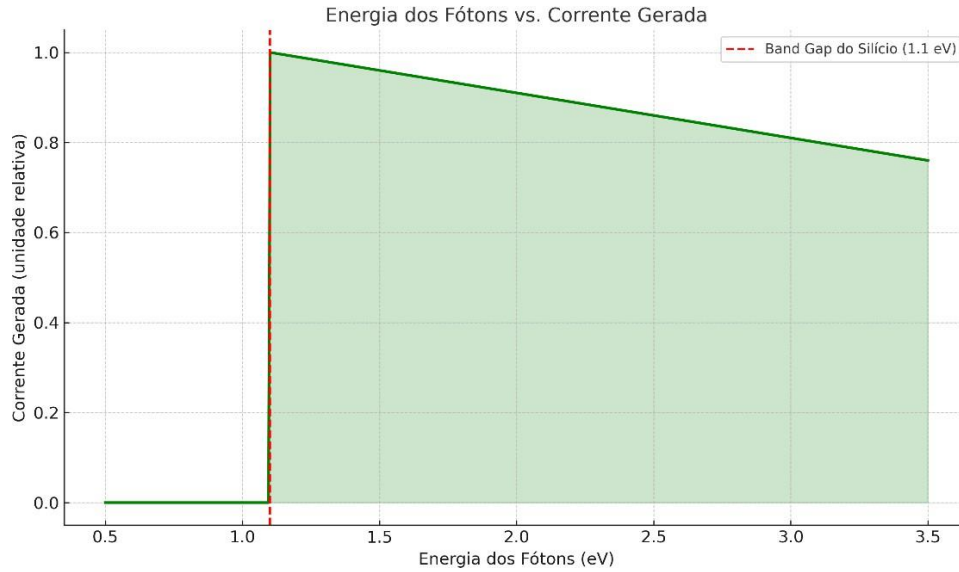
Figura 19: Esquema de funcionamento do Efeito Fotovoltaico.



Fonte: OAK Energia. Disponível em: <<https://oakenergia.com.br/sistema-fotovoltaico-guia-completo-energia-solar/>>. Acesso de 14 de abril de 2025.

Essa transição só ocorre se a energia do fóton for igual ou superior à lacuna de energia (*band gap*) do material semicondutor utilizado — no caso do silício, aproximadamente 1,1 eV. Para fótons com energia abaixo da *band gap* do material, nenhuma corrente é gerada. Fótons com energia inferior a esse valor não conseguem promover os elétrons, enquanto fótons com energia muito superior têm o excesso dissipado como calor. Essa característica do silício, um semicondutor de *band gap* indireto, é fundamental para o funcionamento e eficiência das células solares baseadas nesse material (Rüther, 2017). A Figura 20 abaixo mostra o momento em que a barreira de 1,1 eV é superada.

Figura 20: Esquema do fenômeno da Energia dos Fótons vs. Corrente Gerada.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando código de programação em *python*, 2025.

A ocorrência do efeito fotovoltaico está diretamente ligada à eficiência da célula fotovoltaica, onde a mesma está relacionada à quantidade de energia luminosa convertida em energia elétrica, sendo influenciada por diversos fatores, como a intensidade da radiação solar, o material semicondutor, a temperatura de operação e a arquitetura do módulo. A equação que expressa a corrente gerada pela célula fotovoltaica é dada por:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Onde I é a corrente de saída da célula, I_{ph} é a corrente gerada pela luz incidente, I_0 é a corrente de saturação inversa do diodo, q é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C), V é a tensão da célula, n é o fator de idealidade do diodo, k é a constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K) e T é a temperatura da célula em Kelvin.

Compreender o efeito fotovoltaico é essencial para o entendimento técnico e científico do funcionamento das tecnologias solares, pois é esse o fenômeno que possibilita a conversão da energia solar em energia elétrica de forma limpa, silenciosa e renovável.

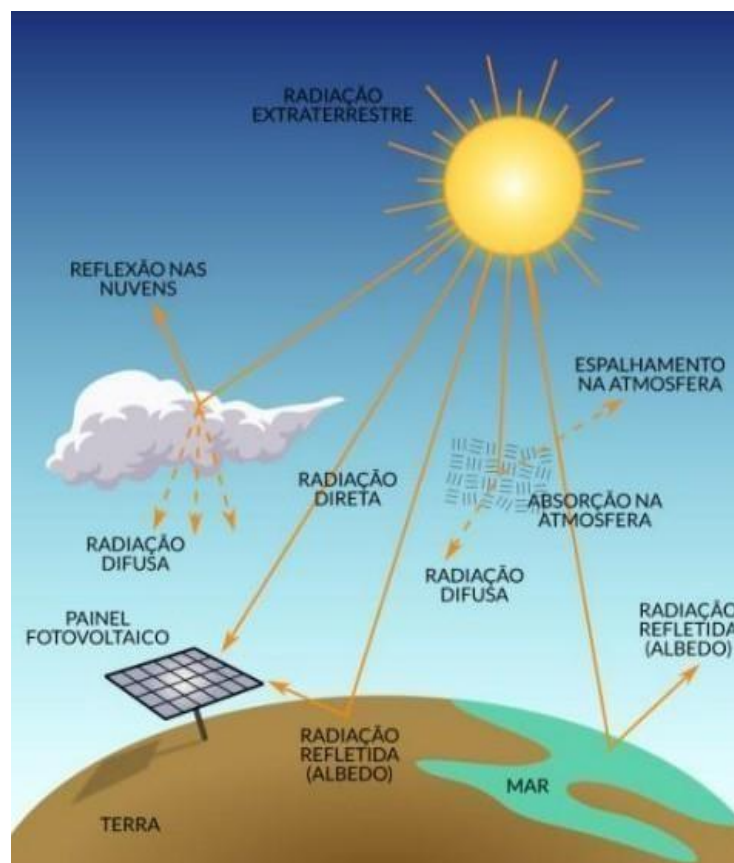
- **Radiação**

A radiação pode ser definida como o processo de transferência de energia por meio de

ondas eletromagnéticas ou partículas. No contexto da energia solar, estamos lidando com a radiação eletromagnética emitida pelo Sol, que se propaga no vácuo até alcançar a atmosfera terrestre e, posteriormente, a superfície do planeta. Essa radiação é composta por diferentes comprimentos de onda, sendo que apenas uma parte desse espectro é aproveitada para conversão fotovoltaica, como a radiação visível e parte da radiação infravermelha e ultravioleta (Duarte; Lamberts, 2016).

Fisicamente falando, a radiação solar total que incide em dado um ponto na superfície da Terra pode ser dividido em três componentes principais: a radiação direta (que incide em linha reta do Sol), a radiação difusa (dispersa pelas partículas da atmosfera, as nuvens por exemplo) e a radiação refletida (que atinge uma superfície após ser refletida por elementos do entorno, comumente conhecido como albedo). Na Figura 21 é representado essas três componentes da radiação.

Figura 21: Esquema de funcionamento dos componentes da radiação solar.



Fonte: Instituto Solar. Disponível em: <<https://institutosolar.com/dimensionamento-de-sistemas-fotovoltaicos/>>.

Acesso de 14 de abril de 2025.

O conjunto dessas três componentes compõem a radiação solar global incidente em uma superfície receptora, e sua quantificação é essencial para estimar o potencial energético disponível para a geração de eletricidade em sistemas solares fotovoltaicos (Kreith; Kreider, 1978). A variação relativa entre essas parcelas depende das condições climáticas, do tipo de cobertura atmosférica e das características geométricas do sistema de captação, sendo, portanto, um parâmetro crítico na modelagem e no dimensionamento técnico-econômico de usinas solares.

A energia radiante proveniente do Sol pode ser quantificada por meio da *Lei de Planck*, que descreve a intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda e da temperatura. Embora o Sol não seja um corpo negro perfeito, ele se comporta de forma semelhante, e sua emissão pode ser aproximada com alta precisão pela equação 2:

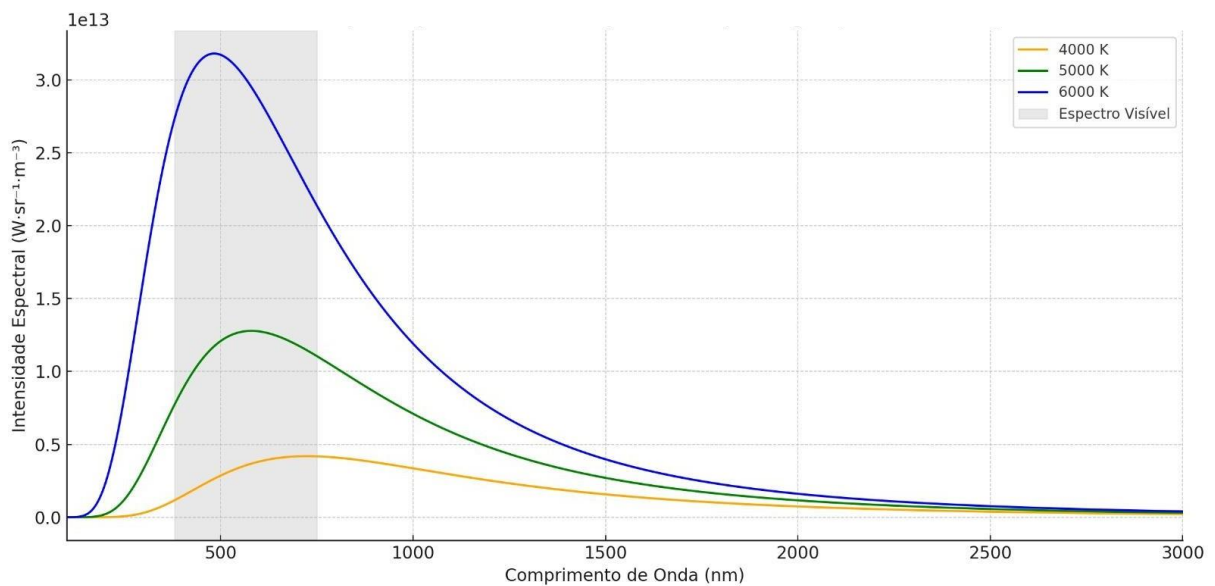
$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade espectral de energia por unidade de frequência, ν é a frequência da radiação, T é a temperatura absoluta do corpo (em kelvins), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J*s), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s) e k é a constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K).

Essa lei é fundamental para entender como a energia é distribuída entre diferentes frequências na radiação emitida por um corpo negro, como o Sol. A curva de Planck descreve, por exemplo, por que o Sol, com temperatura efetiva próxima de 5778 K, emite a maior parte de sua energia na faixa visível do espectro eletromagnético. O espectro solar consiste das radiações Ultravioleta (UV), Visível (VIS) e Infravermelho (IR), sendo dividido da seguinte forma, segundo dados dos Geodesign (2017):

1. Ultravioleta (UV): 3 a 5%
2. Visível (VIS): 42 a 43%
3. Infravermelho (IR): 52 a 55%

Figura 22: Distribuição espectral da Radiação de Corpo Negro (Lei de Planck).



Fonte: O autor do trabalho, utilizando código de programação em *python*, 2025.

Figura 22 acima mostra como a distribuição espectral da radiação de corpo negro (Lei de Planck) mostra como a intensidade da radiação emitida por um corpo negro varia com o comprimento de onda para diferentes temperaturas. Adicionando a faixa do espectro visível, que vai aproximadamente de 380 nm a 750 nm (área sombreada em cinza claro), vemos que, à medida que a temperatura do corpo negro aumenta, o pico de emissão desloca-se para comprimentos de onda menores, conforme previsto pela Lei de Wien. Isso significa que corpos mais quentes emitem maior intensidade de radiação em faixas mais energéticas do espectro, como o visível e o ultravioleta.

No contexto da radiação solar, o Sol, com uma temperatura superficial de aproximadamente 5778 K, tem seu pico de emissão justamente dentro da faixa visível, o que explica não apenas a luz natural que percebemos, mas também a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, que são projetados para aproveitar ao máximo essa faixa de radiação. Essa característica espectral é fundamental para entender o desempenho dos materiais semicondutores utilizados em células solares, uma vez que sua capacidade de conversão energética depende fortemente do comprimento de onda da radiação incidente.

- **Irradiância**

A irradiância é uma grandeza fundamental na análise do aproveitamento da energia solar, a mesma indica a quantidade de potência da radiação eletromagnética incidente sobre

uma determinada superfície por unidade de área. Segundo Duffie e Beckman (2013), essa medida é essencial para prever o desempenho de sistemas fotovoltaicos, uma vez que define o fluxo de energia solar disponível para conversão em eletricidade.

A Irradiância é representada pela razão entre a potência ou fluxo de energia radiante (Φ) que incide perpendicularmente e a área receptora (A), conforme a equação:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

Em que E é a irradiância (W/m^2), Φ é a potência ou fluxo de energia radiante incidente (W) e A é a área da superfície receptora (m^2). Na Física e no campo da engenharia solar, a irradiância é geralmente decomposta em três componentes principais: irradiância direta normal (DNI), irradiância difusa horizontal (DHI) e irradiância global horizontal (GHI).

A DNI refere-se à parcela da radiação solar que chega à superfície terrestre em linha reta, sem sofrer desvios ou dispersões atmosféricas, incidindo perpendicularmente a um plano orientado diretamente para o Sol. Essa forma de irradiância é altamente dependente das condições atmosféricas e da posição solar no céu. Por sua vez, a DHI é composta pela radiação solar que, após interações com partículas atmosféricas, como poeira, gotículas de água e nuvens, é espalhada em múltiplas direções e alcança a superfície mesmo em áreas sombreadas ou não diretamente iluminadas. Já a GHI representa a soma da irradiância direta projetada horizontalmente e da irradiância difusa sobre uma superfície plana e horizontal — sendo, por isso, a grandeza mais utilizada no planejamento de sistemas fotovoltaicos fixos, que são normalmente instalados com inclinações padronizadas ou em telhados residenciais (KREITH; Kreider, 1978). A relação entre essas componentes pode ser expressa pela seguinte equação 4:

$$\text{GHI} = \text{DNI} \times \cos(\text{ASZ}) + \text{DHI} \quad (4)$$

Onde *ASZ* (*Apparent Solar Zenith angle*) é o ângulo zenital solar aparente, isto é, o ângulo entre a direção do Sol e a linha vertical local [graus ou radianos]. O termo $\text{DNI} \times \cos(\text{ASZ})$ representa a projeção da componente direta da radiação sobre uma superfície horizontal. Isso se deve ao fato de que, quanto maior o ângulo zenital, ou seja, quanto mais próximo o Sol estiver do horizonte, menor será a quantidade de energia direta incidente sobre a superfície horizontal, devido ao aumento do caminho atmosférico percorrido pelos raios solares.

Portanto, a equação mostra que a GHI é composta pela fração da irradiância direta ajustada à inclinação horizontal da superfície, somada à irradiância difusa. Essa relação é

amplamente utilizada em sistemas de modelagem e simulação solar, especialmente quando se deseja converter dados de irradiância direta em irradiância global, ou vice-versa, em projetos de usinas fotovoltaicas.

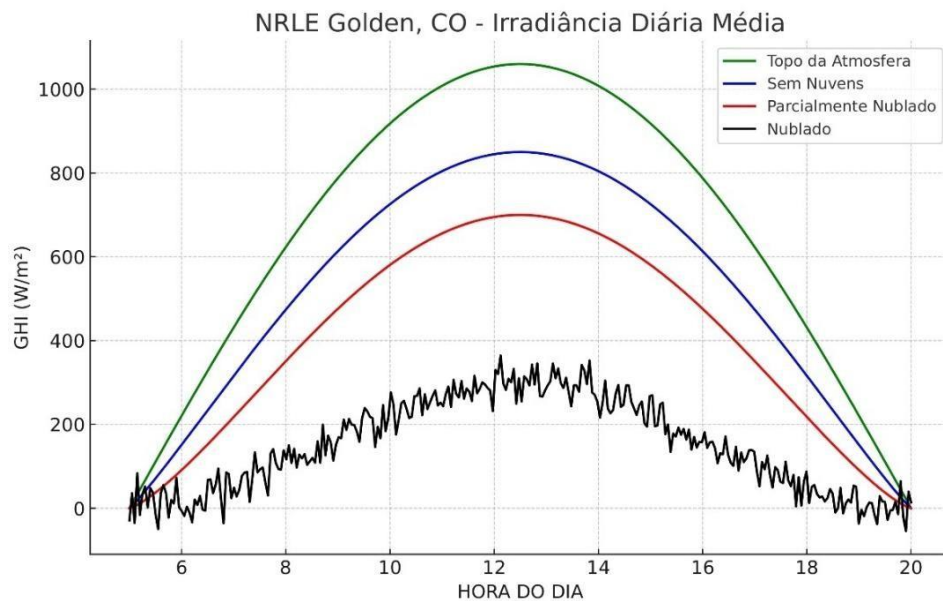
Além das três componentes principais apresentados da Irradiância (Direta, Difusa e Global), de acordo com o GeoDesign Internacional (2017), podemos citar outros valores da irradiância solar que podem ser medidos em uma instalação de usina solar fotovoltaica:

1. Irradiância Solar Global Normal (GNI: Global Normal Irradiance)
2. Irradiância Solar Global Inclinada (GTI: Global Tilted Irradiance)
3. Irradiância Solar Global Incidente no Plano Inclinado dos Módulos FV (POA: Plane of Array Irradiance)
4. Irradiância Solar Difusa Inclinada (DII: Diffused Inclined Irradiance)

Podemos ver que a irradiância solar é uma variável fortemente afetada por diversos fatores ambientais e astronômicos, como o horário do dia, a latitude do local, a estação do ano, a inclinação da superfície receptora e, sobretudo, as condições meteorológicas, incluindo diferentes coberturas de nuvem, umidade, presença de aerossóis e partículas em suspensão. Esses elementos interferem diretamente na quantidade e na qualidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre, promovendo variações significativas ao longo do tempo e do espaço.

A presença de nuvens densas, por exemplo, pode atenuar drasticamente a irradiância direta, elevando a contribuição da componente difusa. Da mesma forma, a altitude e a composição atmosférica de determinada região também influenciam a intensidade da radiação recebida. A Figura 23 abaixo mostra a atenuação da Irradiância quando expostas a diferentes condições.

Figura 23: Atenuação da irradiância solar incidente a diferentes condições atmosféricas.



Fonte: O auto do trabalho, adaptado de *GeoDesign Internacional*, utilizando código de programação em *python*, 2025.

Valores típicos de irradiância solar em dias claros podem atingir até 1000 W/m^2 ao meio-dia solar, sendo esse o valor adotado como padrão nos Ensaios Padrão de Teste (STC) para módulos solares (INMET, 2017). Essa grandeza varia de forma significativa ao longo do dia, do ano e entre diferentes regiões do globo, devido a fatores como latitude, altitude, condições atmosféricas, orientação e inclinação da superfície receptora. Tais variáveis são amplamente consideradas em simulações computacionais para o planejamento de usinas solares e para estimativas de geração energética.

Diante disso, para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos eficientes, é imprescindível a realização de um estudo detalhado do comportamento da irradiância local, de modo a garantir estimativas precisas de geração de energia e assegurar a viabilidade técnica e econômica do projeto.

- **Irradiação**

A irradiação solar pode ser definida como a energia radiante incidente por unidade de área sobre uma superfície, durante um determinado intervalo de tempo. Sua unidade de medida no Sistema Internacional (SI) é o joule por metro quadrado (J/m^2). Em contextos práticos de energia solar, especialmente no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, é comum

expressar a irradiação em quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m²), uma unidade que fornece uma melhor noção do potencial energético disponível ao longo do dia ou do ano (DUARTE; PEREIRA, 2011).

Do ponto de vista físico e matemático, a irradiação representa a integração temporal da irradiância ao longo de um período. Ou seja, enquanto a irradiância expressa a potência instantânea da radiação solar (W/m²), a irradiação corresponde à energia acumulada ao longo de um intervalo de tempo específico, como uma hora, um dia, um mês ou um ano. Assim, a relação entre essas grandezas pode ser expressa pela equação 5:

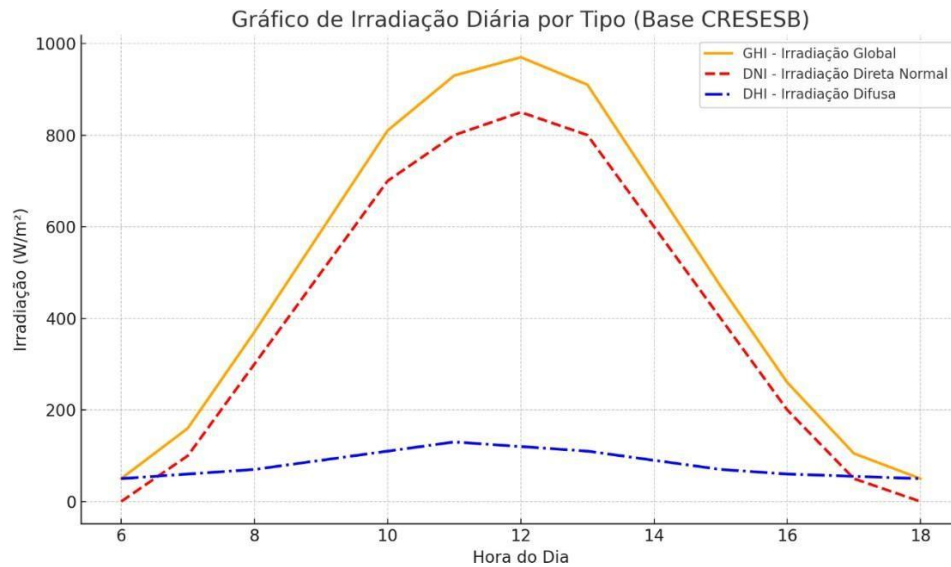
$$H = \int_{t_0}^{t_1} E(t) dt \quad (5)$$

Onde H é a irradiação (J/m² ou kWh/m²), $E(t)$ é a irradiância em função do tempo (W/m²) e t_0 e t_1 delimitam o intervalo de tempo considerado para a base de cálculos desejados.

A Irradiação solar assim como a Irradiância pode ser classificada em componentes de acordo com a trajetória e a natureza da radiação recebida pela superfície terrestre. A irradiação direta normal (Direct Normal Irradiance – DNI) refere-se à quantidade de energia solar que incide diretamente sobre uma superfície orientada perpendicularmente à posição do Sol no céu, sem qualquer interferência por obstáculos atmosféricos, como nuvens ou partículas. Essa componente é extremamente importante em sistemas que de rastreamento monitoramento solar, pois permite maximizar a captação de energia ao alinhar os módulos com a trajetória solar (Duffie; Beckman, 2013).

A irradiação difusa (Diffuse Horizontal Irradiance – DHI), por sua vez, corresponde à parcela da radiação solar que, ao ser dispersa pelas partículas presentes na atmosfera, como poeira, vapor d'água e nuvens, atinge a superfície terrestre em múltiplas direções distintas. Essa componente é significativa, especialmente em regiões com alta nebulosidade, onde a radiação direta é frequentemente bloqueada (Kasenburg et al., 2016).

Já a irradiação global (Global Horizontal Irradiance – GHI) representa a soma das componentes direta e difusa sobre uma superfície horizontal, sendo amplamente utilizada na análise do potencial solar para sistemas fotovoltaicos fixos, dada a sua capacidade de expressar o total de energia disponível em um plano estacionário (Perez *et al.*, 2001). A Figura 24 abaixo apresenta a resultante das componentes dos índices de Irradiação média em um dia, de acordo com a base de dados do CRESCB, 2025.

Figura 24: Resultante das componentes da Irradiação Solar.

Fonte: O auto do trabalho, adaptado de *CRESECB*, utilizando código de programação em *python*, 2025.

A quantificação precisa da irradiação solar média é fundamental para o planejamento e a viabilidade de sistemas fotovoltaicos. Dados de irradiação anual média em diferentes regiões são disponibilizados por algumas instituições, dentre podemos citar algumas principais:

1. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB)
2. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
3. Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN)
4. Sistema de Energia Solar Fotovoltaica (SWERA)
5. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)

As informações coletadas por esses centros de pesquisa são utilizadas para prever a produção de energia de sistemas solares fotovoltaicos e avaliar sua rentabilidade ao longo do tempo. Mais informações sobre os índices de pesquisa apresentados por essas fontes serão apresentadas no item 6.3.1. Análise dos Índices Energéticos Solares, na metodologia do trabalho.

Compreender as diferenças entre radiação, irradiância e irradiação é fundamental para interpretar corretamente os dados relacionados ao aproveitamento da energia solar. A Tabela 1 abaixo apresenta um breve resumo das características de cada fenômeno físico analisado:

Tabela 1: Características dos Recursos Solares.

TERMO FÍSICO	UNIDADE DE MEDIDA	TIPO DE GRANDEZA	DEFINIÇÃO FÍSICA
Radiação	-	Fenômeno físico	Emissão e propagação de energia por meio de ondas eletromagnéticas.
Irradiância	W/m ² (Watt por metro quadrado)	Potência por unidade de área	Quantidade instantânea de potência solar incidente sobre uma área
Irradiação	Wh/m ² (Watt-hora por metro quadrado)	Energia por unidade de área	Energia solar acumulada em uma área durante um período de tempo.

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

- **Efeitos de sombreamento**

O desempenho de um sistema fotovoltaico pode ser impactado por diversos fatores externos que tendem a reduzir sua eficiência. O mais relevante é a radiação solar, a qual está diretamente relacionada à posição geográfica do local de instalação, além da orientação e inclinação dos módulos. Outros aspectos como a temperatura dos painéis, sombreamento parcial, desbalanceamento entre módulos de uma mesma string, perdas nas conexões elétricas e o nível de sujeira acumulado sobre os painéis também exercem influência significativa sobre a produtividade do sistema (Rüther, 2004).

O sombreamento é um dos fatores que mais impactam negativamente a performance dos sistemas fotovoltaicos. Ele ocorre quando algum obstáculo, como árvores, edificações, antenas ou até mesmo o acúmulo de sujeira sobre os painéis, bloqueiam parcial ou totalmente a incidência da radiação solar sobre os módulos, reduzindo diretamente a geração de energia elétrica.

Essa redução é particularmente significativa em sistemas com ligação em série dos seus painéis, nos quais o sombreamento de um único módulo pode comprometer o desempenho de todo o arranjo ou “string”. Isso ocorre porque a corrente elétrica em circuitos em série é a mesma para todos os módulos, de forma que o módulo sombreado atua como um gargalo para os demais (GREEN, 1982).

Em um arranjo de painéis solares conectados em série, a corrente total do sistema é limitada pelo módulo de menor corrente, ou seja:

$$I_{string} = \min(I_1, I_2, I_3, \dots, I_n) \quad (6)$$

Onde I_{string} é a corrente da string inteira e I_n é a corrente de cada módulo. Isso significa que um único módulo sombreado reduz a produção total da string. Isso devido a potência total da *string* ser apresentada da seguinte maneira:

$$P = V_{string} \cdot I_{string} \quad (7)$$

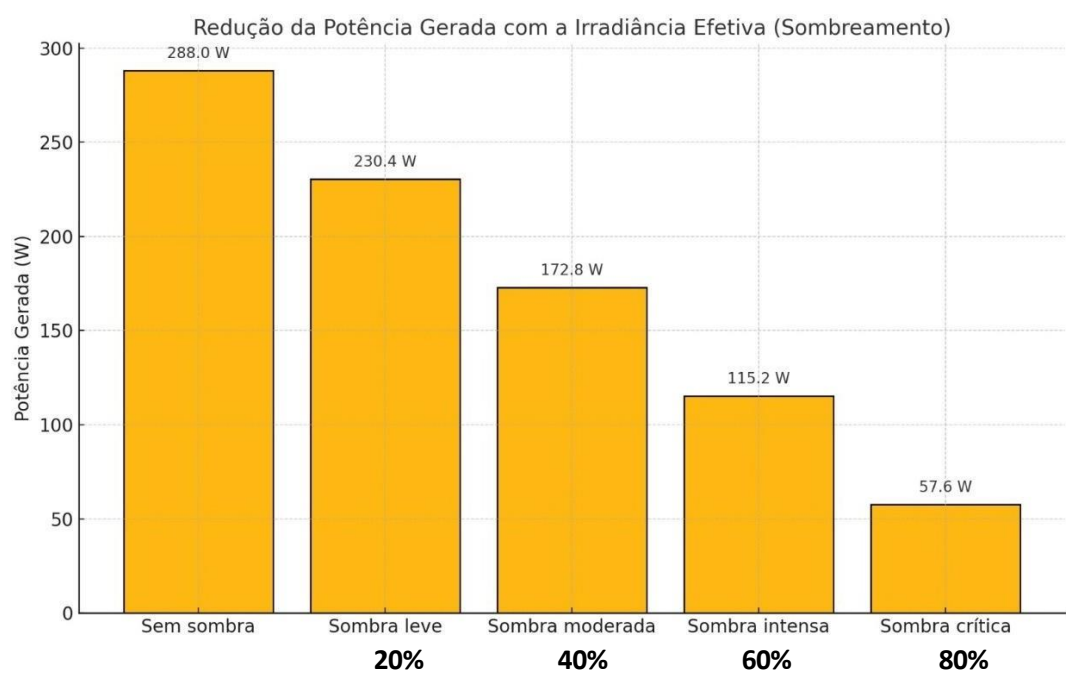
Logo, P será a potência total dessa string, V_{string} é a tensão total da string e I_{string} é a corrente da string inteira. Como a corrente da string é determinada pelo módulo mais fraco (módulo sombreado), a potência total também é afetada.

Baseado nisso, e sabendo que a redução dos índices de irradiância pelo efeito do sombreamento acontece quando algum obstáculo bloqueia parcial ou totalmente a luz solar que incide sobre a superfície do módulo fotovoltaico, temos um ponto de redução da irradiância efetiva ($G_{efetiva}$) disponível para conversão em eletricidade. Essa redução impacta diretamente a potência gerada (P) pelo painel, conforme a equação:

$$P = G_{efetiva} \cdot A \cdot \eta \quad (8)$$

Onde $G_{efetiva}$ é a irradiância efetiva sobre o painel (em W/m²), reduzida pela sombra, A é a área ativa do painel (em m²) e η é a eficiência do módulo. O sombreamento faz com que $G_{efetiva}$ diminua, o que reduz a potência proporcionalmente ao tamanho da causa. A Figura 25 abaixo mostra um comparativo para a redução de potência acarretada por diferentes níveis de sombreamento.

Figura 25: Esquema da redução da potência pelos níveis de sombreamento.

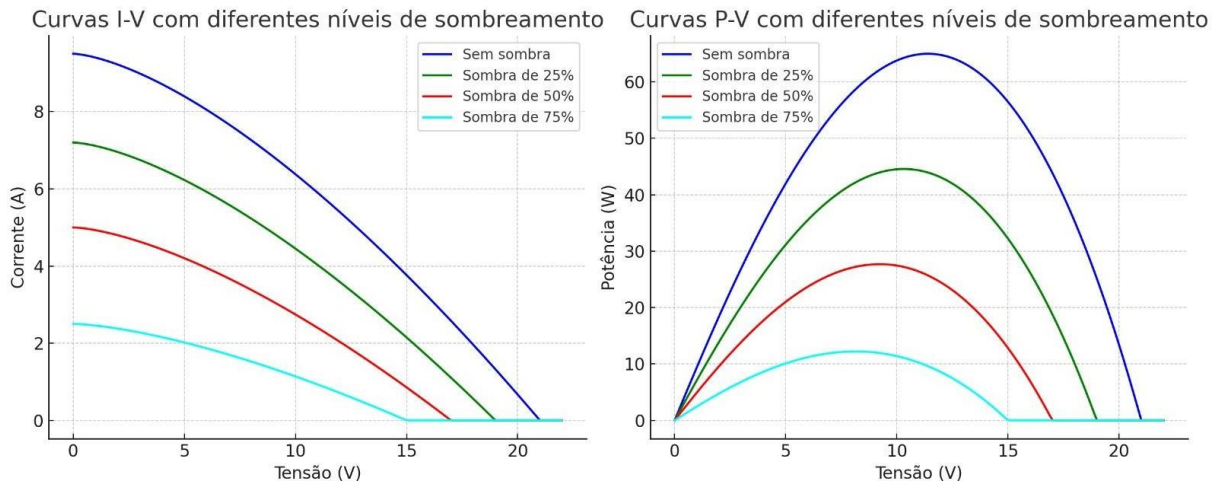


Fonte: O auto do trabalho, 2025.

Essa redução da irradiância efetiva pode ser visualmente compreendida a partir da análise das curvas características de um módulo fotovoltaico. As chamadas curvas I-V (corrente *versus* tensão) e P-V (potência *versus* tensão) demonstram, de forma prática, como o desempenho elétrico do painel se altera conforme variam as condições de iluminação. Quando a irradiância que incide sobre o módulo é reduzida — seja por sombreamentos parciais, acúmulo de sujeira, variações atmosféricas ou mesmo pela passagem de nuvens — percebe-se uma diminuição expressiva na corrente elétrica gerada. Como a potência fornecida é diretamente proporcional à corrente, há também uma queda proporcional na geração de energia.

Em situações mais severas, esse efeito pode causar distorções nas curvas, levando à presença de múltiplos picos de potência e dificultando o rastreamento do ponto de máxima potência (MPP) pelo inversor. Por isso, compreender essas curvas é fundamental para interpretar corretamente o comportamento real dos sistemas fotovoltaicos em campo e planejar estratégias de mitigação de perdas. A Figura 26 abaixo mostra as curvas características de um módulo fotovoltaico.

Figura 26: Curvas características de um módulo fotovoltaico.



Fonte: O auto do trabalho, utilizando código de programação em *python*, 2025.

As curvas apresentadas acima foram geradas com base em simulações computacionais, considerando percentuais de sombreamento de 0% (sem sombra), 25%, 50% e 75%. Os gráficos evidenciam:

1. A diminuição da corrente de curto-circuito (I_{sc})
2. A distorção da curva de potência, com múltiplos picos;
3. A queda do ponto de máxima potência ($P_{m\acute{a}x}$);
4. A perda global de eficiência do sistema.

Essas representações gráficas permitiram uma melhor compreensão do impacto físico dos efeitos de sombreamento sobre o desempenho dos sistemas fotovoltaicos e reforçam a importância de um projeto de implantação que leve em consideração os efeitos de obstruções, bem como a correta orientação e inclinação dos módulos.

O entendimento aprofundado de todos os conceitos físicos abordados foi etapa essencial para garantir a eficiência e a confiabilidade de um sistema solar fotovoltaico. Compreender essas variáveis permite não apenas projetar com maior precisão, mas também prever o comportamento do sistema em diferentes condições, otimizando sua performance e assegurando resultados técnicos e econômicos mais coerentes com a realidade da instalação.

6. METODOLOGIA

Neste ponto, descreveremos de maneira detalhada, a metodologia adotada neste trabalho, a qual tem como objetivos garantir uma abordagem sistematizada e analítica para apresentação de um estudo de viabilidade de implementação da matriz fotovoltaica na UFCG Campus de Cajazeiras. Todas as etapas metodológicas foram pensadas e organizadas de forma a abranger aspectos desde a fundamentação teórica apresentada até a análise dos impactos econômicos e ambientais, garantindo assim, que os resultados obtidos sejam embasados cientificamente e tenham aplicabilidade prática. A pesquisa se desenvolveu com base em métodos qualitativos e quantitativos, permitindo uma compreensão aprofundada dos fenômenos estudados e a obtenção de dados objetivos e mensuráveis.

O trabalho aqui desenvolvido caracteriza-se como uma pesquisa de cunho aplicada, uma vez que apresenta como objetivo a geração de conhecimento voltado para solucionar um problema específico. A pesquisa aplicada não busca apenas compreender fenômenos que estão sendo estudados, mas também apresentar soluções práticas e viáveis para problemas concretos. Dessa maneira, a investigação que está sendo proposta, pretende trazer contribuições tanto para o campo acadêmico quanto para o campo social. Além disso, a pesquisa apresentada também pode ser caracterizada como sendo do tipo exploratória e descritiva, sendo a pesquisa exploratória essencial para obtenção de um entendimento mais detalhado sobre o tema da transição energética e seus contornos no contexto educacional e ambiental. Já a pesquisa descritiva tem o intuito de registrar, analisar e interpretar os aspectos atrelados à geração de energia solar fotovoltaica, considerando algumas variáveis como potencial solarimétrico, eficiência energética e impacto socioeconômico.

Por outro lado, em relação à pesquisa bibliográfica realizada, a mesma se apresenta metodologicamente como um dos pilares fundamentais desse trabalho, pois permite trazer todo o embasamento teórico para a investigação que foi feita por meio da análise de materiais já consolidados sobre o tema. Para aprimorar a compreensão sobre a transição energética e a inserção da energia solar fotovoltaica no contexto global e nacional, foram consultadas fontes primárias e secundárias, como livros, artigos científicos, dissertações, monografias, teses e relatórios técnicos de instituições renomadas, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), os dados obtidos por meio dessas fontes foram utilizados para fundamentar aspectos normativos e

tecnológicos da implementação de sistemas fotovoltaicos.

Diante do crescimento notável da Inteligência Artificial (IA), fizemos uso da utilização da mesma na geração de planilhas para o dimensionamento da potência do sistema fotovoltaico, considerando variáveis como consumo médio, irradiação solar local e eficiência dos módulos utilizados, como vistas na geração de gráficos característico a partir de base de dados anexadas previamente. A DeepSeek IA também contribuiu para a realização de cálculos de viabilidade econômica, como estimativas de tempo de payback e economia projetada ao longo do ciclo de vida útil da usina. Esses dados auxiliaram na construção de cenários financeiros realistas e fundamentados, facilitando a tomada de decisões no processo de elaboração do projeto. Por fim, o trabalho buscará consolidar os dados levantados e apresentados por meio de uma avaliação quantitativa e qualitativa do ganho ambiental obtido com a implementação da usina, utilizando indicadores de sustentabilidade amplamente reconhecidos, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Tal levantamento permitiu demonstrar, com embasamento técnico, os impactos positivos do projeto, auxiliando na sua viabilidade e reforçando a importância da adoção de fontes renováveis para a geração de energia elétrica na matriz energética nacional e regional.

6.1 Matriz Elétrica Brasileira

A crescente demanda pela produção de energia elétrica é um dos desafios contemporâneos, a busca constante por sustentabilidade tem impulsionado o interesse por estudos aprofundados sobre a geração, distribuição e uso eficiente desse recurso. O desenvolvimento socioeconômico das nações, está estreitamente ligado à disponibilidade energética, sendo a eletricidade um dos insumos essenciais para quase todas as atividades humanas nos dias de hoje. A modernização dos sistemas de geração e transmissão de energia permitiu que regiões antes isoladas se tornassem polos urbanos e industriais, reafirmando o papel estratégico da eletricidade como vetor de transformação e inclusão social.

Diante disso, nas últimas décadas, uma abordagem mais crítica e consciente tem sido implementada acerca das fontes energéticas utilizadas, passando a considerar alguns fatores como a sustentabilidade ambiental, os custos sociais e os riscos associados à dependência de tecnologias com elevado impacto ecológico (Moraes, 2015).

Assad (2011), reforça que a adoção de múltiplas fontes fortalece o sistema elétrico nacional, permitindo maior tolerância diante de oscilações na oferta ou na demanda. Essa

multiplicidade de origens energéticas se torna ainda mais relevante quando se considera o cenário das mudanças climáticas e a necessidade de cumprir acordos internacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa.

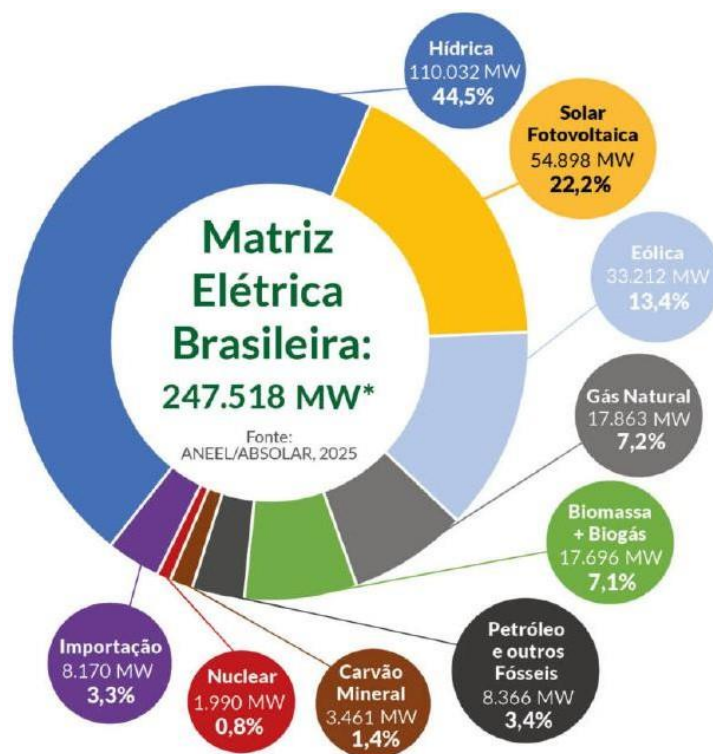
Quando nos referimos a matriz elétrica do Brasil, não podemos deixar e citar que o mesmo é um país riquíssimo em recursos naturais para a geração de energia elétrica, tendo grande parte dos seus investimentos do setor voltados para a fonte hídrica. Além dessa fonte, a diversificação da matriz elétrica a partir de fontes renováveis, além da hídrica, não parece ser difícil, pois o principal ele possui, que são os recursos naturais. Nesse aspecto nossa país apresenta um vasto número de condições favoráveis para justificar essa diversificação, tais como: boa incidência de vento, altos índices de irradiação solar, grande dimensão territorial, grandes mananciais de água, solo fértil para produção de biomassa e biocombustíveis, etc.

Por outro lado, a elevada dependência das usinas hidrelétricas compromete a segurança energética do país, especialmente em períodos de escassez hídrica. Podemos citar como exemplo o período de grande estiagem dos anos 2020 e 2021, onde país enfrentou a maior seca em 91 anos, afetando reservatórios essenciais nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Como resposta, foram adotadas medidas emergenciais, como a aplicação da bandeira tarifária, que impôs sobretaxas ao consumo para conter a demanda e compensar os altos custos de geração de energia (Dupont *et al.*, 2015).

Mesmo mediante isto, no Brasil as fontes hidroelétricas e as termoeletricas são consideradas fontes “firmes” por trazerem garantia ao atendimento da demanda no sistema elétrico nacional (SIN). Já por outro lado, as fontes renováveis como a solar fotovoltaica e a eólica ainda que consideradas fontes intermitentes devido à variabilidade temporal associada às condições meteorológicas, (Nascimento, 2017). A solar fotovoltaica e eólica nos dias atuais já se apresentam como a segunda e terceira fonte, respectivamente, com maior capacidade de geração da matriz elétrica nacional, segundo dados de março de 2025 fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

De acordo com os dados atualizado do final do mês de março de 2025, o Brasil possui em sua matriz elétrica 247.518 MW de potência instalada com a contribuição das diversas fontes de energias, como ilustrado na Figura 27 com base nos relatórios de março de 2025 da ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Figura 27: Matriz Elétrica Nacional atual em 2025.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso de 10 de abril de 2025.

De acordo com dados apresentados acima, vemos que 44,50% da capacidade instalada do país provém de usinas hidrelétricas, 22,2% da Solar Fotovoltaica, 13,4% da Eólica, enquanto a geração térmica a partir de combustíveis fósseis (Carvão Mineral, Petróleo e Gás Natural) responde por apenas 12,00%. Baseado nisso, a energia eólica e a solar tem crescido significativamente no país nos últimos anos, contribuindo para a redução da dependência de uma única fonte principal para geração de energia, além de colaborar para que a matriz elétrica continue sendo em sua maior parte, renovável. Segundo os dados apresentados, as fontes renováveis (Hídrica, Eólica, Biomassa e Solar Fotovoltaica) representam hoje cerca de 87,20% da oferta de eletricidade no Brasil (ANEEL, 2025).

Os mais de 247 GW de potência instalada com a contribuição das diversas fontes de energias apresentados na Figura 27 acima, compõe sistema elétrico do Brasil, onde o mesmo está quase todo conectado através do Sistema Interligado Nacional (SIN) sendo que essa característica permite considera-lo como único em âmbito internacional. A Figura 28 abaixo mostra toda distribuição atualizada do SIN.

Figura 28: Representação do Sistema Interligado Nacional (SIN).



Fonte: EPE: Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/mapa-do-sistema-interligado-nacional>>. Acesso de 13 de abril de 2025.

Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o SIN abrange cerca de 98,5% de toda a carga elétrica brasileira e integra as regiões Sudeste, Sul, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, dividido nos seguintes subgrupos:

- **Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO):** Abrange essas duas regiões do país, assim como os estados de Rondônia e Acre;
- **Subsistema Sul (S):** Corresponde toda a região sul do país;
- **Subsistema Nordeste (NE):** Engloba a região nordeste com exceção do Maranhão;
- **Subsistema Norte (N):** Abrange os estados do Amapá, Amazonas, Maranhão, Pará e Tocantins.

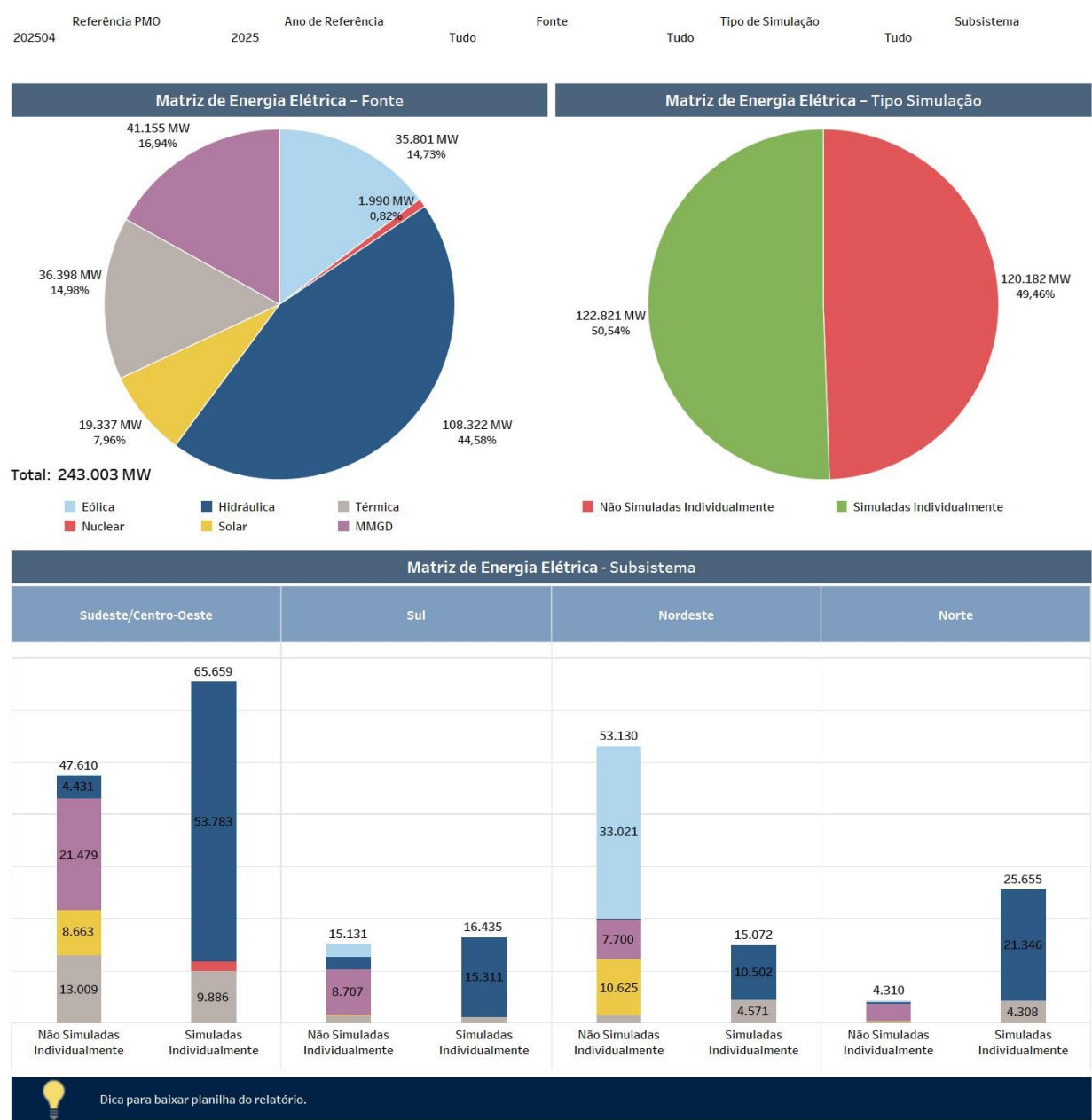
Além destes subgrupos, existem ainda os chamados sistemas isolados. Sendo que a maior parte dos sistemas isolados está na região Norte, nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Amapá e Pará. Essas áreas são atendidas por sistemas isolados, que geralmente utilizam termelétricas a óleo diesel ou outras fontes locais de geração, devido à grande dificuldade de acesso, baixa densidade populacional e alto custo de infraestrutura para integração com a rede nacional. Já por sua vez, Roraima é o único estado brasileiro que não está integrado ao SIN em nenhuma parte, tendo seu abastecimento feito parcialmente pela Usina Guri da Venezuela.

O principal motivo para o Brasil todo não estar 100% conectado ao SIN é a complexidade logística e econômica de interligar regiões remotas e de difícil acesso, onde o investimento para expansão da rede nacional não se justifica do ponto de vista financeiro, dadas as baixas demandas de energia e os altos custos de transmissão. Além disso, a preservação ambiental em áreas sensíveis, como reservas indígenas e unidades de conservação, também limita a expansão da infraestrutura elétrica nessas regiões.

Com base nos dados atuais de 2025 do ONS, podemos fazer uma análise da Matriz de Energia Elétrica conectada ao SIN e ver que divisão quase igual entre empreendimento simulados e não simulados evidencia a necessidade de aprimorar os modelos de planejamento energético para integrar essa nova realidade. Além disso, a distribuição desigual entre os subsistemas revela a importância de políticas regionais específicas para garantir segurança energética em todas as regiões do país.

Empreendimento simulados e não simulados se referem à forma como as usinas de geração de energia são tratadas nos modelos computacionais que o ONS e outras instituições que utilizam para prever e operar o sistema elétrico de forma eficiente e segura. Então com base nisso, a Figura 29 apresenta a Matriz Elétrica conectada ao SIN, com dados atualizados em abril de 2025.

Figura 29: Matriz Elétrica Nacional Conectado ao SIN, atualizada em abril 2025.



Fonte: ONS. Sobre o SIN: O sistema de números. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso de 10 de abril de 2025.

Na Tabela 2 abaixo são apresentadas algumas características principais que diferencial esses tipos de empreendimentos.

Tabela 2. Características de Empreendimento simulados e não simulados para a ONS.

CARACTERÍSTICAS	SIMULADOS INDIVIDUALMENTE	NÃO SIMULADOS INDIVIDUALMENTE
Porte	Médio a grande	Pequeno
Importância operacional	Alta	Moderada a baixa
Representação nos modelos	Detalhada e individual	Agregada (por blocos ou média)
Exemplos	Belo Monte, Itaipu, Angra	Painéis solares residenciais, PCHs

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Portanto, compreender a composição e a dinâmica do sistema elétrico brasileiro foi necessário para validar a viabilidade de alternativas sustentáveis, como a energia solar fotovoltaica. Embora o Brasil possua um vasto potencial para diversificação energética, boa parte dos empreendimentos ainda não é simulada individualmente nos modelos operacionais nacionais, refletindo a predominância de pequenas unidades de geração e sistemas distribuídos, principalmente de fontes renováveis. Portanto, a análise crítica da matriz elétrica atual, aliada ao entendimento da estrutura operacional do SIN e da classificação dos empreendimentos quanto à simulação, permite fundamentar a proposta deste trabalho.

6.2 Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

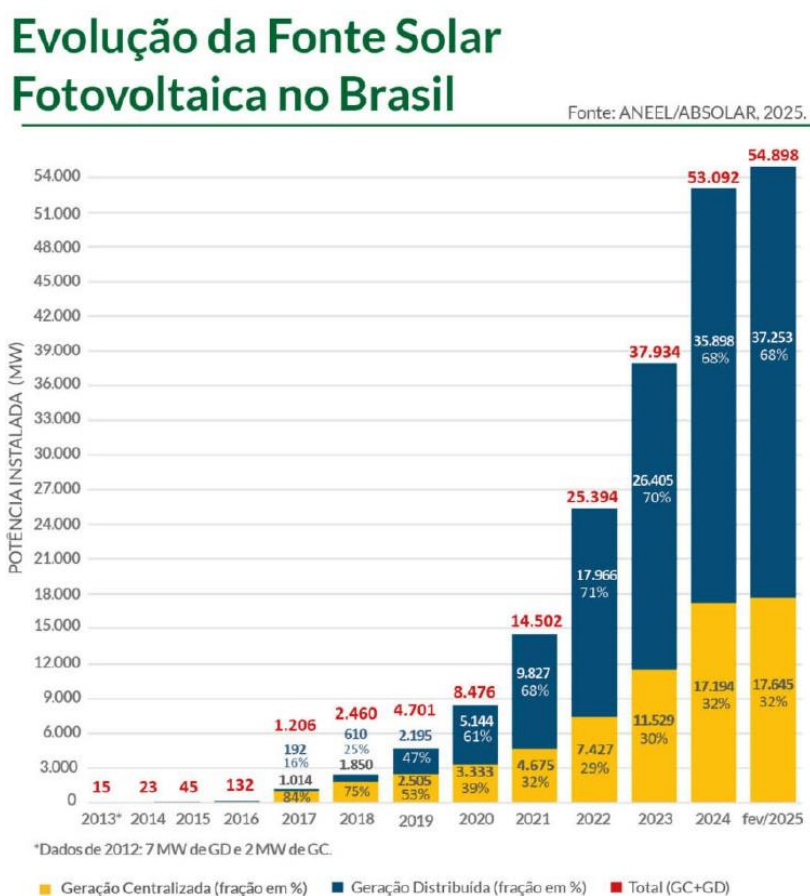
A energia solar fotovoltaica já se apresenta como a segunda maior fonte com capacidade de geração dentro do cenário elétrico no Brasil (ANEEL, 2025). Essa fonte tem se destacado como uma das alternativas mais promissoras e viáveis para diversificação da matriz elétrica brasileira. A urgência em mitigar os efeitos das mudanças climáticas, aliada à vulnerabilidade das hidrelétricas em períodos de estiagem e à necessidade de redução da dependência de fontes fósseis, impulsionou políticas públicas e investimentos voltados à implementação de sistemas solares fotovoltaicos em todo o território nacional.

Muitos desses incentivos começaram a serem introduzidos a partir do ano de 2012, onde com a regulamentação da geração distribuída pela Resolução Normativa nº 482 da

ANEEL, a energia solar fotovoltaica ganhou espaço nas residências, comércios e instituições públicas, marcando o início de uma nova era na democratização do acesso à produção energética no Brasil, a qual promoveu um impacto considerável no setor elétrico nacional, conforme declara o diretor geral da ANEEL (2019) “a geração distribuída equivale, no setor elétrico, à revolução do smartphone nas telecomunicações.” (André Pepitone - Diretor-Geral da Aneel).

Conforme os dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apresentados na Figura 27, o país ultrapassou em 2025 a marca de 54 GW de potência instalada em sistemas solares, sendo a geração distribuída responsável por mais de 68% desse total, conforme apresenta Figura 30.

Figura 30: Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil de 2013 a 2025.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso de 14 de abril de 2025.

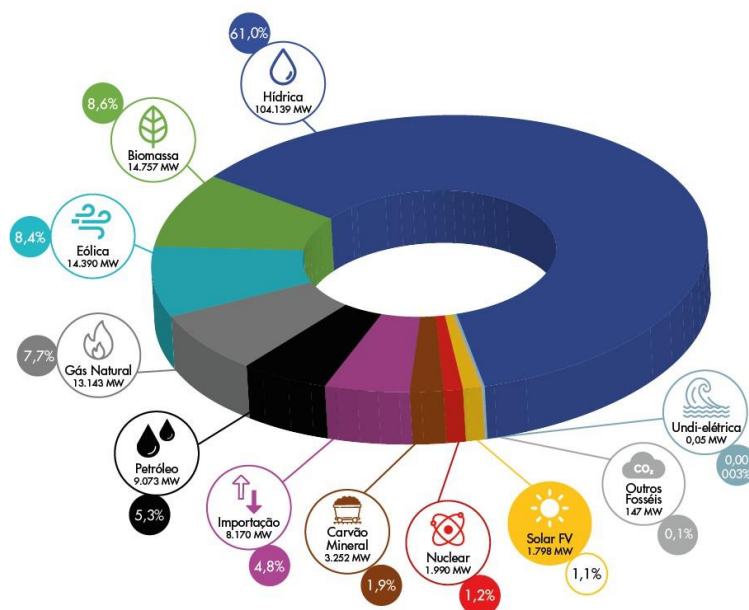
Dando sequência a análise evolutiva da matriz elétrica nacional, foi feita uma análise de dados comparativa com base nas informações disponibilizadas pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para apresentar a evolução da fonte solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira pegando o recorte entre os anos de 2018 à março de 2025.

Em 2018, energia solar fotovoltaica começou a apresentar um ritmo acelerado de crescimento no Brasil (Como pode ser visto na Figura 31), impulsionada por avanços regulatórios e pelo amadurecimento do setor e a regulamentação da geração distribuída pela Resolução Normativa nº 482 da ANEEL. Naquele ano, a participação da fonte solar na matriz elétrica brasileira ainda era modesta, representando apenas **1,10%** do total, com uma potência instalada de **1.798 megawatts (MW)**. Apesar da baixa penetração relativa, esse período já evidenciava o início de um processo de transformação, com mais **de 49.177 mil** sistemas fotovoltaicos conectados à rede e **60.090 mil** consumidores participando do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), segundo dados da ANEEL. Esse cenário refletia os primeiros efeitos da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, que estabeleceu as bases para a geração distribuída no país, promovendo o acesso descentralizado à produção de energia limpa e sustentável.

Figura 31: Matriz Elétrica Brasileira em 2018.

A Matriz Elétrica Brasileira

Fonte: ANEEL, 2018.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/arquivos/>>. Acesso de 15 de abril de 2025.

Quando avançamos para um cenário atual, para março de 2025, os números revelam uma verdadeira revolução no setor elétrico nacional em relação à energia solar fotovoltaica. A participação da fonte saltou para **22,2%** da matriz elétrica brasileira, o que representa um aumento de mais de vinte vezes em relação à fatia ocupada em 2018. Esse crescimento impressionante pode ser atribuído a uma conjunção de fatores, entre eles o elevado potencial solarimétrico do território nacional, a queda no custo dos equipamentos, o fortalecimento da cultura de sustentabilidade e a atuação conjunta entre setor público e privado na ampliação dos investimentos. A Figura 32 mostra o cenário atual na nossa matriz elétrica.

Figura 32: Matriz Elétrica Nacional em março de 2025.



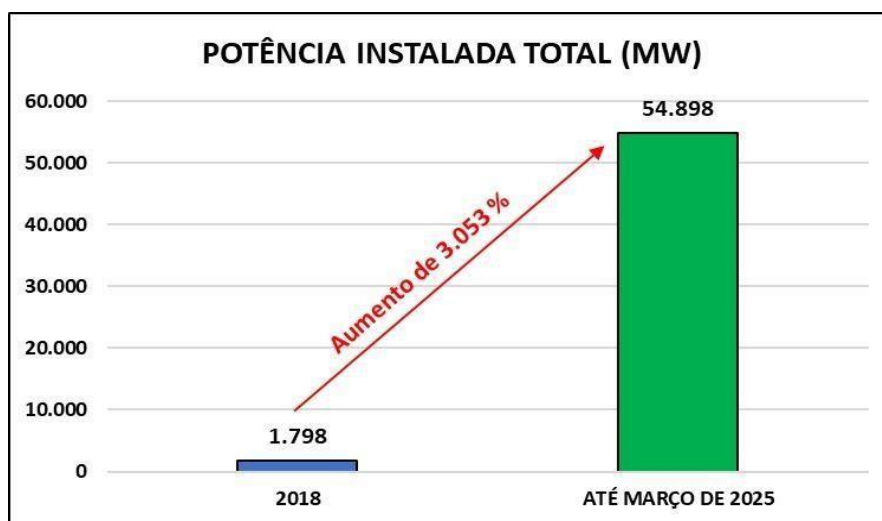
Fonte: ANEEL/ABSOLAR. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso de 10 de abril de 2025.

Como pôde ser observado na figura acima, a potência instalada total da fonte solar fotovoltaica atingiu **54.898 MW** em março de 2025, o que representa um crescimento aproximado de **3.053%** em apenas sete anos, consolidando a energia solar fotovoltaica como a segunda maior fonte do país em capacidade de geração, conforme representado no Gráfico 1.

Outro dado significativo é o crescimento expressivo no número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede na Geração Distribuída. Em 2018, havia cerca de **49.177 mil**

sistemas instalados, número que saltou para mais de **3.328.397 milhões** até março de 2025. Essa multiplicação representa um aumento aproximado de **6.768%** (Gráfico 2), o que indica uma massiva adesão por parte de residências, comércios, indústrias e produtores rurais à geração própria de energia. Consequentemente, o número de consumidores que recebem créditos de energia elétrica pelo SCEE também disparou: de **60.090** usuários em 2018 para **4.957.089** até março de 2025, um crescimento aproximado de **8.249%**, Gráfico 3. Esses dados revelam a consolidação de um modelo de geração energética mais democrático, participativo e adaptado às novas exigências de sustentabilidade e eficiência energética.

Gráfico 1: Evolução da Fonte Solar em Potência Instalada (MW).

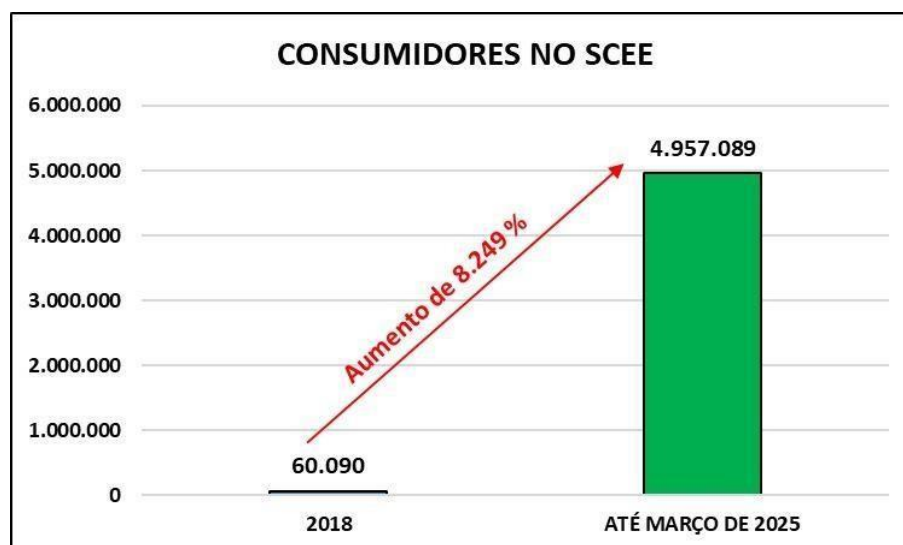


Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Gráfico 2: Evolução da Fonte Solar em Quantidade de Sistemas Conectados.



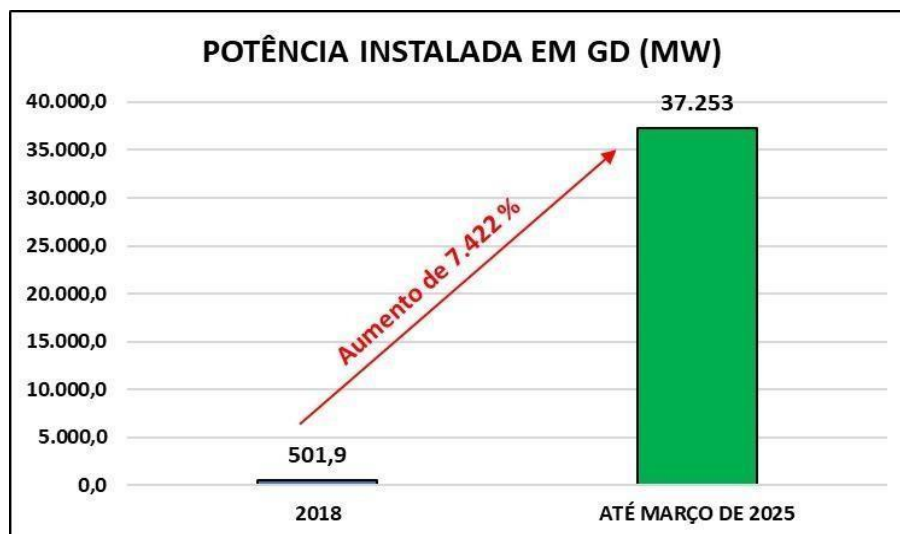
Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Gráfico 3: Evolução da Fonte Solar em Quantidade de Consumidores no SCEE.

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

No que diz respeito à geração distribuída, a energia solar fotovoltaica manteve-se como a tecnologia predominante ao longo de todo o período analisado. Em 2018, a fonte solar fotovoltaica já respondia por **99,5%** de todas as conexões de micro e minigeração no país, percentual que subiu para **99,98%** em 2025, evidenciando a hegemonia da tecnologia frente a outras fontes renováveis. A potência instalada em geração distribuída também apresentou um crescimento notável: de **501,90 MW** em **2018** para **37.253 MW** em **março de 2025**, o que representa um aumento de mais de **7.422%**, o Gráfico 4 mostra uma representação dessa evolução.

Este último número corresponde a **68%** da potência total da fonte solar fotovoltaica no país, conforme levantamento da ANEEL e ABSOLAR de março de 2025, demonstrando que a descentralização da produção energética não apenas se consolidou como uma alternativa viável, mas passou a representar a principal forma de inserção da energia solar na matriz elétrica brasileira. Esse dado revela uma transformação significativa no modelo tradicional de geração centralizada, indicando que consumidores de diferentes perfis — especialmente os residenciais — estão cada vez mais aderindo à produção própria de energia por meio de sistemas conectados à rede. Além de contribuir para a redução das perdas técnicas associadas à transmissão de longa distância, esse modelo favorece a democratização do acesso à energia limpa e renovável, promovendo autonomia energética e economia para os usuários.

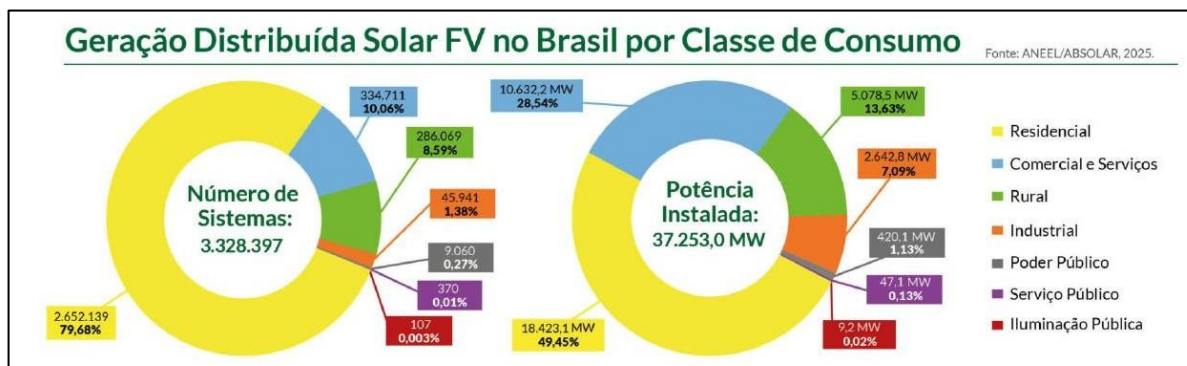
Gráfico 4: Evolução da Fonte Solar em Potência Instalada GD (MW).

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Esses resultados comprovam, portanto, o sucesso do modelo brasileiro de Geração Distribuída e reforçam a importância de políticas públicas consistentes e assertivas que garantam sua continuidade e expansão, incluindo a desburocratização de processos, incentivos fiscais, linhas de crédito facilitadas e marcos regulatórios que assegurem a estabilidade para investidores, usuários e instituições públicas interessadas em adotar a tecnologia. Tal base de fortalecimento, é essencial não apenas para a diversificação da matriz elétrica, mas também para o cumprimento das metas de sustentabilidade e redução das emissões de carbono estabelecidas nacional e internacionalmente.

Um ponto importante analisado, foram as diversas classes de consumo na Geração Distribuída solar fotovoltaica no Brasil, a categoria do **Poder Público** representa atualmente **0,27%** do total de sistemas instalados, com **9.060 conexões**, correspondendo a apenas **1,13%** da potência instalada (**420,1 MW**), segundo dados da ANEEL/ABSOLAR de 2025 e apresentados na Figura 33 abaixo. Esses números, embora modestos em comparação com outros setores, indicam um grande potencial ainda não explorado no segmento das instituições públicas. Universidades federais, escolas, prefeituras, hospitais e demais órgãos governamentais compõem essa categoria e, muitas vezes, apresentam elevado consumo energético, aliado a limitações orçamentárias que tornam os custos com energia um fator de peso nas despesas operacionais.

Figura 33: Geração Distribuída Solar no Brasil por Classe de Consumo.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso de 10 de abril de 2025.

A UFCG campus Cajazeiras, insere-se nesse contexto como uma instituição pública com grande demanda por energia elétrica, principalmente em laboratórios, bibliotecas, centros de aulas e climatização de ambientes. No entanto, diferentemente do que ocorre em residências ou comércios, o setor público ainda avança lentamente na adoção da energia solar distribuída. Essa realidade é motivada por desafios burocráticos, ausência de planejamento energético e, muitas vezes, falta de conhecimento técnico especializado nas etapas de projeto, instalação e operação dos sistemas.

Dessa maneira, o baixo percentual de participação do Poder Público na Geração Distribuída na fonte Solar Fotovoltaica no Brasil justifica e reforça a importância do projeto apresentado neste Trabalho, evidenciando não apenas sua viabilidade física, técnica e econômica, mas também sua relevância social, educacional e ambiental. A UFCG, ao investir em geração distribuída, pode se consolidar como referência regional em energia limpa e inovação sustentável, contribuindo para um modelo universitário mais autônomo, eficiente e ambientalmente responsável.

Portanto, com base nas análises apresentadas, é possível afirmar que a evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil representa uma transformação gigantesca na matriz elétrica nacional. O crescimento exponencial da potência instalada, do número de sistemas conectados e da adesão ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) entre 2018 e 2025 refletem não apenas o amadurecimento tecnológico e regulatório do setor, mas também uma mudança cultural na forma como a sociedade brasileira compreende e consome energia. Dessa forma, a trajetória ascendente da energia solar fotovoltaica no Brasil, impulsionada por políticas públicas eficazes e pelo engajamento de diversos setores da sociedade, comprova sua relevância como

pilar de um futuro energético mais sustentável, descentralizado e resiliente.

6.3 Mapeamento do Potencial Energético

A realização de um estudo de mapeamento do potencial energético é uma das etapas essenciais de qualquer proposta de viabilidade de implantação de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica. Esse tipo de análise permite compreender com precisão as condições climáticas, geográficas e solarimétricas específicas da área de interesse, garantindo que o sistema proposto atinja o máximo desempenho possível e performe da maneira projetada.

Essa parte do estudo é composta por diversas etapas que, em conjunto, permitem a construção de um panorama confiável do comportamento da radiação solar incidente sobre o local, elementos como os índices de irradiação solar, precisam ser rigorosamente avaliados. A depender da localização geográfica e das características estruturais do terreno ou dos telhados disponíveis, esses fatores podem alterar de maneira significativa a produtividade da instalação, tornando necessário adaptar as estratégias de projeto às condições reais do ambiente (CRESESB, 2008).

Dito isso, o mapeamento do potencial energético local fornece não apenas segurança técnica ao projeto, mas também assegura que as decisões tomadas ao longo de sua implementação estejam alinhadas com parâmetros aprimorados. Ele representa, portanto, uma ponte entre a análise teórica e a aplicação prática, fundamentando o projeto com dados reais, específicos e validados. A confiabilidade dessas informações será determinante para que os resultados obtidos estejam de acordo com as expectativas de geração, garantindo tanto a sustentabilidade energética da UFCG – Campus Cajazeiras, quanto a efetividade do investimento público na adoção de fontes renováveis.

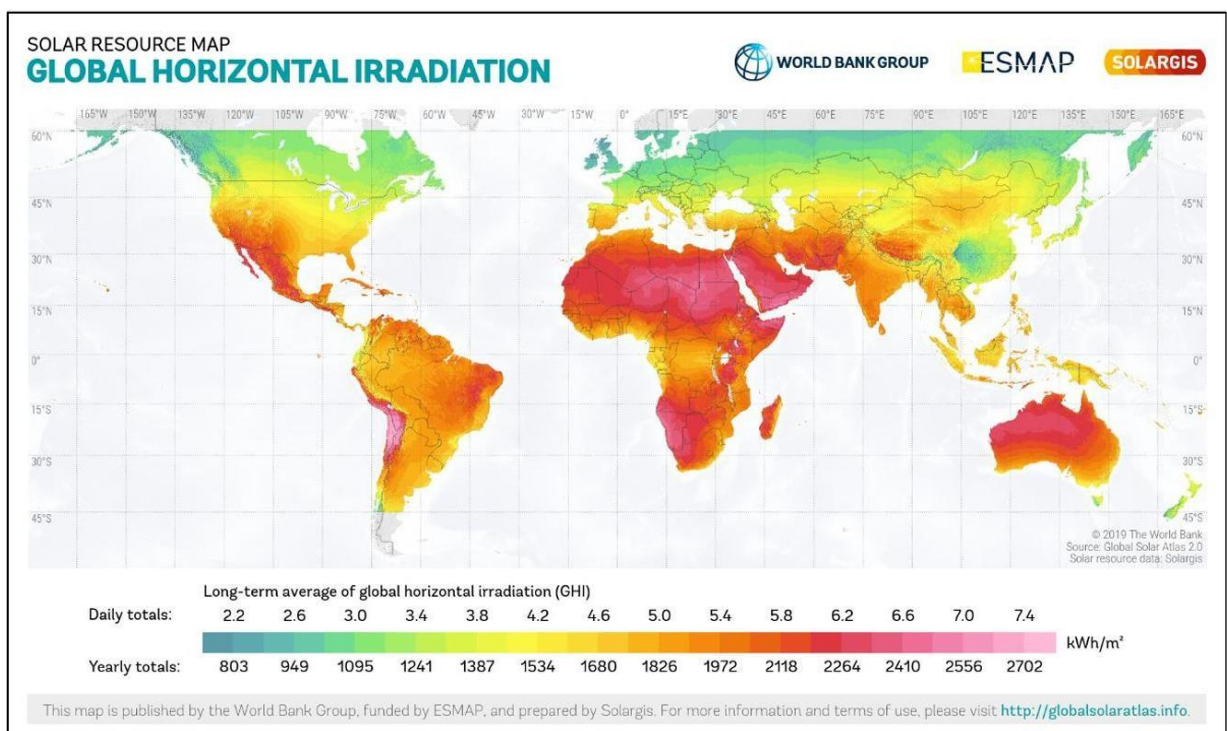
6.3.1 Análise dos Índices Energéticos Solares

A análise dos índices solarimétrico representa uma etapa necessária no processo de dimensionamento e avaliação da viabilidade de um sistema solar fotovoltaico. Compreender o comportamento da irradiação solar em uma determinada localidade permite realizar estimativas mais precisas da produção de energia, otimizando tanto a performance técnica quanto o retorno

econômico do projeto. A irradiação solar média anual é um dos principais indicadores utilizados para esse fim, sendo expressa geralmente em kWh/m² por dia ou por ano, dependendo da fonte consultada.

Do ponto de vista global, temos como base os dados do Mapa Solarimétrico Global, que mostrar com destaque potencial de irradiação global incidente no plano horizontal, vemos subsidio para analisar os índices solarimétricos em nosso país. A Figura 34 abaixo apresenta índices de Irradiação global incidente no plano horizontal.

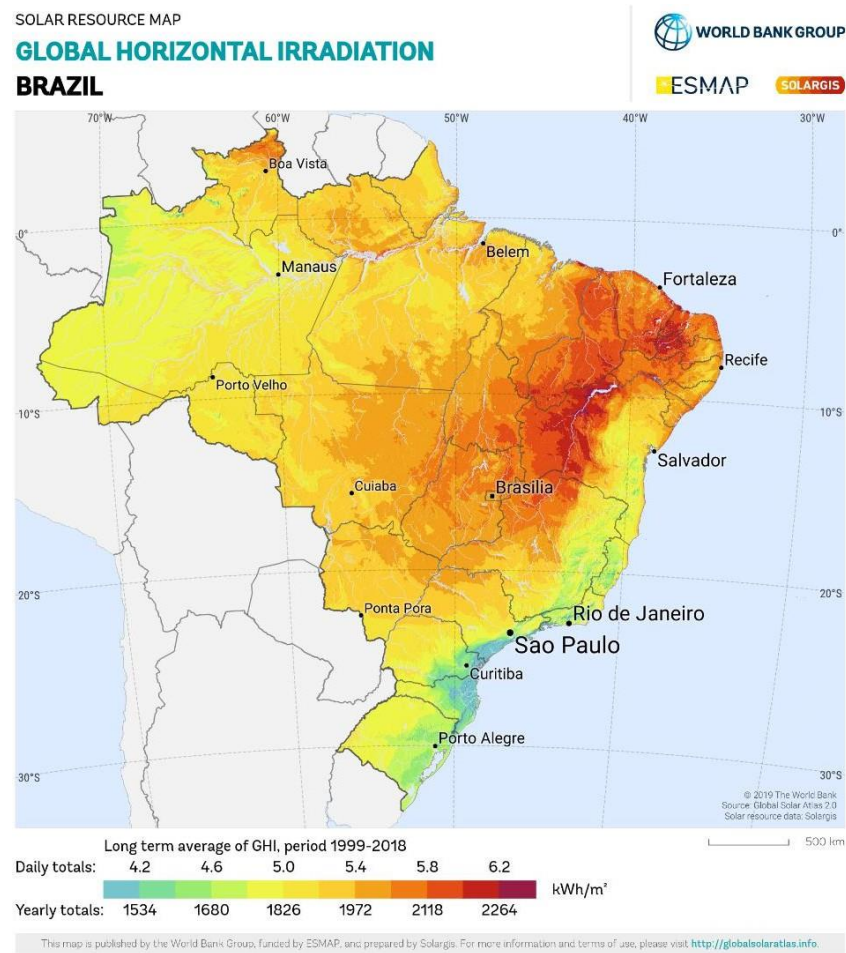
Figura 34: Mapa solarimétrico global, índices de irradiação.



Fonte: Atlas Solar Global. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em 15 de abril de 2025.

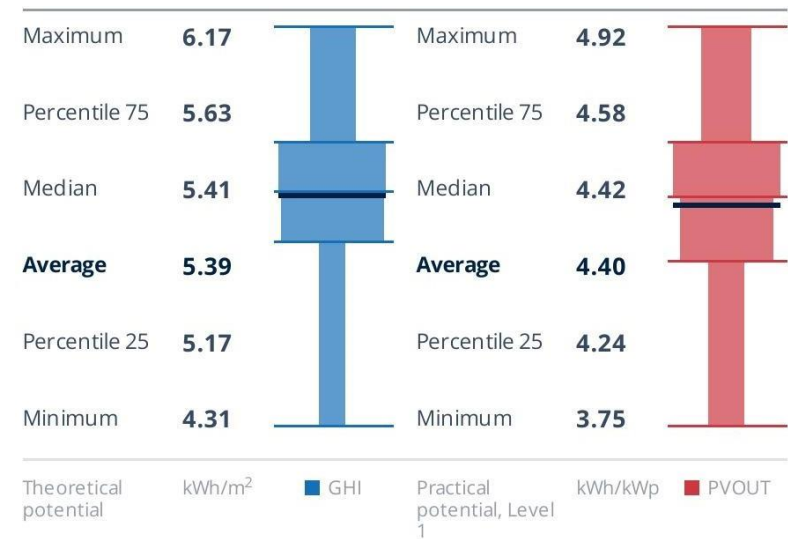
Analisado esse parâmetro em escala global, observa-se uma tendência consistente de alta disponibilidade de recurso solar em regiões próximas à linha do Equador. As Figuras 35 e 36 apresentam os índices de irradiação global no plano horizontal agora sob a perspectiva nacional, destacando as variações regionais dentro do território brasileiro. Nessa representação, torna-se evidente a significativa intensidade da radiação solar incidente sobre a Região Nordeste, que se sobressai como uma das áreas com maior potencial para aproveitamento da energia solar no país.

Figura 35: Irradiação global no plano horizontal no Brasil.



Fonte: Atlas Solar Global. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em 12 de abril de 2025.

Figura 36: Estatísticas de índices de irradiação GHI e PVOUT no Brasil.



Fonte: Atlas Solar Global. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em 12 de abril de 2025.

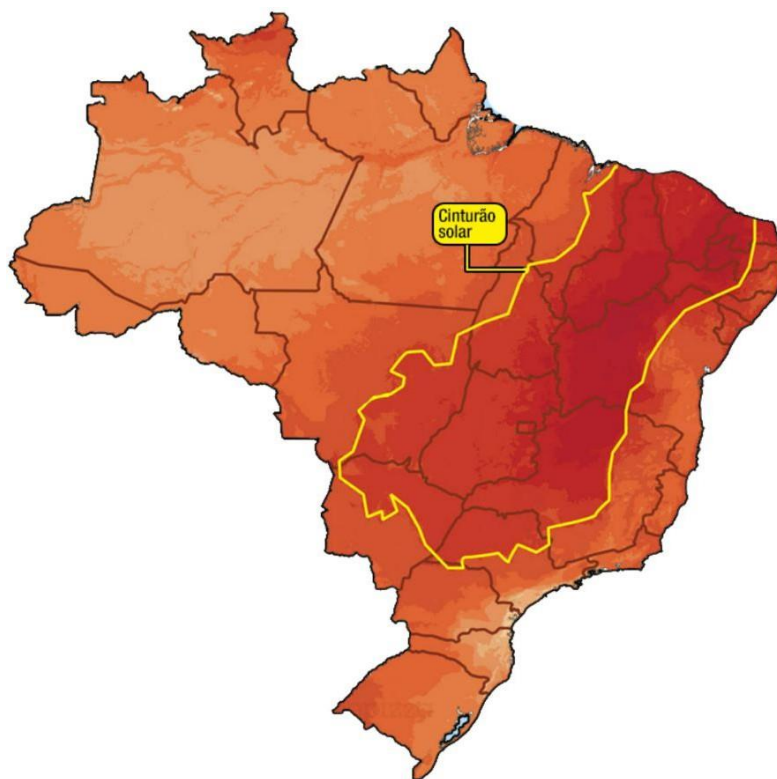
Com nos dados obtidos no Atlas Solar Global, é possível analisar a média da irradiação solar no Brasil a partir de dois parâmetros principais: o Potencial Teórico de Geração Solar, representado pela GHI (Global Horizontal Irradiation), e o Potencial Prático de Geração, representado por PVOOUT (Potência útil em kWh por kWp instalado).

A Figura 36 acima nos apresenta os seguintes dados: A média da irradiação solar teórica (GHI) no país é de aproximadamente 5,39 kWh/m².dia, com valores variando de um mínimo de 4,31 kWh/m² a um máximo de 6,17 kWh/m². Isso apresenta características que, em condições ideais, grande parte do território brasileiro recebe uma quantidade expressiva de radiação solar ao longo do ano. Já o potencial prático (PVOOUT), considera as perdas e limitações reais nos sistemas fotovoltaicos, o mesmo apresenta uma média de 4,40 kWh/kWp, com um intervalo entre 3,75 kWh/kWp (mínimo) e 4,92 kWh/kWp (máximo). Esses dados confirmam a excelente aptidão do país para a geração de energia solar fotovoltaica, mesmo considerando fatores técnicos e operacionais que afetam o desempenho dos sistemas no país, (Global Solar Atlas, 2020).

No contexto nacional, destaca-se uma área denominada “Cinturão Solar”, uma extensa faixa que se estende do Nordeste ao Pantanal brasileiro (Figura 37), com especial destaque para o sertão da Bahia e grande parte do território de Minas Gerais. Essas regiões apresentam o maior potencial de aproveitamento da energia solar do país. Esse potencial extraordinário é atribuído, principalmente, à localização geográfica privilegiada, próxima à linha do Equador, o que proporciona elevada incidência de radiação solar ao longo do ano. Além disso, o predomínio do clima semiárido, caracterizado por baixos índices de nebulosidade, longos períodos de estiagem e elevados níveis de insolação diária, contribui significativamente para a estabilidade e a intensidade do recurso solar disponível.

Tais características tornam o Cinturão Solar uma área estratégica para o desenvolvimento de projetos de geração de energia fotovoltaica em larga escala, não apenas pela abundância do recurso solar, mas também pela possibilidade de garantir maior eficiência e previsibilidade na geração ao longo do ano. Além disso, o investimento em energia solar no Cinturão Solar impulsiona o desenvolvimento regional, promovendo a geração de empregos, inovação tecnológica e atração de novos investimentos, elementos fundamentais para uma transição energética sustentável e alinhada com os compromissos ambientais globais

Figura 37: Área demográfica do “cinturão solar”.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em: <<https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/58353>>.

Acesso em 12 de abril de 2025.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os valores médios de irradiação horizontal global (GHI) no Nordeste variam entre 5,5 e 6,5 kWh/m² dia, colocando a região entre as mais promissoras do mundo para a exploração de sistemas solares fotovoltaicos (INPE, 2017).

Analisando agora os índices a um cenário local, a cidade de Cajazeiras-PB, localizada no alto sertão paraibano, insere-se exatamente nesse contexto, apresentando elevados índices de insolação e, por consequência, grande potencial energético solar. Para a coleta dos dados necessários ao dimensionamento (que será utilizado para o método empírico, manual) da usina e às estimativas de geração média mensal de energia, serão utilizadas duas bases de dados principais e confiáveis, amplamente reconhecidas: o CRESESB e o LABREN.

Por meio das análises dessas duas fontes de dados, será possível observar a convergência nos valores médios de irradiação solar da cidade de Cajazeiras, reforçando sua viabilidade como local ideal para a implantação de uma usina solar fotovoltaica na UFCG campus Cajazeiras. Etapa essa que consolida, assim, a base energética que sustentará as simulações a serem realizadas na sequência deste trabalho.

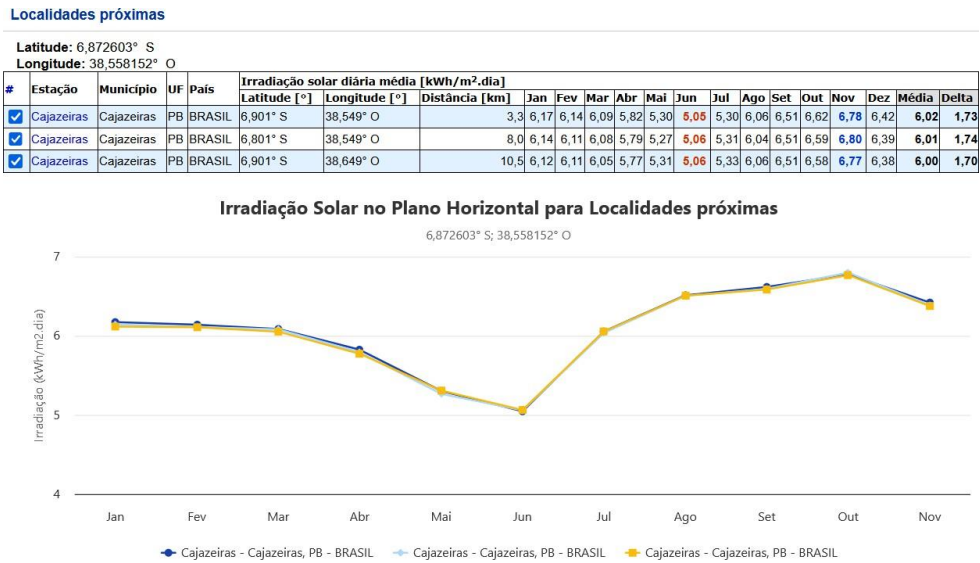
- **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB)**

O CRESESB é uma das fontes mais confiáveis para a consulta de dados solarimétricos no Brasil. Vinculado ao CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), o CRESESB disponibiliza mapas e tabelas com valores de irradiação solar média diária em todo o território nacional, em diferentes inclinações e orientações. Nele é possível verificar o potencial solar de uma região utilizando dados de latitude e longitude do local de interesse e assim faremos, vamos utilizar a localização geográfica da UFCG campus cajazeiras, que é -6.872603, -38.558152.

Partindo disso, acessamos o CRESESB e buscamos por “Potencial energético” depois indo para “Potencial Solar” e agora para a parte de adicionar a Coordenada Geográfica desejada. Os dados obtidos serão apresentados em forma de tabela e gráficos, contendo no título o nome da localidade, a unidade federativa correspondente (ou o país, se for fora do Brasil), suas coordenadas geográficas e a distância, em linha reta, entre o ponto selecionado e o local de referência.

As tabelas e gráficos exibirão os valores médios mensais de irradiação solar diária (em kWh/m².dia) ao longo de todo o ano, iniciando por janeiro, nos planos Horizontal e de Ângulo igual a latitude. Além disso, serão destacados os valores mínimo e máximo de irradiação média mensal, a média anual e a variação entre os extremos (Delta), oferecendo uma visão abrangente do potencial solar da região analisada.

Figura 38: Irradiação Solar no Plano Horizontal para UFCG campus Cajazeiras.

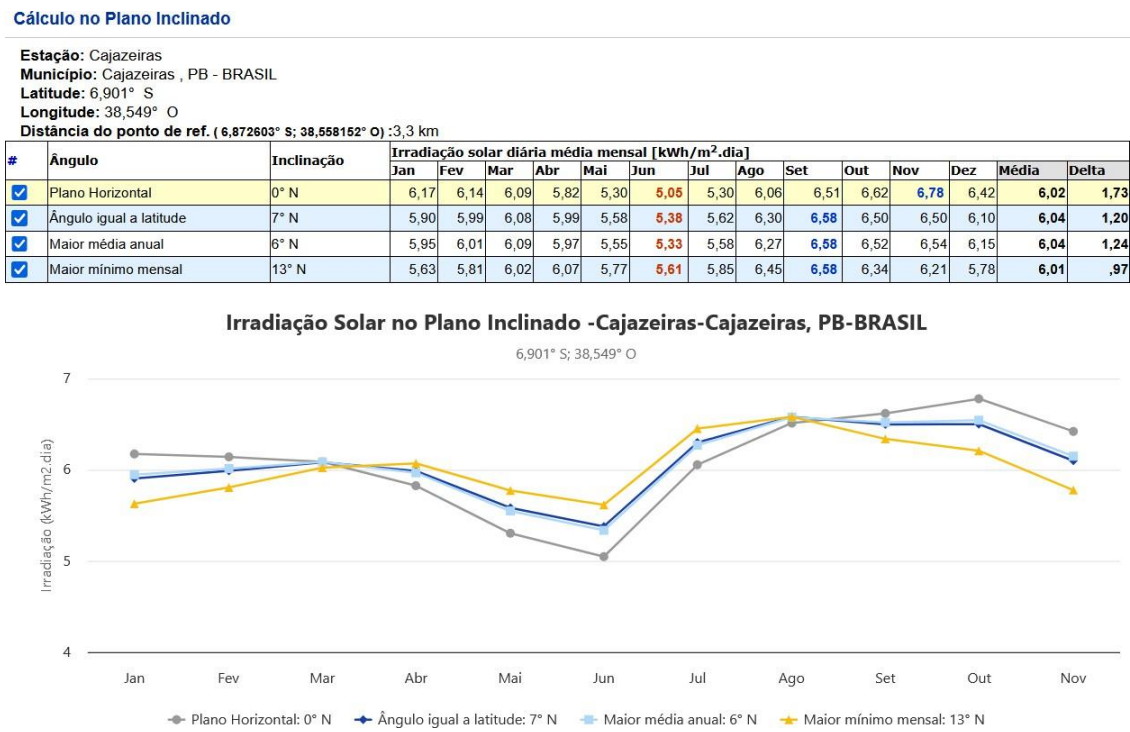


Fonte: CRESESB. Potencial Solar - SunData v 3.0. Disponível em:
<<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em 18 de abril de 2025.

A Figura 38 mostra os valores obtidos para os índices de Irradiação Solar no Plano Horizontal. No processo de dimensionamento de uma usina solar fotovoltaica, a escolha da base de dados de irradiação mais adequada é fundamental para garantir a precisão dos resultados projetados. Nesse sentido, considera-se ideal a utilização da **irradiância no plano inclinado**, uma vez que os módulos solares são comumente instalados em superfícies inclinadas, com ângulo otimizado conforme a latitude da localidade. Essa abordagem permite uma estimativa mais realista da energia efetivamente captada pelos módulos ao longo do ano, considerando a orientação e a inclinação específicas do sistema (CRESESB, 2025).

Embora os dados de irradiância global horizontal (GHI) sejam amplamente utilizados como referência para medições, eles não refletem com precisão a energia recebida pelas superfícies inclinadas dos módulos. A Irradiação no plano inclinado, por outro lado, agrega as componentes direta e difusa da radiação solar, ajustadas à disposição da instalação, o que torna essa métrica mais próxima da realidade operacional. Dessa forma, para garantir maior confiabilidade nos estudos de viabilidade e nas simulações realizadas por softwares especializados como *PV*SOL* e *PVSyst*, a adoção da irradiância no plano inclinado é a alternativa mais tecnicamente apropriada. Logo, na figura 39 serão apresentados os dados fornecidos para o plano inclinado na localidade da UFCG campus Cajazeiras.

Figura 39: Irradiação Solar no Plano Inclinado para UFCG campus Cajazeiras.



Fonte: CRESESB. Potencial Solar - SunData v 3.0. Disponível em:
<<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em 18 de abril de 2025.

Foram disponibilizadas três localidades de coleta de dados próximas ao ponto de referência do campus da UFCG em Cajazeiras, com distâncias lineares de 3,3 km, 8,0 km e 10,5 km, respectivamente. Considerando os princípios da análise energética local, optou-se pela utilização dos dados provenientes da localidade mais próxima, a 3,3 km de distância. Essa escolha se justifica pela maior representatividade das condições climáticas e geográficas do local de implantação da usina, reduzindo margens de erro associadas a variações microclimáticas.

Como apresentado nos resultados obtidos acima na Figura 39, para a Irradiação no Plano Inclinado, foram apresentados três diferentes ângulos de inclinação em relação ao plano horizontal: o ângulo igual à latitude, o ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação solar, o ângulo que fornece o maior valor mínimo diário anual de irradiação solar. A escolha de quais índices utiliza, vai de acordo as especificidades do projeto e do perfil de consumo, bem como inclinação ideal dos módulos fotovoltaicos na instalação. Vamos analisar índices obtidos para os três diferentes ângulos de inclinação, de acordo com as próprias indicações do CRESESB. A Tabela 3 apresenta o comparativo entre as estratégias propostas.

Tabela 3. Comparativo de Estratégias para escolha do Ângulo de Inclinação.

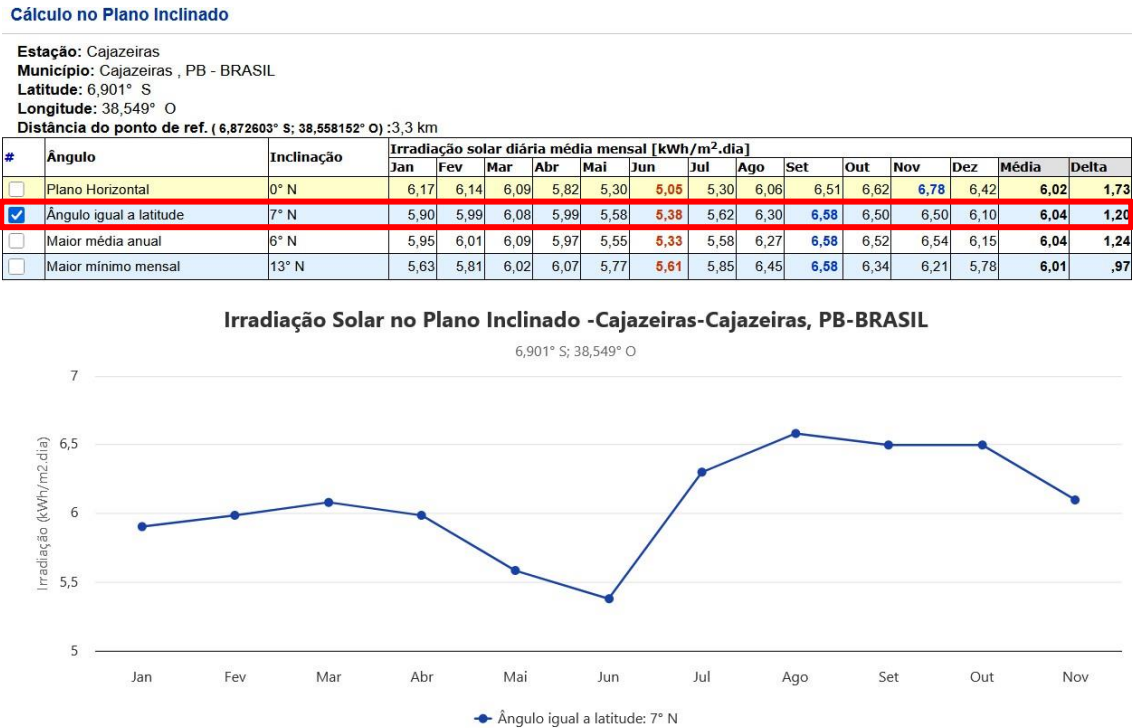
CRITÉRIO DE ESCOLHA	OBJETIVO PRINCIPAL	VANTAGENS	APLICAÇÕES COMUNS	OBSERVAÇÕES TÉCNICAS
Ângulo igual à latitude	Geração equilibrada ao longo do ano	Simples de calcular, boa produção anual, estabilidade	Usinas de pequeno e médio porte: residências, instituições públicas, comércios	Aproximadamente igual à latitude local (Cajazeiras $\approx 6,88^\circ$ Norte)
Ângulo que fornece o maior valor médio anual de irradiação solar	Maximizar a produção total anual de energia	Garante o maior retorno energético no ano inteiro	Usinas de médio e grande porte: geração para venda	Geralmente próximo à latitude local, pode variar levemente ($\pm 2^\circ$ a $\pm 5^\circ$)

Ângulo que fornece o maior valor mínimo mensal de irradiação solar	Garantir geração mínima durante o mês mais crítico	Evita quedas bruscas na geração nos meses com menor insolação (ex: junho/julho)	Sistemas off-grid, locais isolados, aplicações críticas	Inclinações geralmente maiores que a latitude, otimizadas para meses de baixa irradiação
--	--	---	---	--

Fonte: O autor do trabalho, adaptado CRESC, 2025.

Considerando então que o projeto visa a implantação de uma usina solar fotovoltaica conectada à rede pública, com foco em suprir o consumo energético de uma instituição pública com carga distribuída ao longo do ano, o ângulo mais adequado é o **Igual à latitude local**.

Figura 40: Irradiação Solar no Plano Inclinado de ângulo igual a latitude, para UFCG campus Cajazeiras.



Fonte: CRESESB. Potencial Solar - SunData v 3.0. Disponível em:

<<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em 18 de abril de 2025.

A Figura 40 acima apresenta os dados coletados para a base de cálculo no Plano Inclinado ao Ângulo igual a latitude (destacado de vermelho). A análise do gráfico obtido pelo CRESESB, referente à irradiação solar no plano inclinado com ângulo igual à latitude de Cajazeiras (6,9°), evidencia uma variação significativa nos índices mensais de irradiação ao longo do ano. Essa oscilação impacta diretamente a performance de geração da usina solar, pois a produção de energia fotovoltaica está diretamente relacionada à quantidade de radiação solar incidente sobre os módulos.

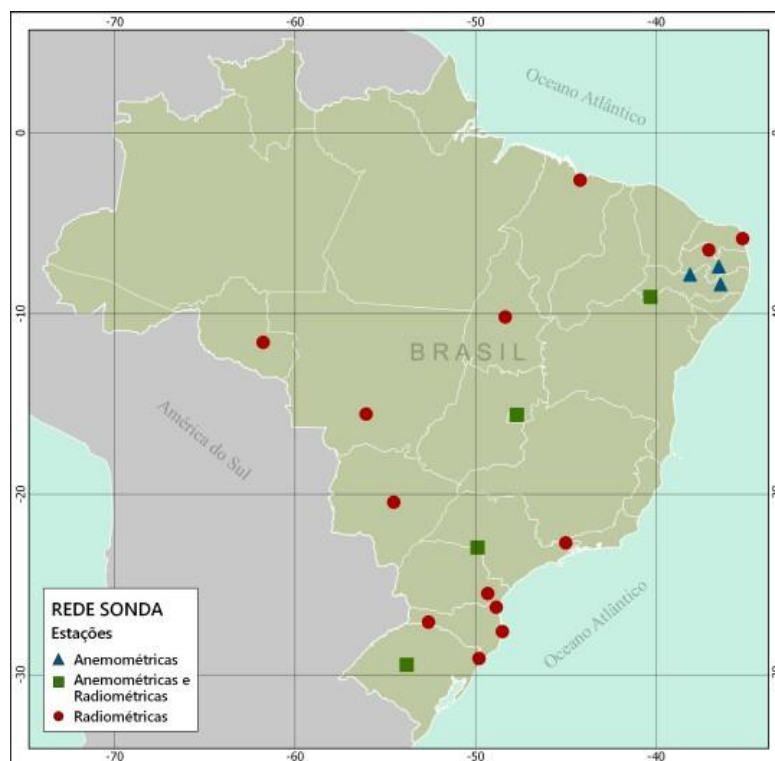
Nos meses com menor irradiação média diária, como junho e maio, a geração tende a ser reduzida, enquanto nos meses de maior irradiação, como agosto e setembro, a produção é maximizada. Esse comportamento sazonal deve ser considerado no dimensionamento do sistema, para garantir o atendimento da demanda energética mesmo nos períodos de menor geração, assegurando eficiência, estabilidade e viabilidade econômica ao projeto.

- **Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN)**

Outro importante banco de dados utilizado para a obtenção de índices energéticos solares nacionais é o do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), sendo uma das divisões do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para sua base de dados, o LABREN tem sua rede de Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) de coleta de dados composta por estações solarimétricas medindo radiação solar incidente global, difusa, direta normal, PAR, iluminância, espectrofotometria solar e dados meteorológicos complementares. A Figura 41 abaixo mostra os pontos a disposição no território nacional das estações solarimétricas do SONDA.

A coleta de dados solarimétricos junto ao LABREN, é feita por meio do Atlas Brasileiro de Energia Solar, onde o mesmo possibilita o acesso a informações detalhadas sobre os índices de irradiação solar no território nacional. Esses dados estão organizados com ampla abrangência espacial, permitindo consultas em escala nacional, estadual, municipal ou em pontos geográficos específicos, conforme a necessidade do estudo.

Figura 41: Localização das estações SONDA.



Fonte: INPE. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, SONDA. Disponível em:

<https://sonda.ccst.inpe.br/index.html>. Acesso em 18 de abril de 2025.

A base de dados do LABREN é composta por um total de 72.272 registros, nos quais constam as médias anuais e mensais do total diário das componentes de irradiação: Global Horizontal, Difusa, Direta Normal, no Plano Inclinado e PAR, expressas em Wh/m².dia, (LABREN, 2025).

Dito isso, o próximo passo foi realizar a consulta da base de dados para obtenção dos índices de irradiações nas sedes dos municípios e capital de cada estado e com isso encontrar valores de locais específicos. A Figura 42 apresenta a disposição do layout da página que a consulta foi realizada.

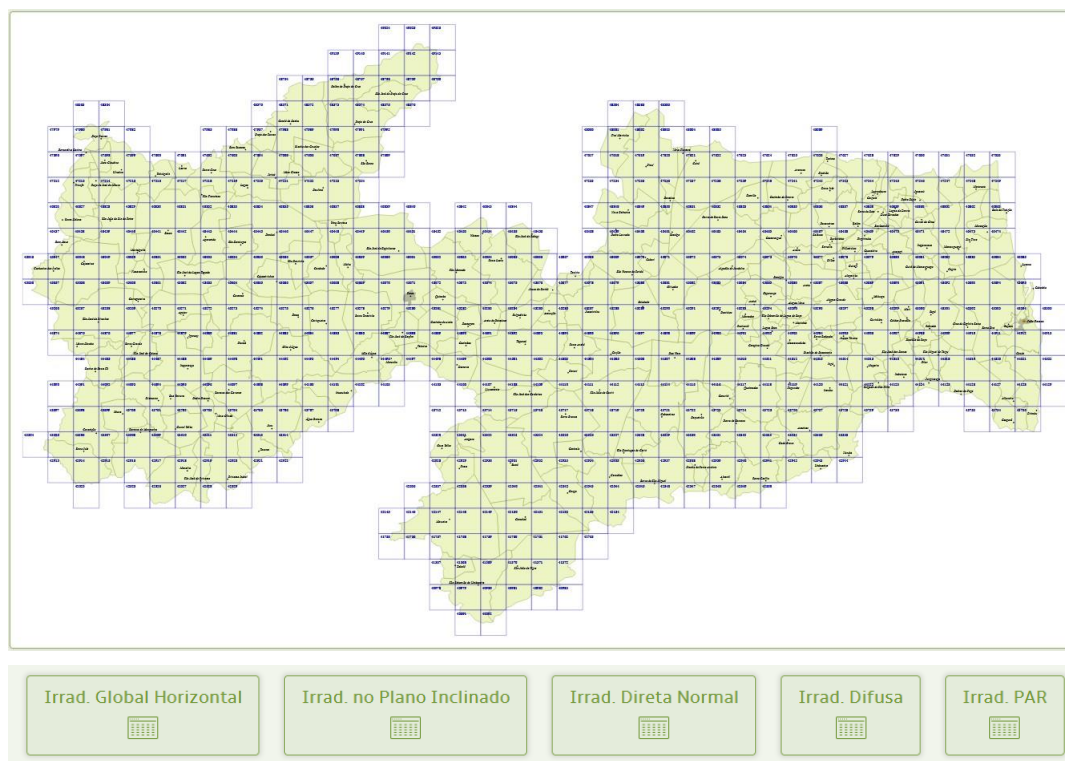
Após isso, foi selecionado o estado da Paraíba na interface acima, o que direcionou a visualização para uma tela contendo a divisão do território estadual em células georreferenciadas. Essa visualização está representada na Figura 43, que mostra o mapa dividido em 560 quadrículas identificadas por um código único (ID).

Figura 42: Mapa da base de dados solarimétricos do LABREN.



Fonte: LABREN. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em:
https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod. Acesso em 18 de abril de 2025.

Figura 43: Dados de irradiação para o Estado da Paraíba, LABREN.



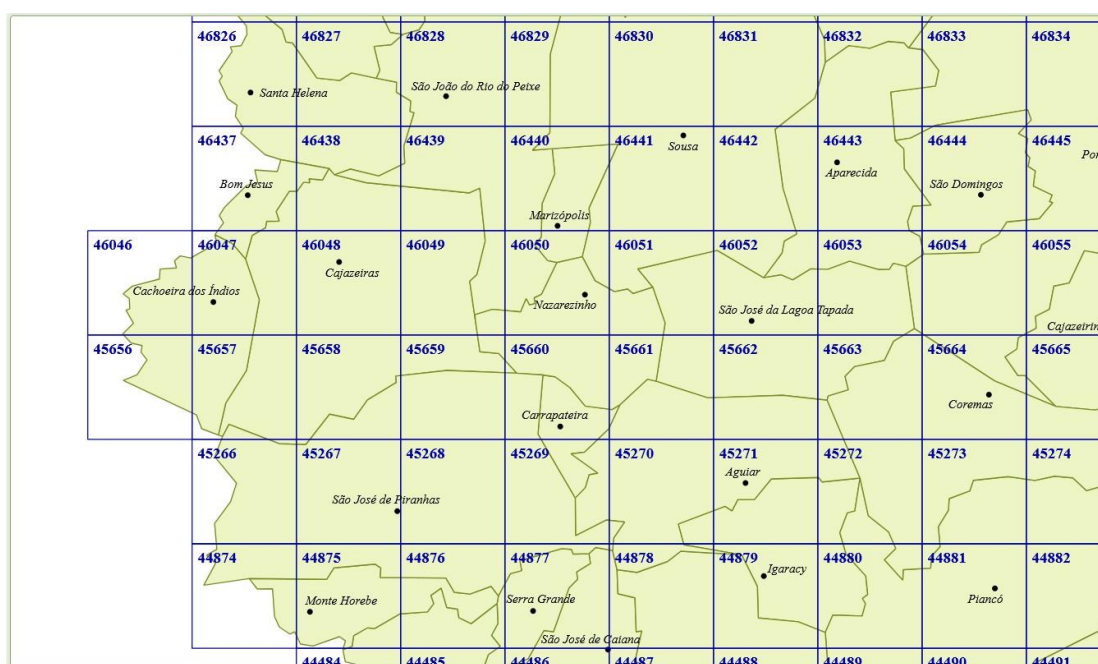
Fonte: LABREN. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em:
https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod. Acesso em 18 de abril de 2025.

A consulta dos dados é feita em etapas bem definidas: inicialmente, localiza-se no mapa o ponto de interesse utilizando os recursos de *pan e zoom* disponíveis (também acessíveis via mouse); em seguida, anota-se o ID da célula correspondente à área desejada; logo abaixo do mapa, escolhe-se o tipo de irradiação que se pretende consultar; por fim, insere-se o ID anotado no campo de busca da tabela associada para visualizar os dados específicos da região.

Dentre os tipos disponíveis de Irradiação: Global Horizontal, no Plano Inclinado, Direta Normal, Difusa e PAR, foi selecionada a Irradiação no Plano Inclinado. Essa escolha se justifica pelo mesmo fato justificado na busca de dados do CRESESB, na prática, os sistemas fotovoltaicos são instalados com módulos inclinados em relação ao solo, com ângulo idealmente ajustado à latitude do local, a fim de maximizar a captação de energia solar ao longo do ano.

Seguindo as orientações fornecidas na plataforma para a realização de uma consulta precisa, foi localizado no mapa o ponto de interesse correspondente ao município de Cajazeiras, no estado da Paraíba. Pôde-se observar que Cajazeiras está inserida em uma região entre diversas células de identificação (ID), conforme apresentado na Figura 44. Dentre os 72.272 registros disponíveis na base de dados do LABREN, e dos 560 do estado da Paraíba (Figura 43), 09 células compreendem total ou parcialmente o território do município.

Figura 44: Registros de Identificação (ID) dentro da cidade de Cajazeiras-PB, LABREN.



Fonte: LABREN. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em:

<https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod>. Acesso em 18 de abril de 2025.

Analisando a Figura 44 acima, foram observados os seguintes ID's na área de Cajazeiras: 46047, 46048, 46049, 45657, 45658, 45659, 46437, 46438 e 46439. Para selecionar o ID mais adequado à análise, foi considerada a posição central da sede urbana do município, que concentra as principais atividades econômicas, educacionais e administrativas. Nesse sentido, o **ID 46048** foi escolhido por abranger a área central da cidade, oferecendo maior representatividade para os dados de irradiação solar.

Figura 45: Quantidade de Registros no estado da Paraíba, LABREN.

Médias do Total Diário da Irradiação no Plano Inclinado para o Estado da PARAÍBA

(Wh/m².dia)

Mostrar 10 registros Procurar: ---- Inserir ID ----

ID	Lon	Lat	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
40591	-37,049	-8,3005	5647	5788	5841	6027	5716	4978	4544	4688	5445	6186	6223	6324	6003
40592	-36,949	-8,3005	5640	5800	5832	6039	5733	4987	4539	4671	5439	6131	6205	6302	6008
40978	-37,149	-8,2005	5665	5803	5778	5988	5696	5042	4578	4731	5474	6195	6255	6408	6041
40979	-37,049	-8,2005	5662	5867	5807	6044	5695	5018	4575	4661	5442	6203	6251	6363	6013
40980	-36,949	-8,2005	5656	5832	5789	5997	5715	5038	4580	4736	5492	6175	6205	6313	5997
40981	-36,849	-8,2005	5680	5846	5805	6009	5716	5021	4611	4818	5559	6231	6239	6312	5996
40982	-36,749	-8,2005	5668	5920	5890	6048	5710	4981	4513	4681	5467	6215	6252	6331	6013
40983	-36,649	-8,2005	5486	5817	5799	5911	5588	4744	4260	4392	5172	5944	6054	6203	5944
41367	-37,149	-8,1005	5683	5867	5864	5991	5691	5009	4614	4745	5440	6226	6282	6409	6061
41368	-37,049	-8,1005	5673	5850	5857	6009	5744	5060	4583	4695	5397	6200	6244	6374	6061

Mostrando registros 1 a 10 de um total de 560

Anterior 1 2 3 4 5 ... 56 Próxima

Fonte: LABREN. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em:

<https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod>. Acesso em 18 de abril de 2025.

Seguindo as orientações, o ID da célula correspondente à área desejada foi anotado, nesse caso o **46048**, foi escolhido o tipo de irradiação que se pretende consultar, no nosso caso a Irradiação no **Plano Inclinado**, por fim o ID anotado foi inserido no campo de busca da tabela mostrada da Figura 46, permitindo o acesso aos dados específicos de irradiação solar média diária para cada mês do ano. Os valores obtidos estão expressos em Wh/m².dia.

Figura 46: Índices de Irradiação no Plano Inclinado para o ID 46048 – Cajazeiras-PB, LABREN.

(Wh/m².dia)

Mostrar 10 registros Procurar: 46048 ---- Inserir ID ----

ID	Lon	Lat	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
46048	-38,549	-6,9005	6031	5887	5979	6083	5982	5571	5366	5604	6285	6559	6485	6494	6084

Mostrando registros 1 a 1 de um total de 1 (selecionados entre 560 registros)

Anterior 1 Próxima

Fonte: LABREN. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em:

<https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod>. Acesso em 18 de abril de 2025.

Os resultados obtidos, evidenciam que a irradiação média anual para essa localidade é de aproximadamente **6031 Wh/m².dia**, com os meses de setembro (6559 Wh/m².dia) e outubro (6485 Wh/m².dia) sendo os meses com os maiores índices, enquanto os meses com menor irradiação são junho (5366 Wh/m².dia) e maio (5571 Wh/m².dia). Tais informações são fundamentais para o dimensionamento preciso da usina, pois afetam diretamente a previsão da geração energética ao longo do ano.

Com base nas análises realizadas de dados obtidos pelo CRESESB e pelo o LABREN, vimos que o processo de dimensionamento da potência de uma usina solar fotovoltaica demanda a seleção de uma base de dados confiável de irradiação solar, especialmente no plano inclinado, já que essa informação influencia diretamente no cálculo da geração de energia ao longo do ano. A Tabela 4 abaixo apresenta a comparação entre as médias diárias mensais de irradiação solar no plano inclinado fornecidas por ambas as instituições, considerando o valor em kWh/m².dia.

Tabela 4. Médias do total diário de irradiação solar no plano inclinado – Cajazeiras/PB (CRESESB x LABREN).

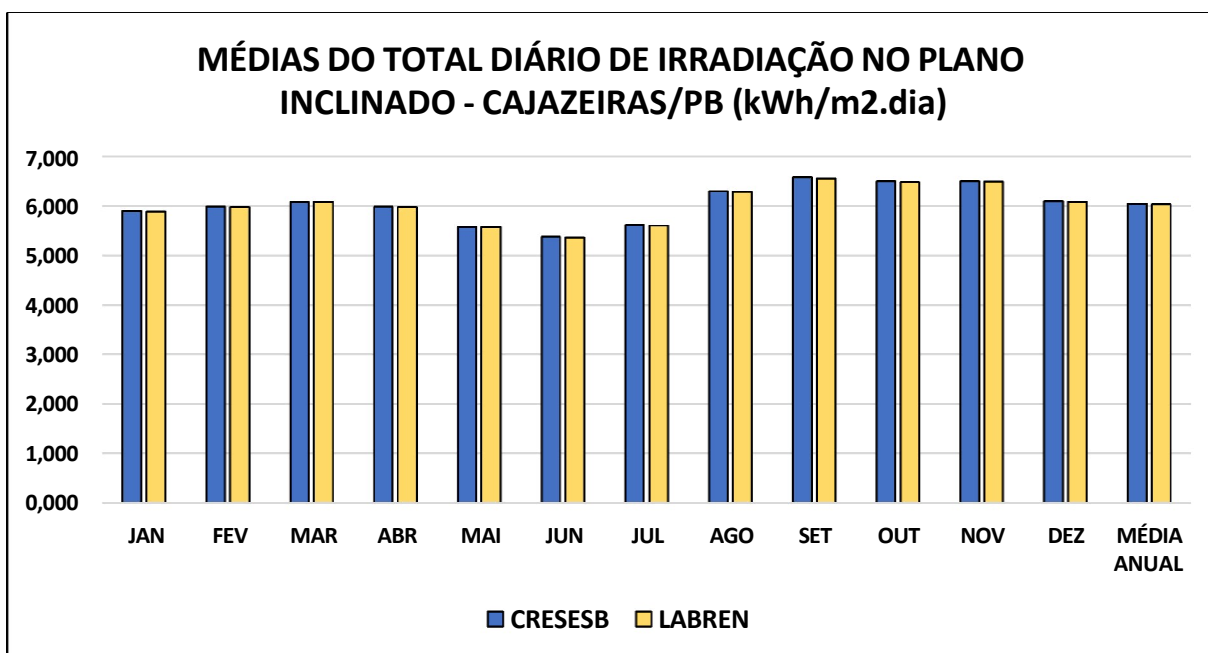
MÉDIAS DO TOTAL DIÁRIO DE IRRADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO - CAJAZEIRAS/PB (kWh/m ² .dia)													
FONTE	MESES DO ANO												MÉDIA ANUAL
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
CRESESB	5,900	5,990	6,080	5,990	5,580	5,380	5,620	6,300	6,580	6,500	6,500	6,100	6,043
LABREN	5,887	5,979	6,083	5,982	5,571	5,366	5,604	6,285	6,559	6,485	6,494	6,084	6,032

Fonte: O autor do trabalho, com base nos dados do CRESC e LABREN, 2025.

A análise comparativa mostra que os dados das duas fontes apresentam valores muito próximos em todos os meses, com comportamento sazonal semelhante. A média anual de irradiação solar no plano inclinado segundo o CRESESB é de **6,043 kWh/m².dia** e segundo o LABREN **6,032 kWh/m².dia**, apresentando uma diferença de apenas **0,011 kWh/m².dia**, o que representa uma variação inferior a **0,18%**.

Mesmo nos meses de menor irradiação (junho e julho), ambos os bancos indicam valores semelhantes, reforçando a confiabilidade dos dados. Nos meses de maior incidência solar o (setembro, outubro e novembro), as diferenças continuam pequenas e estatisticamente desprezíveis. O Gráfico 5 mostra de maneira visual esse compartivo.

Gráfico 5. Comparação gráfica mensal das médias de irradiação solar: CRESESB vs LABREN.



Fonte: O autor do trabalho, com base nos dados do *CRESC* e *LABREN*, 2025.

Contudo, ao considerar critérios técnicos e metodológicos, opta-se por adotar os dados do CRESESB para as etapas subsequentes do projeto. Essa escolha se justifica por alguns fatores:

1. O CRESESB tem por sua base os dados do SunData, um programa que tem como objetivo, os cálculos da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional e foi atualizado com o banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição, que foi produzido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST);
2. É uma base compatível com softwares de simulação modernos, como PVGIS, PVSyst e PVSol, frequentemente utilizados em projetos de engenharia e estudos acadêmicos;

Portanto, apesar da proximidade entre os dados, a escolha do CRESESB como base de dados principal para o dimensionamento da potência da usina solar é tecnicamente mais apropriada, proporcionando maior fidelidade aos padrões atuais de análise energética.

6.4 Mapeamento do Campus

Visando garantir a viabilidade estratégica para a implantação de uma usina solar fotovoltaica, é indispensável realizar um mapeamento detalhado de todo o espaço onde o sistema será instalado. Esse levantamento inicial é responsável por fornecer informações precisas para a definição dos parâmetros físicos e estruturais do projeto, além de contribuir também para decisões assertivas quanto à localização, dimensionamento e integração da usina com a infraestrutura elétrica local existente. Segundo Lopes e Santos (2021), o sucesso de projetos fotovoltaicos está diretamente associado à etapa de planejamento espacial, que visa identificar as condições ideais para a captação solar e a infraestrutura de suporte disponível.

O mapeamento realizado no campus da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no município de Cajazeiras, envolveu a análise de quatro aspectos essenciais: a infraestrutura elétrica existente, as áreas disponíveis para instalação dos painéis solares, a inspeção aérea com o uso de tecnologias como drones e a análise histórica de consumo de energia elétrica. Cada etapa dessa é fundamental para compreender não apenas o potencial solarimétrico do local, mas também as limitações técnicas, estruturais e operacionais que possam afetar no desempenho do sistema.

Fizemos uma abordagem metodológica nesse mapeamento que visa integrar levantamentos em campo, análise documental, inspeções aéreas e modelagens digitais, se alinhando com as boas práticas recomendadas para projetos de geração distribuída em instituições públicas. Tal mapeamento não apenas possibilita um melhor aproveitamento do espaço físico, mas também promove a integração do projeto com os objetivos de sustentabilidade e inovação tecnológica da universidade. Para Ribeiro e Lima (2018), “a etapa de diagnóstico físico e energético das edificações públicas é decisiva para transformar investimentos em energias renováveis em soluções eficientes e duradouras, assegurando retorno financeiro e benefícios ambientais.”

6.4.1 Infraestrutura Elétrica

Dentro do que foi proposto no trabalho, a análise da infraestrutura elétrica existente é uma das etapas mais críticas no desenvolvimento de um projeto de geração solar fotovoltaica, pois dela depende a viabilidade de integração do sistema à rede interna da instituição e à rede de distribuição da concessionária de energia local. Esse diagnóstico permite identificar o estado

atual das instalações, como o tipo de cabeamento, a capacidade do quadro de distribuição, a existência de transformadores, subestações e demais componentes que impactam diretamente o desempenho e a segurança do sistema a ser implantado.

Dentro desses aspectos citados, foi realizado uma visita técnica *in loco* a universidade em um horário extracurricular, para realização de todo o levantamento da malha elétrica do campus e possíveis características que se fazem necessárias nessa etapa do projeto. Toda visita técnica foi acompanhada pelo responsável das instalações elétrica do campus, o eletricitista Francisco, ou como é popularmente conhecido, Baixinho e do Professor Orientador do trabalho, Professor Dr. João Maria da Silva. Visita essa agenda mediante processo via SEI e autorizada pelo prefeito do CFP, Eduardo. Será descrito agora todo o arranjo da infraestrutura elétrica que comporta da UFCG campus Cajazeiras.

A infraestrutura elétrica do campus da UFCG, é composta por um sistema de distribuição em média tensão com características específicas que definem sua capacidade, segurança operacional e grau de adequação às normas técnicas.

Figura 47: Cubículo de Medição e Proteção do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, 2024.

A entrega de energia ao padrão de medição elétrica da instituição é realizada por meio de um cubículo de medição em média tensão, estrutura responsável por concentrar os equipamentos de medição, proteção e manobra do sistema elétrico, Figura 47. Esse tipo de entrada é bastante comum em grandes consumidores, pois permite uma medição mais precisa da energia consumida e maior controle operacional da rede interna da instituição (NBR, 2005).

Dentro deste cubículo, encontram-se diversos equipamentos de proteção e medição, sendo o principal o disjuntor de média tensão da marca BEGHIM, da Série ARC-O-VAC, modelo MAF:15, com tensão nominal de 17,5 kV, corrente nominal de 630 A e capacidade de interrupção de 350 MVA. Esse tipo de disjuntor é projetado para atuar em redes de média tensão com elevado nível de confiabilidade, sendo dotado de relés auxiliares de abertura e fechamento de 115 V a 60 Hz, além de sistema de motoredutor, garantindo automação das operações de manobra, conforme é mostrado pela Figura 48.

Figura 48: Disjuntor de Média Tensão do cubículo.



Fonte: O autor do trabalho, 2024.

Complementarmente, o cubículo possui relé de proteção URPE 7104 da marca Pextron, cuja função é monitorar parâmetros da rede como sobretensões, sobrecorrentes e faltas à terra, além de realizar desligamentos automáticos em situações de anomalia, garantindo a segurança dos equipamentos e das pessoas, na Figura 49 é mostrada uma foto do equipamento. Este relé,

por sua vez, está conectado a 03 transformadores de corrente (TC's) com relação de transformação de 200:5 A, cuja função é reduzir a corrente elétrica da linha para níveis seguros e compatíveis com a entrada do relé e do sistema de medição. Adicionalmente, um TC exclusivo é dedicado ao circuito de medição, assegurando a confiabilidade dos registros de consumo junto à concessionária.

Figura 49: Relé de Proteção da malha elétrica do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, 2024.

Entretanto, o relé de proteção se encontra inativo, pois o sistema foi modificado para operar com um *bypass* direto entre os vergalhões de entrada e de saída, eliminando sua atuação. Tal situação representa um risco elevado à integridade do sistema elétrico do campus, já que em caso de falha na rede ou ocorrência de sobrecorrente, não haverá a atuação automática do relé para desligamento do disjuntor, podendo comprometer equipamentos, provocar incêndios ou até mesmo representar risco à vida, a Figura 50 mostra a modificação feita.

Figura 50: Bypass do Relé de Proteção.



Fonte: O autor do trabalho, 2024.

Além dessa situação do relé, o estado físico do cubículo de medição é preocupante. As paredes necessitam de pintura, os portões metálicos estão enferrujados, e as entradas de ventilação estão fora dos padrões exigidos pela norma NBR 5410 (ABNT, 2004), o interior do cubículo de medição está com muita sujeira, tudo isso compromete a segurança e confiabilidade das medidas de segurança mínimas exigidas BR 5410 (ABNT, 2004) e NDU 002 (ENERGISA, 2024). A ausência de manutenção preventiva e corretiva em estruturas como cubículos de medição compromete diretamente a durabilidade dos equipamentos e a segurança do sistema, podendo acarretar falhas inesperadas ou colapsos operacionais.

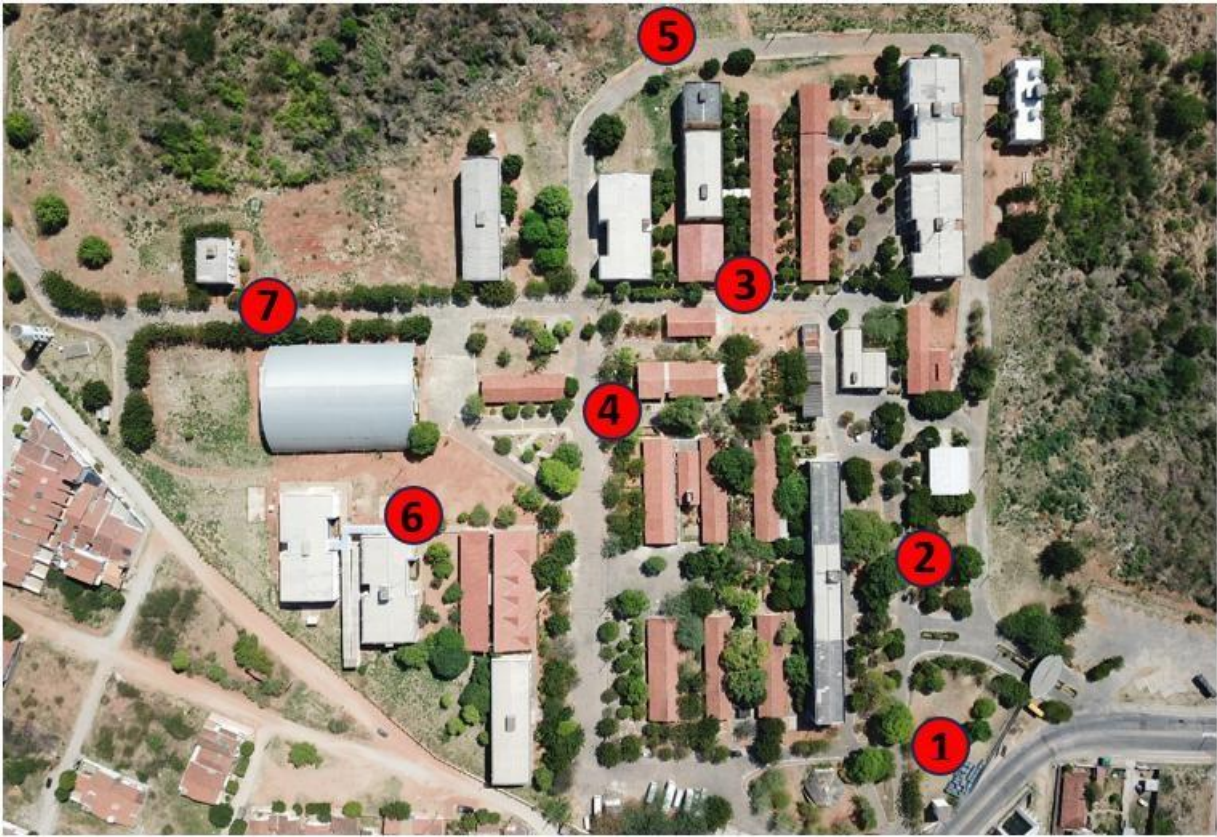
Em relação à distribuição interna de energia elétrica, o campus dispõe de 07 transformadores abaixadores de tensão, alocados de forma estratégica ao longo de suas edificações, de modo a garantir o suprimento eficiente e estável para todas as unidades consumidoras internas. A potência total instalada soma 1.275 kVA (ou 1,275 MVA), distribuída entre os transformadores conforme a demanda específica de cada setor do campus. Essa infraestrutura é fundamental para o funcionamento dos equipamentos. A seguir, a Tabela 4 apresenta a potência de cada um deles e a Figura 51 a localização de acordo com a distribuição territorial:

Tabela 5: Localização e Potências dos Transformadores do CFP.

Nº DE ID	LOCALIZAÇÃO DE REFERÊNCIA	POTÊNCIA (kVA)
1	Saída imediata do cubículo	112,5
2	Em frente ao CA1	112,5
3	Ao lado do CAFIS	225
4	Ao lado da Subprefeitura	300
5	Em frente ao “porcário”	225
6	Por trás da biblioteca	225
7	Depois do ginásio poliesportivo	75
TOTAL em kVA:		1.275

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Figura 51: Vista aérea e distribuição dos Transformadores do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Todos os transformadores estão acoplados a um QGBT (Quadro Geral de Baixa Tensão), o que permite a distribuição da energia elétrica aos diversos blocos e setores da universidade. Essa estrutura possibilita o gerenciamento mais eficiente da carga elétrica interna, mas também demanda uma manutenção preventiva regular para assegurar o bom funcionamento e evitar sobrecargas. Na Figura 51 acima é identificado a disposição de cada transformador em uma foto aérea feita pelo autor do trabalho, de acordo com o “Nº de ID” listado acima. Essa forma irá permitir aos leitores visualizarem a distribuição apresentada na tabela acima de maneira prática, de acordo com a instalação real.

Dando um parecer técnico sobre o levantamento da infraestrutura elétrica do Campus do CFP, na condição de Eletromecânico habilitado pelo conselho da categoria, bacharelando de Engenharia Elétrica e atuante no setor elétrico regional a mais de 06 (seis) anos de experiência, analisando tecnicamente o disjuntor principal instalado no cubículo, com corrente nominal de 630 A e capacidade de interrupção de 350 MVA, conclui-se que ele está adequadamente dimensionado para suportar a carga instalada de 1.275 kVA (corrente nominal aproximada de 68 A em média tensão). No entanto, **a ausência do relé de proteção em funcionamento representa uma grave falha no sistema**, já que a proteção da rede não está automatizada. Em caso de falha ou curto-circuito, a interrupção de energia dependeria de intervenção manual ou da atuação tardia de outras proteções remotas, o que pode resultar em danos irreparáveis a equipamentos e paralisação completa da instituição.

Portanto, a partir da análise detalhada da infraestrutura elétrica do campus da UFCG – Unidade CFP, conclui-se que a mesma apresenta capacidade estrutural e elétrica suficiente para comportar a instalação da usina solar fotovoltaica proposta neste trabalho. A presença de uma rede de distribuição em média tensão, com pontos de transformação bem distribuídos e potência instalada compatível com a demanda atual, confere robustez ao sistema e viabiliza a integração de uma fonte renovável como a solar fotovoltaica. Além disso, a topologia da rede existente, somada à presença de infraestrutura física adequada, como áreas disponíveis para a instalação dos painéis fotovoltaicos e proximidade com os centros de carga, contribui para minimizar perdas elétricas e reduzir custos com adaptações estruturais.

Ainda que existam aspectos que requerem correções e modernizações – como a reativação do relé de proteção e a manutenção preventiva do cubículo – do ponto de vista técnico, a infraestrutura existente está apta para receber a geração distribuída de energia, assegurando o funcionamento e a interligação da usina ao sistema elétrico do campus com a devida confiabilidade operacional.

6.4.2 Áreas Disponíveis para Instalação

A partir da análise da imagem aérea obtida por drone apresentada na Figura 52 abaixo, que cobre integralmente o campus do CFP, foi possível identificar diferentes tipos de áreas com potencial para a instalação dos painéis fotovoltaicos. As possibilidades de instalação foram divididas em dois tipos principais: instalação sobre coberturas (rooftop) e instalação em solo (ground-mounted). A tomada de decisão de qual tipo de área deve ser escolhida para instalação, foi baseado em alguns fatores técnicos e físicos importantes para assegurar que a matriz que será implanta, performe de acordo com os estudos de eficiência e performance que serão apresentados na sequência do trabalho.

Figura 52: Vista aérea das áreas disponíveis para instalação dos painéis fotovoltaicos, CFP.



Fonte: O autor do trabalho, 2025.

As coberturas dos prédios acadêmicos e administrativos do campus apresentam, em sua maioria, orientação e inclinação favoráveis à instalação de sistemas fotovoltaicos. Telhados de edificações como o bloco da biblioteca, centros de aulas (CA's), refeitório, departamentos administrativos, laboratórios e sala dos professores, por exemplo, apresentam superfícies

amplas, bem distribuídas e com pouca interferência de sombreamento causado por árvores ou construções adjacentes. A instalação em telhado apresenta como principais vantagens a otimização do uso do espaço já existente, a redução de perdas por comprimento de cabeamento (por estarem mais próximas dos centros de carga) e a menor necessidade de obras civis para fundação.

Já as áreas em solo, também visíveis na imagem (como a área localizada ao norte do ginásio poliesportivo, junto à divisa com a vegetação nativa, e espaços ao leste e sudeste do campus), representam alternativas viáveis especialmente para sistemas de maior porte, onde a área ocupada pelos módulos ultrapassa o espaço disponível nos telhados. A principal vantagem dos sistemas ground-mounted é a facilidade de manutenção, ventilação natural mais eficiente dos módulos e a possibilidade de otimização da inclinação dos suportes, maximizando a geração de energia. No entanto, sua aplicação exige maior investimento em obras civis e precisa considerar o uso do solo e os impactos ambientais, o que pode limitar sua implementação em determinados contextos.

Portanto, após a realização da análise técnica das áreas disponíveis no campus, considerando fatores como orientação solar, inclinação dos telhados, sombreamento, estrutura física e proximidade com os pontos de transformação elétrica, foi possível concluir que a melhor alternativa para a implantação da usina no CFP é a instalação do sistema sobre os telhados dos prédios. Essa decisão levou em conta a viabilidade estrutural das coberturas, a otimização do uso de áreas já edificadas, a redução nos custos com infraestrutura civil e a possibilidade de expansão modular do sistema no futuro. Além disso, a distribuição das edificações favorece a descentralização da geração, evitando a sobrecarga em transformadores específicos. Com base nisso, validou-se tecnicamente essa opção como a mais adequada, dando-se prosseguimento à próxima etapa do projeto, relacionada à inspeção aérea detalhada para mapeamento dos pontos específicos de instalação.

6.4.3 Inspeção Aérea do Campus

A inspeção aérea do CFP se mostrou uma etapa crucial para o levantamento técnico das áreas disponíveis e adequadas para a instalação da usina solar fotovoltaica proposta neste trabalho, com o tipo de instalação nos telhados dos prédios. O uso de aeronaves remotamente pilotadas, como os drones, permite um mapeamento preciso e georreferenciado de todo o

ambiente físico, fornecendo dados fundamentais para as etapas posteriores de modelagem, simulação e dimensionamento do sistema.

Dentro do estudo apresentando no trabalho, ao todo, foram capturadas 698 imagens aéreas de alta resolução, distribuídas em duas etapas: a primeira realizada no dia 23 de dezembro de 2024, com 475 imagens, e a segunda no dia 27 de dezembro de 2024, com 223 imagens adicionais. Todas as imagens capturadas foram obtidas utilizando um drone do fabricante DJI, modelo Mavic Pro, equipado com câmera C4K gray 5GHz, pertencente ao acervo pessoal do autor do trabalho, e amplamente utilizado em inspeções rotineiras no setor elétrico regional.

Figura 53: Drone utilizado para captura das imagens aéreas do CFP.



Fonte: AMAZON. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/DJI-CP-PT-000500-Mavic-Pro/dp/B01LZ8QTSU>>. Acesso em 16 de abril de 2025.

O equipamento mostrado na Figura 53, oferece suporte a captação de imagens com georreferenciamento automático, o que permite associar coordenadas geográficas exatas a cada foto capturada. Tal característica é essencial para a inserção confiável dessas imagens em softwares de simulação e análise como o *DroneDeploy* e o *PV*SOL*, os quais possibilitam a geração de modelos tridimensionais detalhados das superfícies mapeadas, e por cada foto apresentar coordenadas geográficas exatas, isso garante o cálculo de potencial de geração fotovoltaica, considerando variáveis como sombreamento, orientação solar e perdas por temperatura.

Cada prédio do campus foi de maneira individual, inspecionado por meio de voos circulares e sobrevoos verticais, cobrindo completamente o perímetro e a cobertura de cada edificação analisada. Essa estratégia visa garantir o mapeamento integral das superfícies com qualidade e segurança, tanto nos detalhes laterais quanto no plano superior das construções. O tipo de voo adotado, com órbita completa ao redor das edificações e voos em linha reta sobre os telhados, garantiu a captura de todos os ângulos necessários para detectar áreas sombreadas, desníveis, equipamentos já instalados nas coberturas (como exaustores ou caixas d'água), e possíveis obstruções à instalação dos módulos solares.

Com a compilação de todas as imagens e posterior processamento no software *DroneDeploy*, foi possível gerar um modelo em 2D de alta precisão (Figura 54), representando com fidelidade o perímetro das áreas construídas e os espaços livres disponíveis no solo. Essa modelagem foi essencial para a delimitação das regiões tecnicamente viáveis para a instalação da usina solar fotovoltaica, auxiliando na tomada de decisão quanto à escolha entre instalação em solo, cobertura ou sistema híbrido. O modelo detalhado dessas áreas reforça a confiabilidade das análises de desempenho e facilita a verificação da viabilidade técnica de cada local.

Figura 54: Mapa de projeção 2D gerada via Software a partir das imagens aéreas capturadas com o Drone.



Fonte: O autor do trabalho, fazendo uso do Software de modelagem *DroneDeploy*, 2025.

Portanto, a partir da análise técnica detalhada das imagens aéreas capturadas, e considerando fatores como inclinação, orientação solar, integridade estrutural dos telhados e área útil disponível, concluiu-se que os telhados das edificações do campus se apresentaram como alternativa viável e preferencial para a implantação inicial da usina solar fotovoltaica. A escolha por esse modelo segue recomendações técnicas da EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2022), que aponta que sistemas em cobertura podem representar uma solução mais eficiente para instituições públicas com grandes áreas construídas e consumo energético distribuído.

6.4.4. Análise de Consumo de Energia Elétrica

Essa etapa do projeto é uma das mais essenciais, nela serão realizados estudos para determinar a real demanda energética do campus, identificar picos de consumo, compreender a sazonalidade da carga elétrica e, sobretudo, embasar tecnicamente o dimensionamento da usina fotovoltaica. Entende-se que essa etapa serve como ponte direta entre a infraestrutura elétrica mapeada e o modelo de geração proposto, além de sustentar as simulações de viabilidade econômica e o retorno do investimento (payback).

Para a realização de um estudo de viabilidade, torna-se essencial a análise aprofundada do histórico de consumo de energia elétrica da unidade. Todos os dados utilizados nesta etapa foram obtidos a partir do histórico de consumo mensal de energia elétrica da unidade do CFP, referentes ao período de janeiro a dezembro do ano de 2024, informações essas cedidas pelo prefeito do campus, o senhor Eduardo, mediante solicitação formal emitida pelo professor orientador do presente trabalho, Prof. Dr. João Maria da Silva, registrada via processo eletrônico no Sistema Eletrônico de Informações (SEI), sob protocolo de nº 23096.089831/2024-81.

De acordo com os dados extraídos da fatura, o fornecimento de energia elétrica à unidade do CFP está classificado como "MTV - Mod. Tarifária Verde / A4 Poder Público / Poder Público Federal", com ligação em média tensão e sistema trifásico. Essa classificação corresponde à modalidade tarifária do Grupo A, destinada a unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 2,3 kV.

Analisando, vemos também que a unidade está enquadrada na tarifa horo-sazonal verde A4, uma modalidade que aplica tarifas diferenciadas conforme os períodos de consumo, divididos entre horário de ponta e fora de ponta, independentemente da estação do ano. O horário de ponta compreende, geralmente, três horas consecutivas por dia útil (entre 17:30h e 20:30h, conforme regulamento da concessionária, no nosso caso, a Energisa-PB), quando há maior demanda na rede, resultando em tarifas mais elevadas. Já o período fora de ponta corresponde ao restante do dia e aos finais de semana, sendo tarifado com valores reduzidos, por apresentar menor sobrecarga no sistema elétrico nacional.

A análise do perfil de consumo da instituição foi conduzida com base nas informações constantes no histórico de faturamento apresentados pela fatura de energia elétrica do CFP, nesse primeiro momento será apresentado o histórico de consumo de janeiro a dezembro de 2024, nos postos tarifários de Ponta (P) e Fora Ponta (FP) e a respectiva média de consumo anual de cada posto tarifário, conforme mostra a Tabela 5 abaixo.

Tabela 6: Média de consumo Ponta e Fora Ponta de janeiro à dezembro de 2024 do CFP.

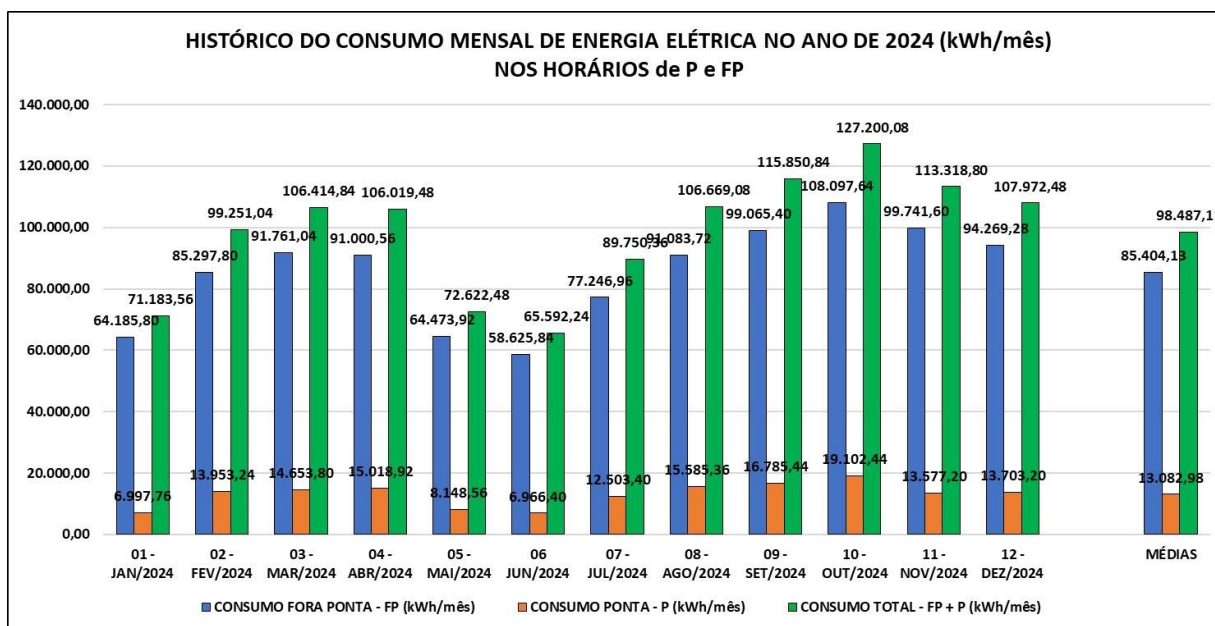
MÊS/ANO DE REFERÊNCIA	CONSUMO FORA PONTA - FP (kWh/mês)	CONSUMO PONTA - P (kWh/mês)	CONSUMO TOTAL - FP + P (kWh/mês)
JAN/2024	64.185,80	6.997,76	71.183,56
FEV/2024	85.297,80	13.953,24	99.251,04
MAR/2024	91.761,04	14.653,80	106.414,84
ABR/2024	91.000,56	15.018,92	106.019,48
MAI/2024	64.473,92	8.148,56	72.622,48
JUN/2024	58.625,84	6.966,40	65.592,24
JUL/2024	77.246,96	12.503,40	89.750,36
AGO/2024	91.083,72	15.585,36	106.669,08
SET/2024	99.065,40	16.785,44	115.850,84
OUT/2024	108.097,64	19.102,44	127.200,08
NOV/2024	99.741,60	13.577,20	113.318,80
DEZ/2024	94.269,28	13.703,20	107.972,48
MÉDIAS	85.404,13	13.082,98	98.487,11

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

A partir dos dados apresentados da Tabela 5 podemos observar que existe uma variação nas medições de consumo, muito disso pode estar atrelado a fatores como o calendário

acadêmico, uso intensivo de sistemas de climatização em determinados períodos e realização de eventos ou reformas internas. O Gráfico 6 apresenta essa variação.

Gráfico 6: Variação no consumo mensal Ponta e Fora Ponta em 2024 do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Os dados analisados e apresentados evidenciam o comportamento energético do CFP ao longo dos 12 meses do ano de 2024 (janeiro a dezembro), discriminando os consumos nos períodos fora de ponta (FP) e ponta (P), além do consumo total mensal (FP + P). A análise média anual permite compreender o padrão de uso da energia elétrica e embasar decisões relacionadas ao dimensionamento e à viabilidade da futura usina fotovoltaica.

A média mensal de consumo total da unidade foi de **98.487,11 kWh/mês**, valor significativamente alto, o que reforça ainda mais importância de estratégias de compensação energética no campus. Desse total, **85.404,13 kWh/mês** foram consumidos fora do horário de ponta (FP), representando cerca de **86,71%** do consumo médio total. Já o consumo no horário de ponta (P) correspondeu a uma média mensal de **13.082,98 kWh/mês**, ou aproximadamente **13,29%** do consumo médio total.

Este perfil de consumo indica que a maior parte da carga elétrica do campus ocorre durante o período fora de ponta (FP), o que justifica a escolha da modalidade tarifária horosazonal verde A4. Nessa modalidade, as tarifas diferenciadas para os períodos ponta e fora de ponta (FP) incidem apenas sobre a energia consumida, enquanto a demanda é cobrada de forma única, independentemente do horário. Assim, como o consumo no horário de ponta é

relativamente baixo, a modalidade verde se mostra financeiramente mais vantajosa em comparação à modalidade azul, que aplica tarifas distintas também para a demanda, o que poderia elevar significativamente os custos para a instituição.

No modelo tarifário verde, o consumidor paga uma tarifa única de demanda, válida para todos os horários, e tarifas distintas de consumo de energia ativa nos postos de ponta (P) e fora de ponta (FP). Neste contexto, a unidade consumidora do CFP possui atualmente 400 kW de demanda contratada. A exigência da contratação dessa demanda mínima decorre da necessidade de garantir, junto à concessionária, a disponibilidade de potência suficiente para atender ao pico de carga da unidade, ainda que a utilização não ocorra na totalidade todos os meses. Isso é feito para evitar sobrecargas na rede e permitir à distribuidora realizar o planejamento adequado do fornecimento.

Foi observado também durante as análises, uma certa sazonalidade no consumo, com meses de maior carga energética — como outubro (127.200,08 kWh), setembro (115.850,84 kWh), e novembro (113.318,80 kWh), por exemplo — e outros com consumo reduzido, como junho (65.592,24 kWh) e janeiro (71.183,56 kWh). Essa variação pode estar associada a fatores como o calendário acadêmico, onde nos meses que não está havendo aulas diariamente, não há a necessidade energética comparada a períodos com grande fluxo de demanda elétrica.

Outro ponto relevante é que, apesar do consumo fora de ponta ser predominante, o valor absoluto consumido no horário de ponta ainda é expressivo em certos meses, como outubro (19.102,44 kWh) e setembro (16.785,44 kWh), por exemplo, o que demonstra a necessidade de atenção ao desempenho do sistema fotovoltaico também nesse período. Embora o sistema fotovoltaico produza mais energia durante o dia — quando boa parte da demanda está concentrada no fora de ponta —, estratégias complementares como sobras de energia durante o período diurno de geração, devem ser analisados e consideradas no dimensionamento do sistema para abater também o consumo de energia elétrica no horário de ponta.

Portanto, a análise do perfil de consumo do CFP em 2024 revela um cenário bastante favorável à implantação de um sistema de geração distribuída fotovoltaica, com potencial para suprir toda parte da demanda energética da unidade no que se refere ao consumo de energia elétrica, ou seja, para os horários de ponta (P) e fora ponta (FP). A correta interpretação desses dados permite projetar com mais precisão o porte do sistema, estimar o retorno financeiro e planejar estratégias de compensação e eficiência energética adequadas à realidade da instituição.

6.5 Estudo de Viabilidade de Implantação de Usina Solar Fotovoltaica

Com base nos dados obtidos nas etapas anteriores, que envolveram desde o levantamento do potencial energético local, a caracterização da infraestrutura elétrica do campus, a identificação das áreas disponíveis para instalação e a análise do perfil de consumo energético da universidade, esse ponto tem como objetivo central apresentar de forma estruturada o estudo de viabilidade. A partir de uma abordagem técnica e multidisciplinar, serão realizados os procedimentos de simulação, modelagem, cálculo e análise do sistema fotovoltaico proposto, contemplando todas as variáveis que influenciam diretamente no desempenho e na viabilidade técnico-econômica do projeto.

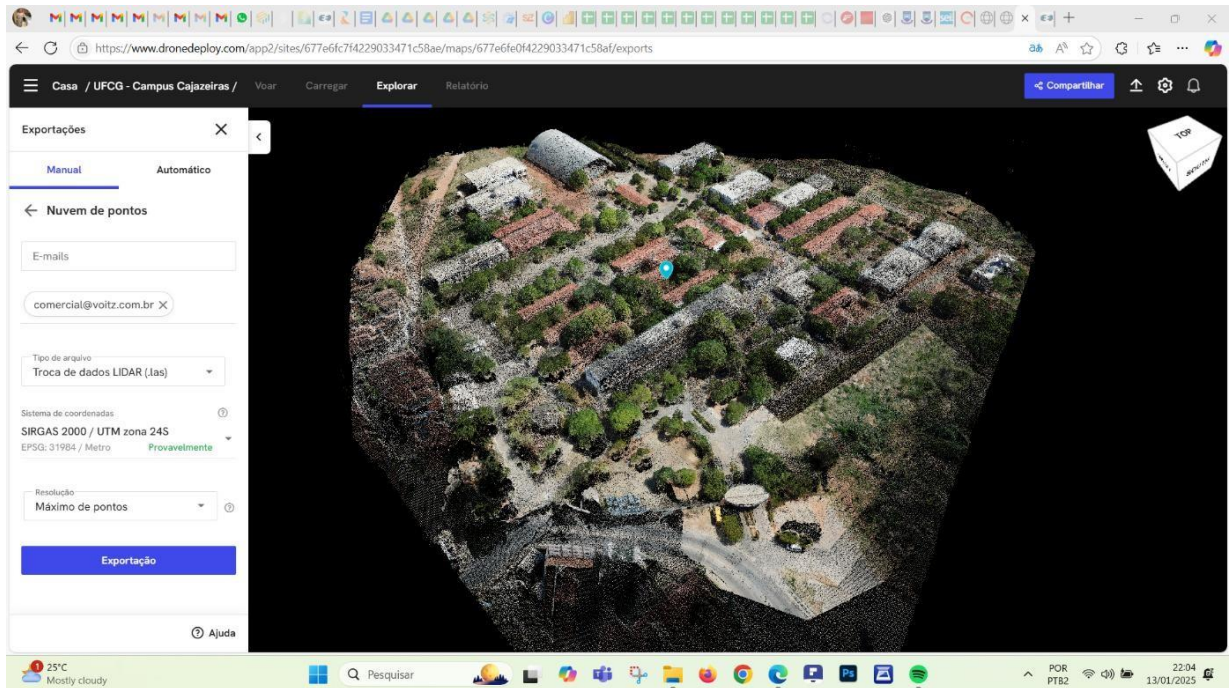
A metodologia aplicada busca assegurar que os resultados obtidos estejam alinhados com as necessidades energéticas da instituição e com os princípios de sustentabilidade e eficiência defendidos ao longo de todo o trabalho. O presente estudo não visa apenas comprovar a viabilidade técnica para a instalação, mas também oferecer subsídios concretos para a tomada de decisão institucional, promovendo o uso responsável e estratégico da energia solar fotovoltaica no setor público educacional.

6.5.1. Modelagem 3D via software DroneDeploy

A modelagem tridimensional do espaço físico onde será instalada a usina solar fotovoltaica é uma etapa fundamental dentro do processo de dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos. Para este trabalho, essa tarefa foi realizada com o auxílio da plataforma *DroneDeploy* (versão 2025), uma plataforma amplamente reconhecida por sua precisão na geração de modelos digitais de terreno e superfícies, a partir de imagens aéreas georreferenciadas de alta resolução.

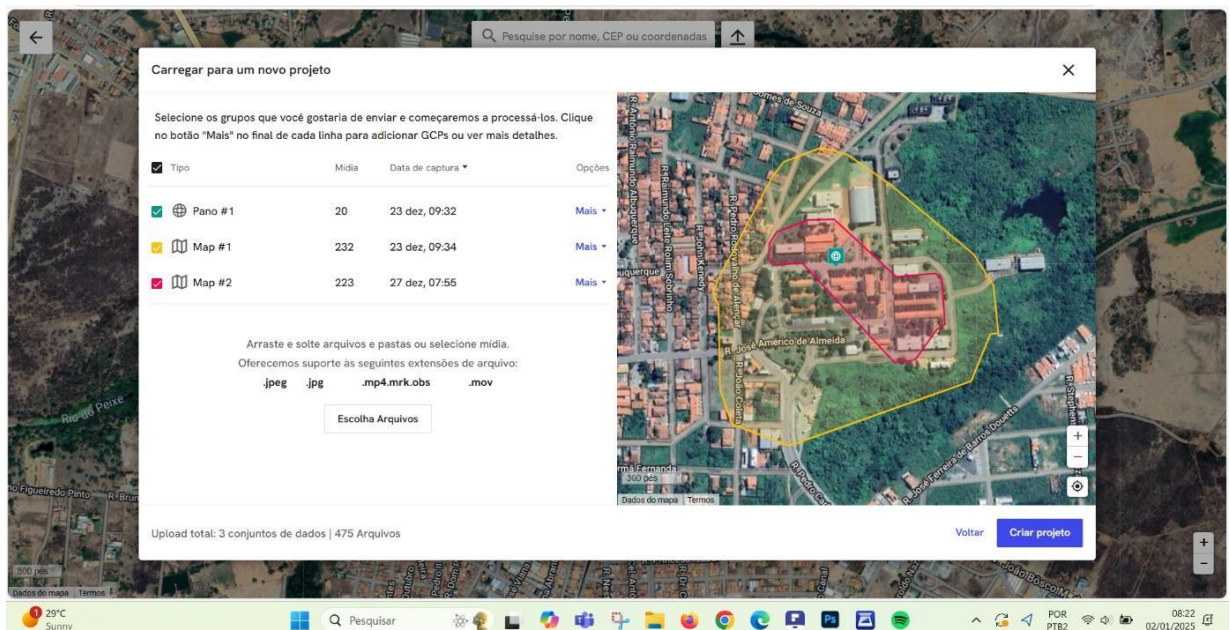
O software *DroneDeploy* realiza a reconstrução tridimensional utilizando o método de fotogrametria digital, baseado na técnica *Structure-from-Motion* (SfM). A partir da sobreposição das imagens e da marcação automática de pontos-chave comuns entre elas, o software é capaz de reconstruir uma nuvem de pontos densa (Figura 55), gerando em seguida uma malha tridimensional texturizada. A Figura 56 mostra os grupos de mapas de imagens gerados pelo *DroneDeploy* a partir das fotos georreferenciadas. As capturas seguiram trajetos automatizados de sobrevoos com sobreposição frontal, lateral e superior, garantindo assim a cobertura completa das edificações e terrenos do Campus da UFCG – Cajazeiras.

Figura 55: Nuvem de pontos gerada pelo DroneDeploy utilizada para modelagem 3D da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando a plataforma *DroneDeploy*, 2025.

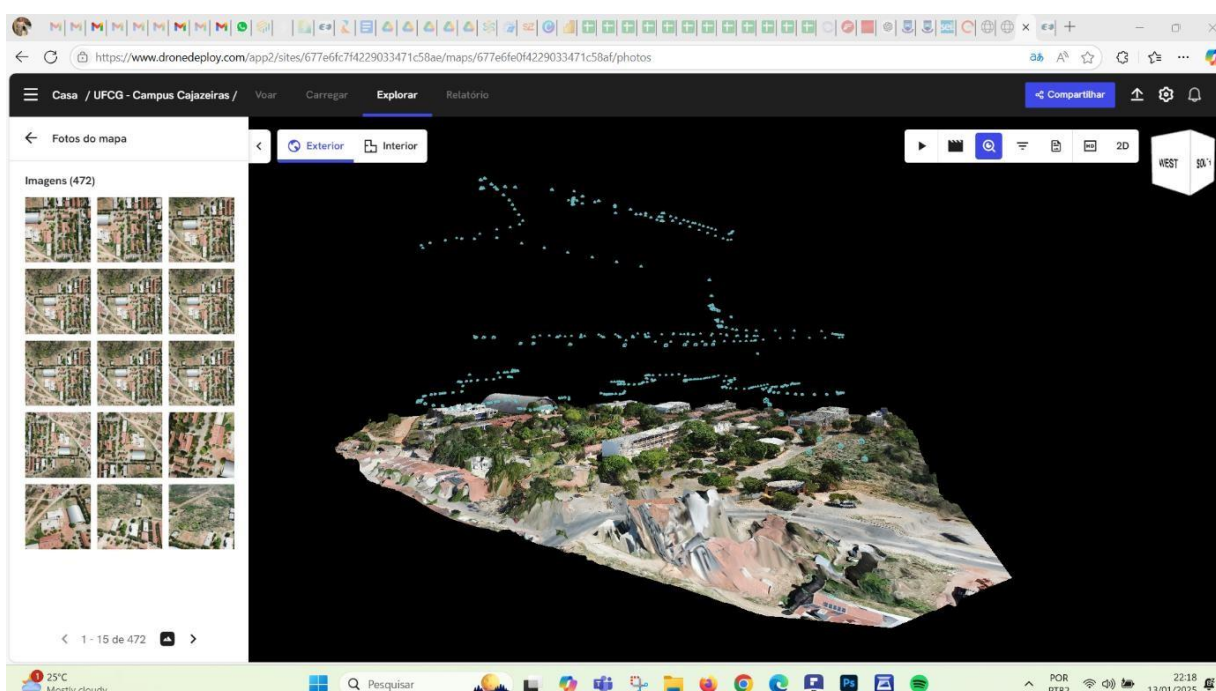
Figura 56: Mapas de imagens gerados pelo DroneDeploy a partir das fotos georreferenciadas da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando a plataforma *DroneDeploy*, 2025.

A base de dados utilizada nesta etapa foi composta pelas 698 fotografias aéreas capturadas com o uso de um drone DJI Mavic Pro, equipado com câmera C4K gray 5GHz, em duas campanhas distintas: a primeira em 23 de dezembro de 2024, totalizando 475 imagens, e a segunda em 27 de dezembro de 2024, com 223 imagens adicionais. A Figura 57 mostra onde cada foto foi capturada no espaço, tomando como base a sua georreferência, onde é possível identificar a altura, inclinação, distância do solo, entre outros aspectos de cada imagem registrada.

Figura 57: Localização espacial georreferenciada de cada foto utilizada para modelagem 3D da UFCG.

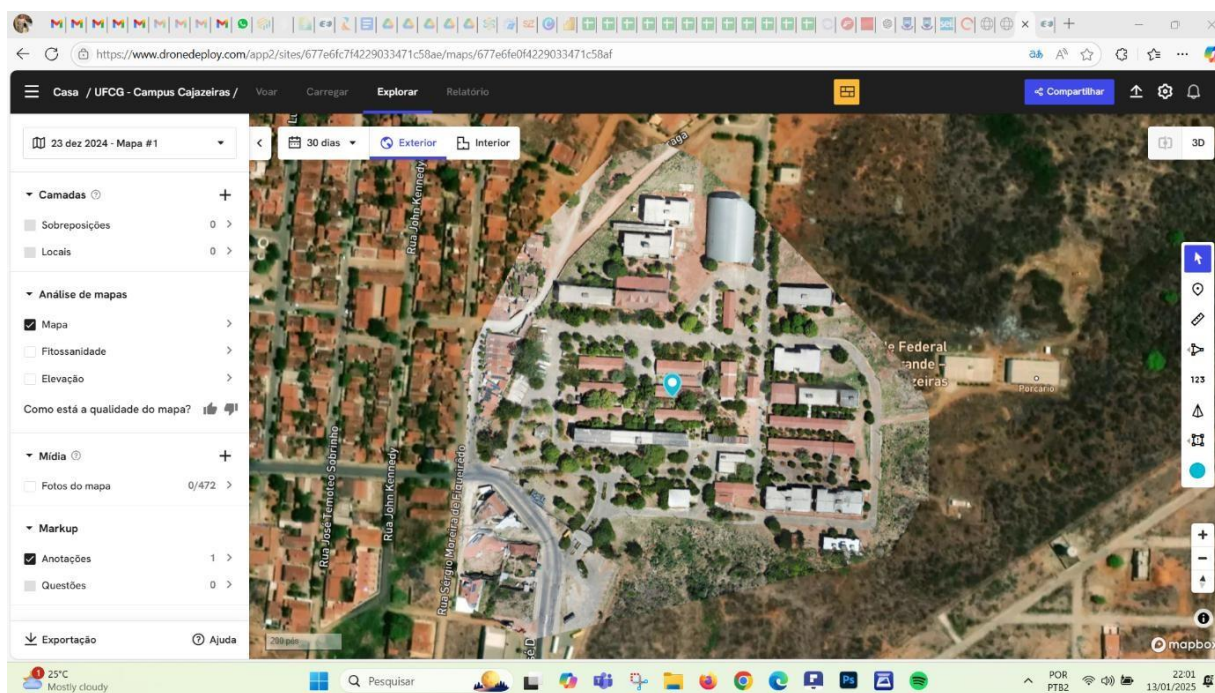


Fonte: O autor do trabalho, utilizando a plataforma *DroneDeploy*, 2025.

Com base nessas etapas descritas até aqui, foram realizadas a geração das modelagens em 2D e 3D a partir das imagens aéreas processadas pelo software DroneDeploy, pelo fato de serem muitas fotos inseridas na plataforma, a geração dessas modelagens demorou pouco mais de 8 horas. Essa etapa foi crucial para a compreensão topográfica, geométrica e estrutural da área do campus da UFCG, onde será implantada a usina solar fotovoltaica. A plataforma permite a visualização simultânea de modelos bidimensionais (ortomosaicos) e tridimensionais, fundamentais para o planejamento técnico da instalação. Os modelos em 2D fornecem ortofotos detalhadas com escala métrica, permitindo a análise precisa das áreas disponíveis e a medição de superfícies úteis para o posicionamento dos painéis solares, na Figura 58 é possível observar

o modelo 2D gerado pelo software.

Figura 58: Visualização em 2D (ortofoto) da área modelada no campus da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando a plataforma *DroneDeploy*, 2025.

Já as simulações em tridimensionais (3D) oferecem uma representação detalhada e realista das edificações, das inclinações dos telhados, níveis de elevação dos telhados (Figura 59), além de evidenciar com precisão os elementos que podem representar obstáculos à captação solar, como torres, caixas d'água, para-raios, árvores e demais estruturas elevadas.

Esse tipo de visualização permite que o projetista identifique de forma precisa as regiões mais propícias para a instalação dos módulos, com base na geometria do espaço, no sombreamento ao longo do dia e nas projeções das sombras em diferentes períodos do ano. Outro ponto relevante é a possibilidade de verificar a acessibilidade dos locais mapeados, o que contribui para a definição de rotas de manutenção, áreas de segurança e planejamento de estruturas de fixação dos módulos. Essas características tornam a simulação 3D um recurso técnico indispensável para a tomada de decisões, que considerem não apenas a irradiância solar local, mas também as restrições físicas e logísticas do ambiente real onde o sistema será implantado.

Figura 59: Níveis de elevação das edificações e arvores da UFCG.



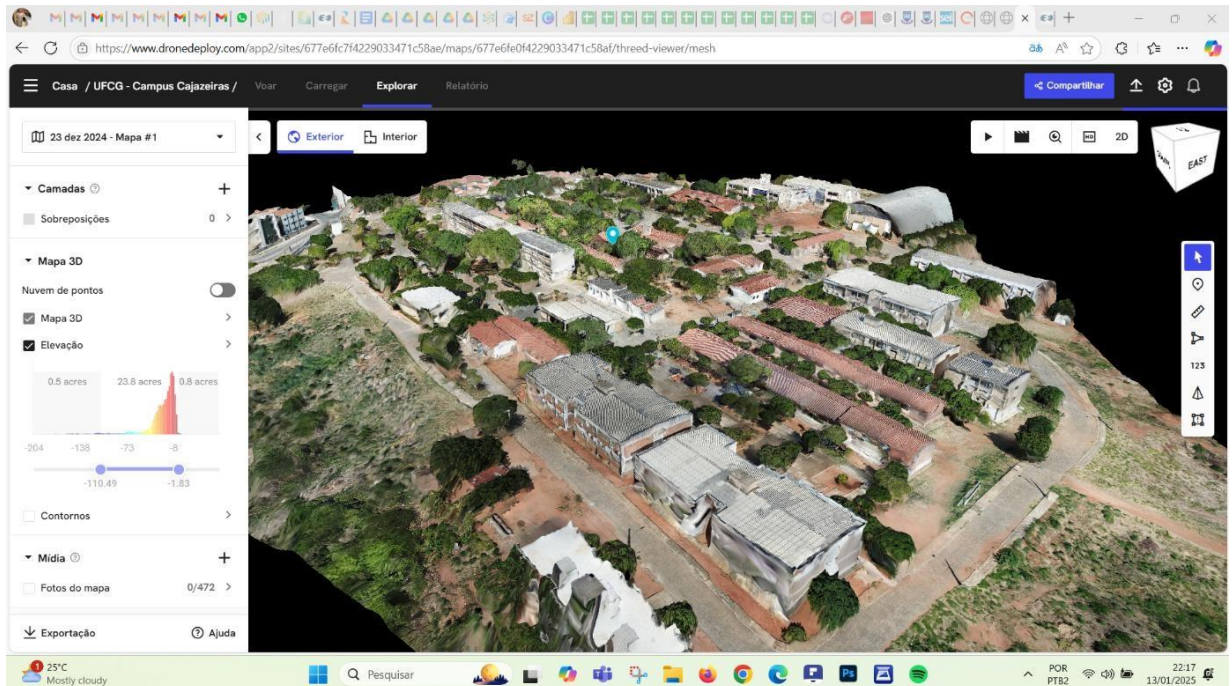
Fonte: O autor do trabalho, utilizando a plataforma *DroneDeploy*, 2025.

A análise dos níveis de elevação fornecidos pelo DroneDeploy é fundamental para garantir a precisão do projeto de implantação da usina solar fotovoltaica, pois permite identificar variações de relevo, desníveis entre edificações, inclinações de telhados e possíveis interferências topográficas. Essas informações são essenciais para as etapas seguintes, como o layout do sistema no PV*Sol, a definição dos ângulos de inclinação ideais, o cálculo de sombreamentos e a escolha da melhor configuração de strings.

Na Figura 59 acima foi possível identificar os prédios que estão em um relevo ideal para a instalação, já que quando mais escura a tonalidade do prédio, mais alto acima do nível do solo ele está, e como isso foi comprovado que pela disponibilidade estrutural da UFCG o melhor tipo de instalação dos painéis seria a instalação sobre coberturas (rooftop). Visto que os prédios com maior relevo, não sofreriam com perdas por sombreamento das arvores e nem das edificações vizinhas.

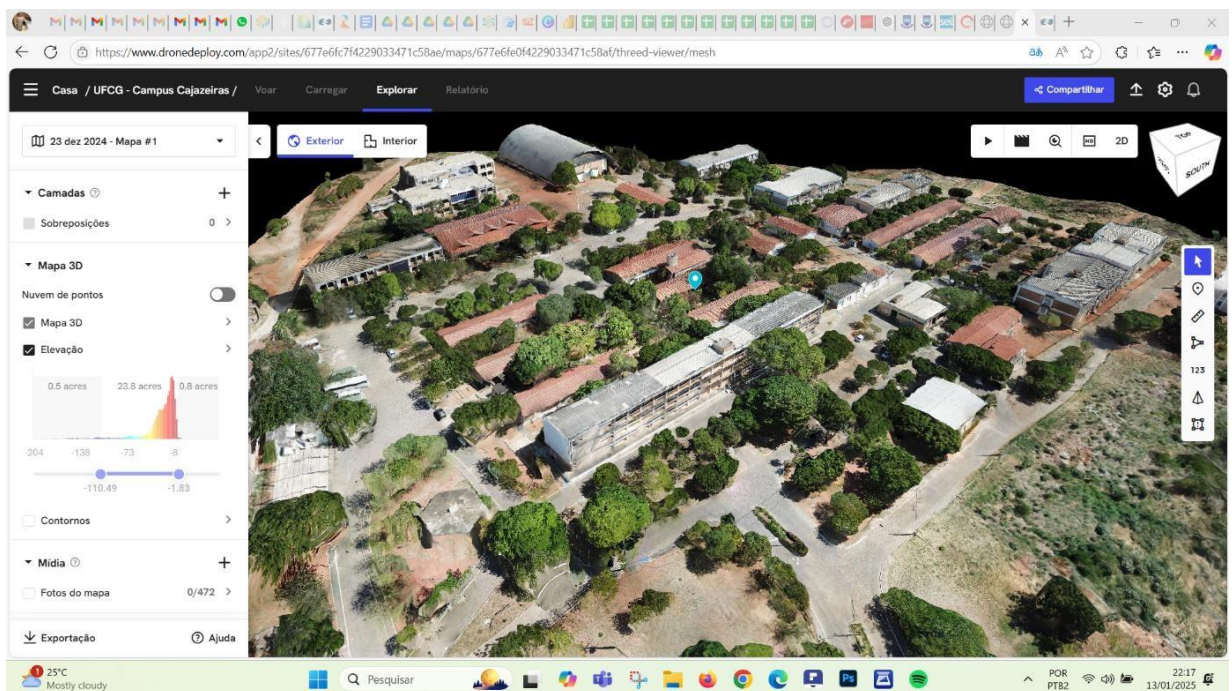
Dito isso, nas Figuras 60 e 61 abaixo é apresentado o resultado final da modelagem 3D gerada pelo DroneDeploy, nela podemos ver claramente as edificações que irão ser consideradas para as simulações no PV*Sol para as estimativas de geração da usina proposta, escolha baseada em todos os aspectos apresentado nesse mapeamento tridimensional.

Figura 60: Modelo 3D gerado pelo DroneDeploy exibindo as superfícies da UFCG, 01.



Fonte: Fonte: O autor do trabalho, utilizando a plataforma *DroneDeploy*, 2025.

Figura 61: Modelo 3D gerado pelo DroneDeploy exibindo as superfícies da UFCG, 02.



Fonte: Fonte: O autor do trabalho, utilizando a plataforma *DroneDeploy*, 2025.

6.5.2 Dimensionamento da Potência da Usina

O dimensionamento adequado de uma usina solar fotovoltaica é uma das etapas mais críticas para garantir a viabilidade técnica e econômica do projeto. No caso da UFCG – Campus Cajazeiras, por se tratar de uma unidade consumidora (UC) pertencente ao Grupo A, com fornecimento em média tensão (superior a 2,3 kV), devem-se considerar fatores específicos como demanda contratada, modalidade tarifária e horários de consumo para o correto dimensionamento.

Unidades do Grupo A, como universidades (nosso caso), grandes centros comerciais e indústrias, recebem energia em média tensão e operam com transformadores próprios para rebaixamento da tensão às faixas de consumo real (220 V ou 380 V, aqui na Paraíba). Na fatura, há a separação entre dois componentes principais: a energia consumida (kWh) e a demanda contratada (kW), sendo esta última um valor fixo, independente do consumo mensal.

No caso da UFCG – Campus Cajazeiras, a modalidade tarifária é a Horó Sazonal Verde, e foram observadas seguintes características observadas nas medições de janeiro a dezembro de 2024:

- Demanda contratada: **400 kW**
- Consumo médio no horário de ponta (P): **13.082,98 kWh/mês**
- Consumo médio no horário fora de ponta (FP): **85.404,13 kWh/mês**

Adicional a essas informações, vamos precisar também dos valores das tarifas TE Ponta e Fora Ponta vigentes, a Figura 62 apresenta uma tabela com os valores vigente de acordo com a última revisão tarifária da Energisa Paraíba (EPB) das tarifas de acordo com Modalidade Tarifária Grupo A (Verde ou Azul).

Figura 62: Tarifas de acordo com Modalidade Tarifaria para UC Grupo A EPB.

MODALIDADE TARIFÁRIA AZUL E VERDE															
GRUPO	CLASSES	TUSD + TE						TUSD						TE	
		DEMANDA (R\$/kW)				CONSUMO (R\$/kWh)		DEMANDA (R\$/kW)				CONSUMO (R\$/kWh)		CONSUMO (R\$/kWh)	
		PONTA	FORA PONTA	ULTRAPASSAGEM	F. PONTA	PONTA	FORA PONTA	PONTA	FORA PONTA	PONTA	FORA PONTA	PONTA	FORA PONTA	PONTA	FORA PONTA
A Z U L	A3 (69 kV)	SERVIÇO PÚBLICO	16,14	8,71	32,28	17,42	0,39345	0,25986	16,14	8,71	0,04338	0,04338	0,35007	0,21648	0,22944
		RURAL	16,14	8,71	32,28	17,42	0,39345	0,25986	16,14	8,71	0,04338	0,04338	0,35007	0,21648	0,22944
		RURAL IRRIGAÇÃO	16,14	8,71	32,28	17,42	0,39345	0,25986	16,14	8,71	0,04338	0,04338	0,35007	0,21648	0,22944
		DEMAIS CLASSES (2,3 a 25 kV)	16,14	8,71	32,28	17,42	0,39345	0,25986	16,14	8,71	0,04338	0,04338	0,35007	0,21648	0,22944
	A4 (13,8 kV)	SERVIÇO PÚBLICO	48,77	24,72	97,54	49,44	0,42014	0,28655	48,77	24,72	0,06902	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944
		RURAL	48,77	24,72	97,54	49,44	0,42014	0,28655	48,77	24,72	0,06902	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944
		RURAL IRRIGAÇÃO	48,77	24,72	97,54	49,44	0,42014	0,28655	48,77	24,72	0,06902	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944
		DEMAIS CLASSES	48,77	24,72	97,54	49,44	0,42014	0,28655	48,77	24,72	0,06902	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944
V E R D E	A4 (13,8 kV)	SERVIÇO PÚBLICO	-	24,72	-	49,44	1,60297	0,28655	-	24,72	1,25185	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944
		RURAL	-	24,72	-	49,44	1,60297	0,28655	-	24,72	1,25185	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944
		RURAL IRRIGAÇÃO	-	24,72	-	49,44	1,60297	0,28655	-	24,72	1,25185	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944
		DEMAIS CLASSES	-	24,72	-	49,44	1,60297	0,28655	-	24,72	1,25185	0,06902	0,35112	0,21753	0,22944

Fonte: ENERGISA, Quadro de Tarifas. Disponível em: <https://ajuda.energisa.com.br/wp-content/uploads/2024/09/Quadro-de-Tarifas-EPB.pdf> >. Acesso em 20 de abril de 2025.

Para o nosso critério de dimensionamento iremos utilizar os valores das tarifas TE Ponta e Fora Ponta vigentes (destacados de azul na figura acima) para a classe de atendimento “Serviço Público”, destacado de vermelho na figura cima:

- Tarifa TE Ponta: R\$ 0,35112
- Tarifa TE Fora Ponta: R\$ 0,21753

Seguindo com o dimensionamento, de acordo com as Resoluções Normativas nº 482 e 687 da ANEEL, a compensação de energia em sistemas fotovoltaicos conectados à rede deve ocorrer prioritariamente dentro do mesmo posto tarifário em que a energia foi gerada. Como a geração ocorre no horário fora de ponta (período de sol), a compensação do consumo no horário de ponta só é possível após compensar todo o consumo fora de ponta, aplicando-se um fator de correção para compensação no horário de ponta (FC). Esse fator é obtido por:

$$FC = \frac{TE\ Ponta}{TE\ Fora\ Ponta} \quad (9)$$

Logo, com base nos dados acima, ficaremos com o seguinte fator de correção para compensação no horário de ponta:

$$FC = \frac{R\$ 0,35112}{R\$ 0,21753}$$

$$FC \cong 1,61$$

Encontrado esse ajuste, devemos aplica-lo sobre o valor médio do consumo no Ponta e depois somar esse valor ao consumo fora de ponta para se obter a geração necessária mensal total do sistema. Além disso, visando contemplar possíveis variações no consumo, perdas operacionais não previstas e futuras ampliações de carga, é recomendada a aplicação de uma margem de segurança de 20% sobre esse valor. Esse acréscimo torna o dimensionamento mais robusto e alinhado à realidade operacional do campus universitário. Esse valor é obtido por:

$$Geração\ Necessária = Consumo\ médio\ FP + (Consumo\ médio\ P * FC) \quad (10)$$

Logo:

$$\textbf{Geração Necessária} = 85.404,13 + (13.082,98 * 1,61)$$

$$\textbf{Geração Necessária} = 85.404,13 + 21.063,59$$

$$\textbf{Geração Necessária} = 106.467,72 \text{ kWh/mês}$$

Calculando agora a geração necessária com a margem de ampliação de 20% a mais, ficaremos com:

$$\textbf{Geração Necessária} = 106.467,72 + 20\%$$

$$\textbf{Geração Necessária} = 127.761,264 \text{ kWh/mês}$$

Seguindo com o dimensionamento, para estimar capacidade de geração mensal de um sistema fotovoltaico, vamos encontrar o Fator Solar (FS), que é um parâmetro essencial que representa a quantidade média de energia que pode ser gerada por cada quilowatt-pico (kWp) instalado. Esse fator é obtido por:

$$\textbf{FS} = \textbf{Gmédio} * \textbf{PR} * 30 \quad (11)$$

Onde, **Gmédio** é a Irradiação solar média diária no plano inclinado, dado obtido no CRESESB, que no nosso caso será de 6,043 kWh/m².dia, **PR** é a Performance Ratio, que é um índice que representa o desempenho real do sistema fotovoltaico comparado à sua produção ideal, descontando perdas inerentes ao sistema. Valores típicos variam entre 0,75 e 0,85, e para este projeto foi adotado um valor de perdas para o sistema de **20%**, então o valor de **PR** é de **0,80**, compatível com instalações de médio porte bem projetadas e com manutenção regular (CRESESB, 2023) e **30** que é o intervalo de tempo que queremos calcular (30 dias médios por mês). Logo:

$$FS = 6,043 * 0,80 * 30$$

$$FS \cong 145 \text{ kWh/kWp.mês}$$

O próximo passo foi determinar a potência do sistema fotovoltaico em corrente contínua (CC), também chamada de potência de pico (kWp). Esse valor representa a potência total dos módulos fotovoltaicos instalados e é um dos principais parâmetros de dimensionamento de uma usina solar. O cálculo é feito com base na energia mensal necessária e no Fator Solar (FS) previamente obtido, possibilitando estimar a quantidade de potência instalada necessária para suprir o consumo da unidade. Logo:

$$\text{Potência CC} = \frac{\text{Geração Necessária mensal}}{FS} \quad (12)$$

Logo:

$$\text{Potência CC} = \frac{127.761,264 \text{ kWh/mês}}{145 \text{ kWh/kWp.mês}}$$

$$\text{Potência CC} \cong 881,11 \text{ kWp}$$

Esse valor da potência CC calculado acima deve ser ajustado de acordo com a potência dos painéis fotovoltaicos escolhidos para compor o sistema. No nosso caso, consideramos a utilização de painéis de 550 Wp cada, o que nos leva ao seguinte resultado:

$$\text{Quantidade de módulos} = \frac{881,11 \text{ kWp}}{\left(\frac{550 \text{ Wp}}{1.000}\right)} \quad (13)$$

$$\text{Quantidade de módulos} = \frac{881,11 \text{ kWp}}{(0,55 \text{ kWp})}$$

$$\text{Quantidade de módulos} \cong 1.602 \text{ painéis}$$

Vamos considerar para critérios técnicos de instalação e de parâmetros de dimensionamento a quantidade de **1.610 painéis**, ficando assim com a potência total do sistema de:

$$Potência\ CC = \frac{1.610 * 550\ Wp}{1.000} \quad (14)$$

$$Potência\ CC = \frac{885.500\ Wp}{1.000}$$

$$Potência\ CC = 885,50\ kWp$$

Vamos calcular agora a parte final do nosso dimensionamento, a potência de saída dos inversores, também conhecida como potência em corrente alternada (CA) do sistema. Para efeito de cálculos, devemos considerar a aplicação de um fator de *overload* (sobrecarga) desse tipo de equipamento, fator esse informado pelo próprio fabricante do equipamento.

O *overload* é um parâmetro utilizado para representar a razão entre a potência dos módulos (CC) e a potência nominal de saída dos inversores (CA). De forma prática, ele permite que a potência instalada dos módulos seja superior à capacidade nominal dos inversores, possibilitando que estes operem com maior eficiência durante os períodos de alta geração solar, sem a necessidade de superdimensionamento do equipamento.

Assim, de acordo com o fabricante dos inversores que vamos dimensionar para o projeto, vamos utilizar um fator de *overload* de **50%**, ou **1,50**. Logo, a potência CC dos módulos será 50% superior à potência CA dos inversores, garantindo o melhor aproveitamento do sistema ao longo do tempo e otimizando o custo-benefício do projeto. A potência dos inversores é calculada por:

$$Potência\ CA = \frac{Potência\ Total\ CC}{Fator\ de\ Overload} \quad (15)$$

Logo:

$$Potência\ CA = \frac{885,50\ kWp}{1,50}$$

$$\text{Potência CA} \cong 590,33 \text{ kW}$$

Considerando que a potência individual dos inversores que serão dimensionados para o projeto será de **100 kW**, teremos:

$$\text{Número de Inversores} = \frac{\text{Potência CA calculada}}{\text{Potência individual inversor}} \quad (16)$$

Logo:

$$\text{Número de Inversores} = \frac{590,33 \text{ kW}}{100 \text{ kW}}$$

Portanto:

$$\text{Número de Inversores} \cong 5,90$$

Considerando um percentual de sobre de segurança, vamos adotar a seguinte quantidade:

$$\text{Número de Inversores} = 6$$

Totalizando assim, uma Potência total CA de:

$$\text{Potência Total CA} = N^{\circ} \text{ Inver. projetados} * \text{Potência ind. do Inversor} \quad (17)$$

Logo:

$$\text{Potência Total CA} = 6 * 100 \text{ kW}$$

Potência Total CA = 600 kW

Finalizado o dimensionamento da Potência Total CC e CA, foi feita uma verificação de alguns outros parâmetros necessários para que o sistema tivesse condições técnicas e normativas para sua conexão:

- A demanda contratada: Atualmente a demanda contratada da UFCG é de 400 kW, entretanto a potência CA projetada da usina é de aproximadamente 600 kW.
- Assim, para adequar o sistema, é necessário solicitar um aumento da demanda contratada junto à concessionária (ENERGISA PB). O sistema só pode ser instalado até o limite da demanda contratada, conforme as Resoluções Normativas da ANEEL já citadas. Caso não haja aumento, o sistema deve ser redimensionado para atender até 400 kW de potência total CA.
- Capacidade dos transformadores: O campus dispõe de uma infraestrutura robusta, com 7 transformadores totalizando 1.275 kVA, o que equivale a aproximadamente 1.173 kW de potência ativa (considerando fator de potência médio de 0,92), portanto há margem técnica disponível para absorver a ampliação da demanda contratada, desde que aprovada pela concessionária.

A seguir, apresento na Tabela 6 os principais parâmetros obtidos ao longo do dimensionamento da potência da usina solar fotovoltaica projetada para a UFCG – Campus Cajazeiras.

Tabela 7: Parâmetros Técnicos do Dimensionamento da Potência Usina Solar Fotovoltaica.

PARÂMETRO	QUANTIFICAÇÃO
Irradiação média diária (CRESESB)	6,043 kWh/m ² .dia
Performance Ratio (PR)	0,80
Fator de Correção (FC)	1,61
Fator Solar (FS)	145 kWh/kWp.mês
Geração mensal necessária	127.761,264 kWh/mês
Potência Total CC (kWp)	885,50 kWp
Potência Total CA (kW)	600 kW
Nº de painéis de 550 Wp	1.610 painéis

Nº de inversores de 100 kW	6 unidades
Demanda contratada atual	400 kW
Necessidade de aumento da Demanda	Sim (para ≥ 600 kW)

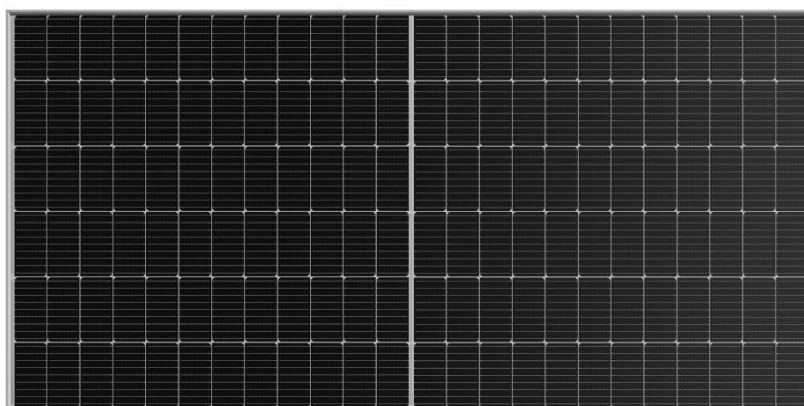
Fonte: O autor do trabalho, 2025.

6.5.3 Dimensionamento dos Equipamentos

A escolha dos equipamentos que compõem uma usina solar fotovoltaica é uma etapa fundamental para garantir a eficiência, durabilidade e segurança do sistema ao longo de sua vida útil. No presente projeto, foram selecionados painéis fotovoltaicos de 550 Wp e inversores de 100 kW, ambos de fabricantes renomados e amplamente consolidados no mercado internacional de energia solar, a WEG.

Para a composição do gerador fotovoltaico, foram especificados **1.610 painéis de 550 Wp** cada do modelo **WPV 550 HMM3**, da fabricante **WEG Solar**. Esta escolha se justifica não apenas pela alta potência unitária de 550 Wp, mas também pela confiabilidade tecnológica oferecida pela empresa. A WEG, de origem brasileira, ocupa hoje uma posição de destaque como maior distribuidora de equipamentos de energia solar do mundo, reconhecida por sua forte atuação no setor elétrico e por fornecer equipamentos com elevada eficiência e excelente durabilidade. A Figura 63 mostra o modelo do painel projetado.

Figura 63: Módulo fotovoltaico WEG WPV 550 HMM3.



Fonte: Catálogo Técnico WEG Solar. Disponível em: <<https://www.weg.net/solar/br/produtos/>>. Acesso em 20 de abril de 2025.

Para a conversão da energia CC gerada pelos módulos em energia CA que será injetada na rede da concessionária, foram escolhidos **6 inversores** do modelo **SUN2000-100KTL-M1**, da fabricante **Huawei/WEG**. Este modelo se destaca por sua potência nominal de **100 kW**, arquitetura trifásica e alta eficiência energética, atingindo até 98,8%.

A parceria estratégica entre a WEG e a Huawei para a distribuição de equipamentos no Brasil representa um importante avanço na consolidação do setor de energia solar fotovoltaica no país. Essa colaboração une a robustez e a confiabilidade da infraestrutura nacional da WEG, uma das maiores fabricantes brasileiras com forte presença em soluções elétricas, à excelência tecnológica da Huawei, reconhecida mundialmente como referência em inovação e desempenho no desenvolvimento de inversores fotovoltaicos. Além disso, a presença nacional da WEG assegura suporte técnico especializado e assistência pós-venda de qualidade, fatores essenciais para a operação contínua e segura de sistemas de médio e grande porte. A Figura 64 mostra uma representação do inversor projetado.

Figura 64: Inversor trifásico Huawei/WEG SUN2000-100KTL-M1.



Fonte: Catálogo Técnico WEG Solar. Disponível em: <<https://www.weg.net/solar/br/produtos/>>. Acesso em 20 de abril de 2025.

Além da eficiência técnica, os equipamentos escolhidos para este projeto atendem a critérios de normatização técnica exigidos pela ANEEL, compatibilidade com a simulação no software PV*SOL, e possuem garantias estendidas:

- Painéis solares com garantia linear entre 25 e 30 anos de desempenho;
- Inversores trifásicos com garantia de 10 anos (expansível).

A escolha por marcas consolidadas como WEG e Huawei reafirma o compromisso deste projeto com a sustentabilidade, confiabilidade e longevidade do sistema, pilares essenciais para uma proposta de implantação viável e de referência no cenário educacional e institucional brasileiro. A Tabela 8 mostra as especificações dos equipamentos projetados.

Tabela 8: Especificações Técnicas dos Equipamentos Fotovoltaicos Projetados.

Componente	Fabricante	Modelo	Potência Nominal	Quantidade	Eficiência	Tensão Nominal de Operação	Garantia
Módulo Fotovoltaico	WEG	WPV 550 HMM3	550 Wp	1.610	$\geq 21,3\%$	41,96 V	25 anos (linear)
Inversor Solar Trifásico	Huawei / WEG	SUN2000-100KTL-M1 (400Vac)	100.000 W (100 kW)	6	$\geq 98,8\%$	400 V CA (trifásico)	10 anos (expansível)

Fonte: O autor do trabalho, com dados fornecidos pelos fabricantes. 2025.

6.5.4 Análise e Layout da Usina via software PV*SOL

Essa etapa de análise e layout da usina solar fotovoltaica foi realizada por meio do software PV*SOL premium 2025 (R5), uma ferramenta de referência internacional voltada à simulação dinâmica e tridimensional de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. O uso desse software justifica-se não apenas por sua compatibilidade com arquivos no formato .OBJ, gerados a partir da modelagem tridimensional da UFCG – Campus Cajazeiras pelo DroneDeploy, como também por sua elevada capacidade de precisão na análise técnica, energética de projetos fotovoltaicos.

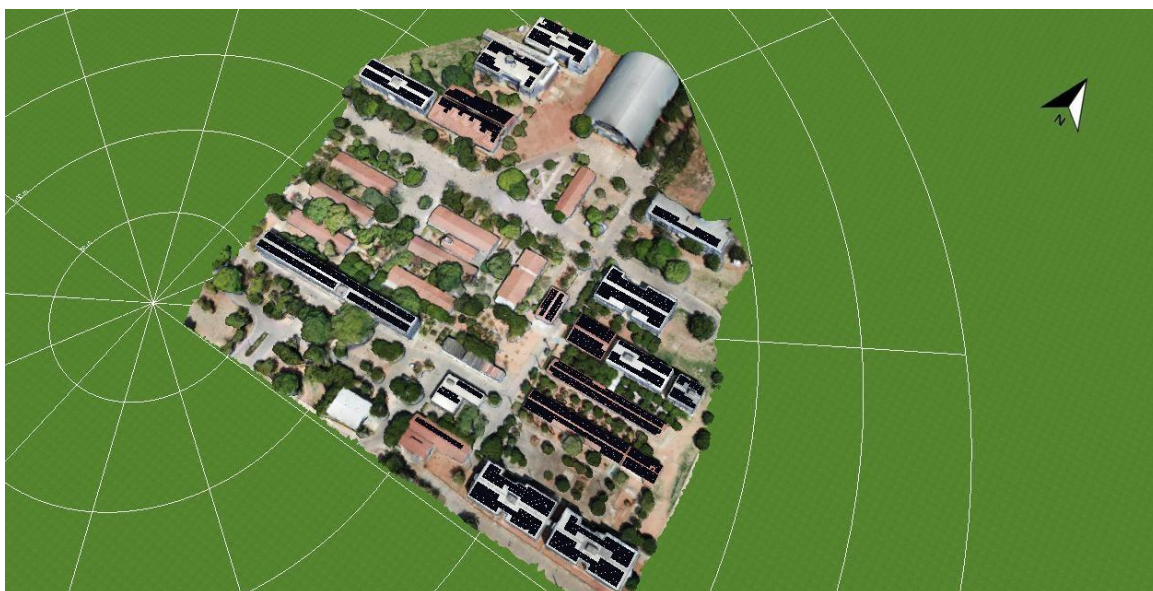
Com base na modelagem 3D do campus, foi possível importar todo o ambiente físico mapeado para o PV*SOL, o que inclui edificações, áreas de telhado, elevações e obstáculos como árvores e estruturas adjacentes. Essa modelagem garantiu que as simulações ocorressem em um ambiente virtual fiel à realidade do terreno, permitindo identificar sombreamentos críticos, inclinações inadequadas e áreas com baixa irradiância, aspectos determinantes para a performance final da usina.

O PV*SOL também permitiu a simulação de diferentes estratégias de integração do sistema à rede elétrica da instituição, análise dos níveis de elevação dos prédios, além de identificar sombreamentos que afetariam a geração da usina, as inclinações inadequadas e áreas com baixos índices de Irradiação, de acordo com os dados do Meteonorm. Além da modelagem energética, terá que ser realizada uma análise estrutural das edificações onde os painéis estão sendo projetados para instalação.

Logo, para o layout da usina, foi realizado o posicionamento dos **1.610 módulos** fotovoltaicos de **550 Wp** cada que foram dimensionados na etapa anterior, onde os memos distribuídos estrategicamente sobre os telhados mais aptos à instalação. A escolha dos edifícios que compõem o arranjo fotovoltaico foi baseada em critérios técnicos estabelecidos a partir da análise de elevação das edificações realizada no DroneDeploy, e com prioridade para aquelas superfícies que apresentaram os seguintes critérios:

- Melhor incidência solar anual, com base nos dados locais de irradiação (GHI e inclinada);
- Menor interferência de sombreamento, seja de árvores, seja de outras edificações do próprio campus;
- Inclinação e orientação adequadas para maximizar a geração energética ao longo do ano;

Figura 65: Visão aérea geral do Layout da Planta Solar Fotovoltaica no Campus da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando o software *PV*SOL Premium 2025 (R5)*, 2025.

Figura 66: Vista aérea detalhada 01: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando o software *PV*SOL Premium 2025 (R5)*, 2025.

Figura 67: Vista aérea detalhada 02: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando o software *PV*SOL Premium 2025 (R5)*, 2025.

Figura 68: Vista aérea detalhada 03: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando o software *PV*SOL Premium 2025 (R5)*, 2025.

Figura 69: Vista aérea detalhada 04: Módulos solares instalados sobre prédios da UFCG.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando o software *PV*SOL Premium 2025 (R5)*, 2025.

A Figuras 65, 66, 67, 68 e 69 acima apresentaram o Layout escolhido para a planta solar modelada digitalmente, tal disposição serviu como base para as próximas etapas do estudo de viabilidade técnica e econômica.

6.5.5 Previsão de Geração da Usina via software PV*SOL

A estimativa de geração de energia elétrica da usina solar fotovoltaica proposta para o campus da UFCG Campus Cajazeiras, foi realizada por meio de simulação computacional utilizando o software especializado PV*SOL premium 2025 (R5). O modelo considera a localização geográfica do sistema, dados climáticos históricos, características técnicas dos módulos e inversores selecionados, inclinação e orientação dos painéis, além de possíveis perdas por sombreamento, temperatura e outros fatores do ambiente real de operação.

O PV*SOL utiliza como base de dados climáticos e solarimétricos os dados do Meeonorm, um padrão mundialmente reconhecido para radiação solar, integra também medições de estações meteorológicas, imagens de satélite e interpolações globais com resolução espacial refinada. O Meeonorm fornece informações confiáveis sobre irradiância global horizontal (GHI), irradiância direta normal (DNI), irradiância difusa (DHI), temperatura ambiente, entre outras variáveis atmosféricas essenciais para a simulação precisa de sistemas fotovoltaicos.

Infelizmente não é uma base de dados gratuita, se quiséssemos acessar os dados de irradiação média como fizemos nos CRESESB e LABREN, teríamos que comprar uma licença do software Meeonorm (versão atual é a 8.0). Sendo que, uma nova API será do software só será lançada em maio de 2025, por isso não utilizamos os dados manuais do Meeonorm no capítulo das Análise dos Índices Energéticos Solares.

Porém, o software PVSOL, na versão com licença completa utilizada neste trabalho, já incorpora os dados climáticos fornecidos pelo banco de dados Meeonorm. Esse banco de dados é desenvolvido a partir da coleta e interpolação de dados de milhares de estações meteorológicas ao redor do mundo, complementado por imagens de satélite e modelos climáticos avançados, o que assegura um alto nível de fidelidade nas simulações realizadas.

Ademais, os dados de irradiação solar média anual coletados nos repositórios confiáveis do CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito) e do LABREN (Laboratório de Modelagem de Sistemas de Energia Renovável) mostraram-se compatíveis com os valores apresentados pelo Meeonorm, o que valida ainda mais a consistência metodológica adotada na etapa de modelagem energética.

Figura 70: Estimativa mensal de geração de energia da usina fotovoltaica simulada no software PV*SOL.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando o software *PV*SOL Premium 2025 (R5)*, 2025.

A Figura 70 acima mostra o resultado da simulação computacional realizada no software PV*SOL, com base na base climática do Meteonorm, onde foi obtido uma estimativa de geração anual da usina fotovoltaica de aproximadamente **1.555.988 kWh/Ano**, com um rendimento anual específico de **1.757,03 kWh/kWp** e desempenho do sistema (PR) de **80,0%**. Por outro lado, fizemos também a estimativa de geração anual e mensal, porém utilizando o método empírico dessa vez, manualmente (Figura 71), tomando como base os dados de irradiação solar disponibilizados pelo CRESESB.

Obtivemos uma média de estimativa de geração anual de **1.541.195 kWh/Ano**, o que representa uma diferença de aproximadamente apenas **0,96%** entre os resultados dos CRESESB em relação aos resultados do PV*SOL.

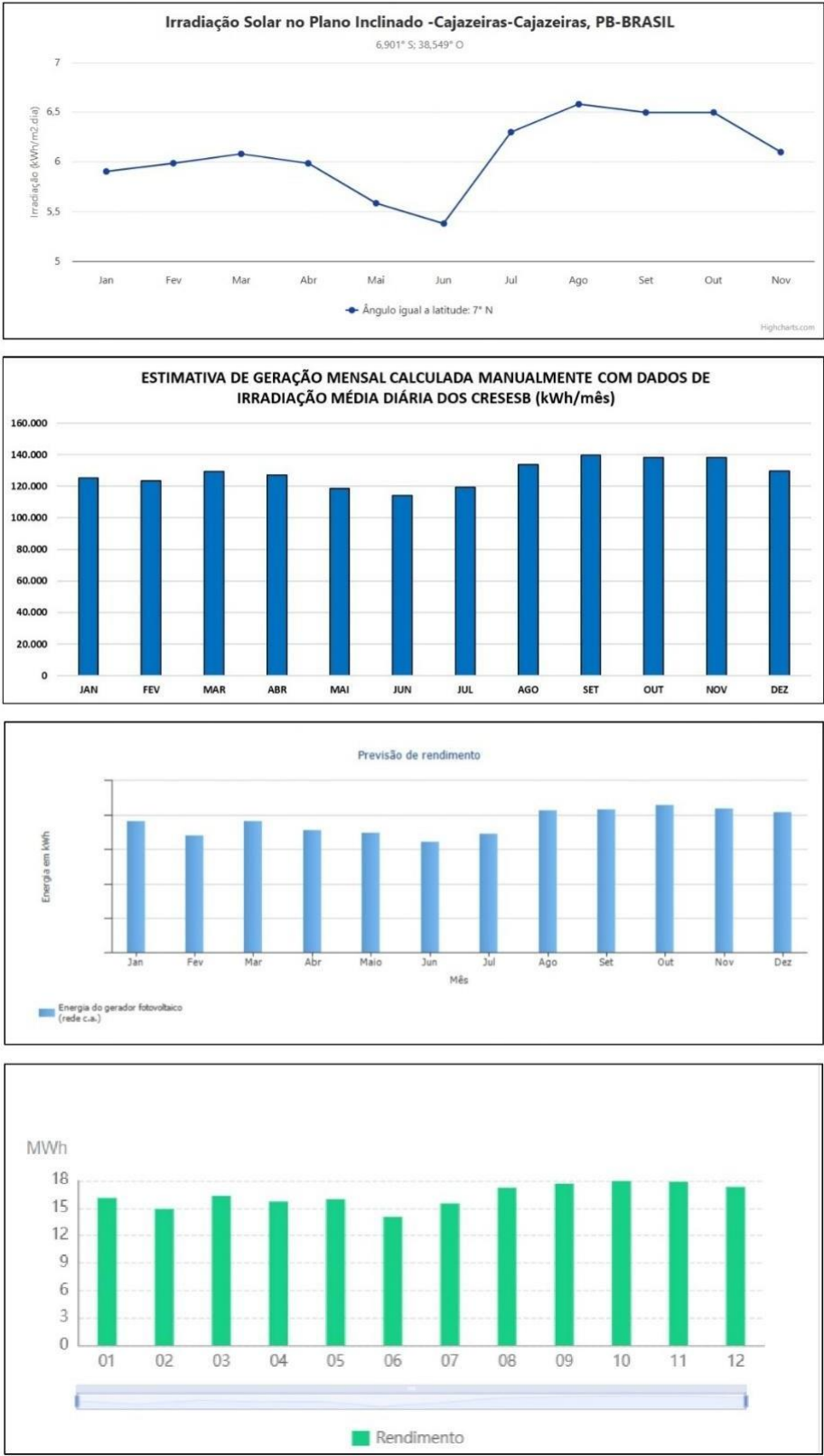
Figura 71: Cálculos manuais da estimativa mensal de geração de energia da usina fotovoltaica com base nos índices de Irradiação média diários dos CRESESB.

MÉDIAS DO TOTAL DIÁRIO DE IRRADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO - CAJAZEIRAS/PB (kWh/m2.dia)													
FONTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
CRESESB	5,900	5,990	6,080	5,990	5,580	5,380	5,620	6,300	6,580	6,500	6,500	6,100	6,043
FATOR SOLAR MENSAL MÉDIO (kWh/kWp)													
MESES DO ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
VALORES	141,60	143,76	145,92	143,76	133,92	129,12	134,88	151,20	157,92	156,00	156,00	146,40	145,04
POTÊNCIA SISTEMA (kWp)				QUANTIDADE DIAS				PERFORMANCE RATIO (PR)					
885,50				30				0,80					
GERAÇÃO ESTIMADA MENSAL (kWh/mês)													
MESES DO ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
VALORES	125.387	127.299	129.212	127.299	118.586	114.336	119.436	133.888	139.838	138.138	138.138	129.637	128.433
													TOTAL ANUAL
													1.541,195

Fonte: O autor do trabalho, utilizando dados do CRESESB, 2025.

Essa margem de divergência é estatisticamente muito baixa e aceitável dentro do contexto de análise de geração de energia, considerando as variações que podem ocorrer devido a fatores como resolução temporal das bases de dados, metodologia de interpolação climática e possíveis perdas assumidas no modelo do software. No que se refere ao rendimento específico entre as duas simulações, o Fator Solar (FS), que é o índice que relaciona a geração anual de energia (em kWh) com a potência instalada do sistema (em kWp), o valor obtido via PV*SOL foi de **1.757,03 kWh/kWp** anual, que dividindo por 12 meses ficamos com o rendimento mensal de **146,41 kWh/kWp**, enquanto o valor calculado com base no CRESESB foi de aproximadamente **145 kWh/kWp**. A diferença entre esses dois fatores também é pequena, ficando em torno de aproximadamente **0,97%** entre os resultados dos CRESESB em relação aos resultados do PV*SO, o que reforça a convergência entre o método empírico e a simulação computacional.

Figura 72: Comparativo mensal da estimativa de geração de energia: Cálculo manual (CRESESB) x Simulação PV*SOL (Meteonorm) x Geração Real de uma Usina.



Fonte: O autor do trabalho, utilizando dados do CRESESB, PV*SOL Premium 2025 (R5) e Geração real de uma Usina Solar Fotovoltaica, 2025.

É possível observar que, ao longo dos doze meses do ano, ambas as metodologias apresentam uma curva característica com comportamento sazonal semelhante, com variações mensais de geração energética que acompanham o padrão de irradiação solar típico da região de Cajazeiras, Paraíba. Os meses de maior produção energética em ambos os métodos se concentram entre agosto e outubro, enquanto maio e junho apresentam os menores valores, refletindo a menor incidência solar neste período, como também pode ser visto no gráfico de irradiação no plano inclinado.

Portanto, os resultados obtidos por meio do PV*SOL validam e corroboram as análises manuais realizadas previamente, demonstrando que a estimativa de geração da planta solar da UFCG está coerente com os índices de irradiação solar da região, o que atesta a confiabilidade e viabilidade técnica do projeto. Como apresentado na Figura 72 acima, é vista por meio de uma análise comparativa visual entre o método empírico que utiliza valores disponibilizados pelo CRESESB, a simulação computacional feita pelo PV*SOL utilizando a base de dados do Meteonorm e a geração real de uma usina já instalada.

A partir desses resultados, fica comprovado há alta concordância entre os dois métodos, com variações pouco significativas que podem ser atribuídas a aspectos técnicos como interpolação de dados meteorológicos, precisão do modelo computacional, e perdas intrínsecas consideradas no software, mas não incluídas diretamente nos cálculos manuais. Portanto, o gráfico comparativo reforça a confiabilidade da simulação no PV*SOL, validando as estimativas obtidas de forma empírica. Dessa forma, constata-se que a viabilidade técnica está confirmada, com base em análises consistentes tanto por via teórica quanto por ferramentas computacionais especializadas.

6.6 Análise do Impacto Financeiro

A análise do impacto financeiro representa uma etapa fundamental na avaliação da viabilidade de implantação de sistemas de geração de energia, especialmente quando se trata de projetos sustentáveis como a energia solar fotovoltaica. Ao considerar não apenas os custos iniciais, mas também os benefícios econômicos de médio e longo prazo, essa análise fornece uma visão abrangente sobre o retorno do investimento e a sustentabilidade financeira da proposta. Nesse sentido, este tópico tem como objetivo detalhar os principais aspectos financeiros envolvidos na implantação da matriz fotovoltaica no campus.

6.6.1 Investimento Inicial para Implantação

A definição do investimento inicial necessário para a implantação de uma usina solar fotovoltaica é um dos elementos principais a serem avaliados em um estudo de viabilidade técnica e econômica. Essa etapa fornece a base para as análises de retorno financeiro, sustentabilidade do projeto e aderência às diretrizes orçamentárias da instituição. Diante disso, foram solicitadas propostas comerciais a empresas com comprovada atuação no setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba, com o intuito de levantar estimativas reais de mercado que sirvam como referência para os cálculos subsequentes.

Foram recebidas três propostas distintas, apresentadas por empresas sediadas nos municípios de Sousa, Cajazeiras e João Pessoa. Cada uma levantou valores distintos para o fornecimento e instalação do sistema completo, considerando que o dimensionamento da potência do sistema e todas etapas de simulações, já foram previamente realizadas pelo autor do trabalho. Todas as propostas foram solicitadas pelo autor do trabalho, por já trabalhar no seguinte a mais de 6 anos, foi utilizada a minha rede de relacionamento dentro do setor para conseguir tais propostas, as mesmas estarão nos anexos do trabalho, para melhor visualização de todos os aspectos apresentados por cada empresa.

As propostas incluíram opções de pagamento à vista e, em alguns casos, planos de parcelamento com financiamento próprio da empresa. A Tabela 8, a seguir, resume os valores apresentados por cada empresa:

Tabela 9: Propostas comerciais de valores para implantação da usina solar no CFP.

EMPRESA	CIDADE	VALOR À VISTA	PARCELAMENTO (72x)	PARCELAMENTO (60x)	PARCELAMENTO (48x)
Empresa 01	Sousa - PB	R\$ 2.655.387,88	R\$ 67.000,00	R\$ 73.600,00	R\$ 83.960,00
Empresa 02	Cajazeiras - PB	R\$ 2.416.485,09	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Empresa 03	João Pessoa - PB	R\$ 2.138.682,25	R\$ -	R\$ -	R\$ -

Fonte: O autor do trabalho, baseado em propostas comerciais recebidas em abril de 2025.

Um ponto importante a ser considerado é que se trata de um investimento realizado por uma instituição federal de ensino, como é o caso da UFCG, logo qualquer contratação deverá obrigatoriamente seguir os trâmites legais exigidos pela Lei nº 14.133/2021 (nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos). Dessa forma, as propostas aqui listadas servirão como base estimativa para a composição do Termo de Referência, que norteará o processo licitatório.

A partir do lançamento do edital, as empresas interessadas poderão participar do certame, concorrendo sob critérios objetivos previamente definidos, como menor preço global, maior tempo de garantia, melhor eficiência técnica dos equipamentos ofertados, acervo técnico da empresa e do responsável técnico da mesma, entre outros. O que tornará possível que mais empresas emitam suas propostas e concorram para o projeto de implantação.

Com base nos valores médios apresentados, será possível estabelecer os parâmetros para análise dos índices de economia sobre o consumo de energia elétrica e tempo de retorno do investimento (payback). Importante destacar que as propostas apresentadas não possuem ainda caráter vinculativo, sendo necessárias análises mais aprofundadas para definir o escopo técnico exato, bem como os critérios exigidos em processos públicos mencionados acima.

Baseado nisso, serão apresentados alguns critérios que tais processos legais podem considerar na hora do lançamento do possível edital para o referente processo licitatório:

- **Garantia dos painéis:** A "garantia linear de performance" mostra a eficiência dos módulos que não deve cair abaixo de determinado percentual ao longo dos anos;
- **Garantia dos inversores:** refere-se ao prazo de cobertura contra falhas ou defeitos de fabricação dos inversores fotovoltaicos fornecidos na proposta do sistema solar;
- **Garantia de serviço:** Refere-se à responsabilidade da empresa sobre falhas na instalação ou problemas com estrutura;

Disto esses aspectos, a Tabela 10 a seguir apresenta as propostas das três empresas citadas no que se refere esses pontos:

Tabela 10: Garantias apresentadas pelas empresas para implantação da usina solar no CFP.

EMPRESA	GARANTIA DOS PAINÉIS	GARANTIA DOS INVERSORES	GARANTIA DOS SERVIÇOS DA INSTALAÇÃO	INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES
Empresa 01	Entre 25 e 30 anos	10 anos	6 anos	Empesa com maiores números em instalações no estado da Paraíba
Empresa 02	Entre 25 e 30 anos	10 anos	1 ano	Possui equipe local para suporte técnico
Empresa 03	Entre 25 e 30 anos	10 anos	2 anos	-

Fonte: O autor do trabalho, baseado em propostas comerciais recebidas em abril de 2025.

Lembrando que as garantias de painéis e inversores pode variar de acordo no o fabricante, ficando essa parte da garantia vinculada então a marca e modelo que os critérios do processo licitatório irão exigir. As garantias apresentadas acima são mediante os equipamentos que foram dimensionados nas etapas anterior, onde foi especificado por mim, equipamento de melhor qualidade e garantias.

6.6.2 Índices de Economia no consumo de energia elétrica

A análise detalhada dos índices de economia no consumo de energia elétrica é fundamental para validar a viabilidade técnica e financeira da implantação de uma usina solar fotovoltaica. Visto isso, estudo foi baseado em apresentar estimativas realistas de economia mensal e anual com base no nas tarifas e no histórico de consumo registrado ao longo do ano de 2024, considerando os períodos de ponta e fora de ponta. A abordagem utilizada não se limita a simulações genéricas, mas se ancora em dados concretos extraídos das faturas mensais de energia elétrica, o que proporciona maior confiabilidade aos resultados obtidos.

A metodologia adotada envolveu a projeção da economia que teria sido obtida mês a mês, caso o sistema fotovoltaico já estivesse operando ao longo do ano de 2024. Os cálculos foram fundamentados no consumo compensável e nas respectivas tarifas de compensação, utilizando como referência o mesmo perfil de consumo da unidade consumidora no período

analisado. Assim, este capítulo visa quantificar com precisão os valores que poderiam ter sido economizados, permitindo ao final traçar uma estimativa sólida de retorno financeiro, essencial para orientar a tomada de decisão quanto à implantação do projeto.

Para fins práticos existe uma diferença entre a tarifa de consumo e a tarifa de compensação no sistema de compensação de energia elétrica da ENERGISA-PB, essa diferença é diretamente relacionada à incidência do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) sobre a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), aplicando-se na prática quando se trata da energia injetada na rede e compensada posteriormente.

Vale ressaltar que tal cobrança possui seu respaldo de aplicabilidade na Lei Complementar nº 194/2022, que alterou dispositivos da Lei Kandir (Lei Complementar nº 87/1996), além de orientações da Resolução Normativa nº 1.059/2023 da ANEEL, que trata da compensação de energia no âmbito do Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022). Isso significa que, na prática, o ICMS continua sendo cobrado sobre a TUSD na energia consumida, mas não é compensado integralmente na energia gerada, gerando assim uma diferença entre o valor cheio da tarifa de consumo e o valor líquido da tarifa de compensação.

Essa cobrança provoca uma redução direta nas economias proporcionadas pela geração fotovoltaica. Isso porque a compensação da energia gerada não consegue abater integralmente os custos presentes na fatura de energia elétrica. Em termos objetivos, podemos dizer que:

- Você consome 1 kWh da rede e paga sobre a energia + tributos (ICMS da TUSD incluso);
- Você injeta 1 kWh na rede e recebe de volta apenas a energia, sem os mesmos tributos, ou com tributação reduzida.

Tabela 11: Comparativo entre Tarifa de Consumo e Tarifa de Compensação com Incidência Média de ICMS – ENERGISA PB (Ano de 2024).

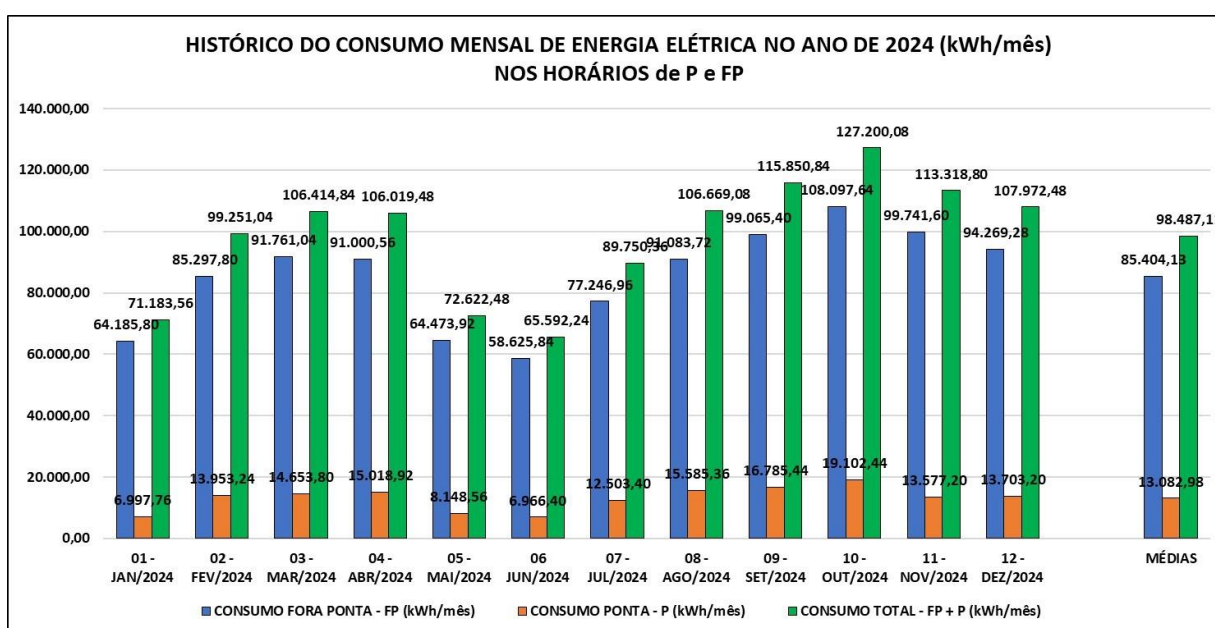
POSTO TARIFÁRIO	TARIFA MÉDIA DE CONSUMO (R\$/KWH)	TARIFA MÉDIA DE COMPENSAÇÃO (R\$/KWH)	DIFERENÇA (R\$/KWH)	PERCENTUAL DE ICMS COBRADO (%)
Fora Ponta	R\$ 0,381907	R\$ 0,363897	R\$ 0,018	4,71%
Ponta	R\$ 2,000283	R\$ 1,696832	R\$ 0,303	15,16%

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

A Tabela 11 acima mostra a redução aparente na tarifa compensada significa, o que significa que mesmo produzindo energia suficiente para compensar o consumo, o cliente ainda terá valores residuais na fatura, o que precisa ser cuidadosamente considerado no cálculo das estimativas de economia e viabilidade financeira do sistema

Com base na estrutura tarifária praticada pela concessionária ENERGISA Paraíba e nas informações extraídas das faturas mensais da UFCG, foi realizada uma simulação detalhada da economia potencial com a implantação da usina solar fotovoltaica, tomando como referência o consumo real de energia registrado mês a mês no ano de 2024. Para início, o Gráfico 7 mostra o histórico de consumo mensal.

Gráfico 7: Histórico de consumo mensal Ponta e Fora Ponta em 2024 do CFP.



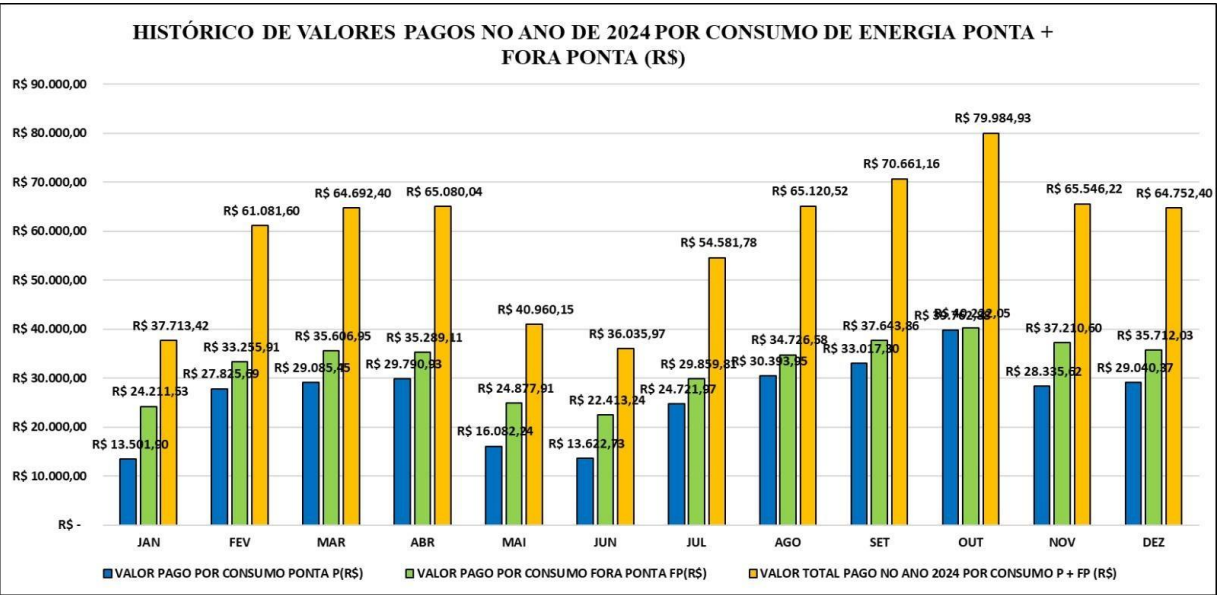
Fonte: O autor do trabalho, com base nos dados disponibilizados pela fatura de energia do CFP, 2025.

Para tanto, foram consideradas as tarifas de consumo e compensação aplicáveis aos períodos de ponta (P) e fora de ponta (FP), bem como os efeitos da cobrança de ICMS sobre a parcela da TUSD, que influencia diretamente na diferença entre as duas tarifas.

A primeira parte da análise teve como objetivo estimar os valores que seriam compensados mensalmente pelo sistema fotovoltaico sobre o total consumido no ano. O cálculo considerou o volume de energia efetivamente consumido pela instituição em cada mês de 2024 (em kWh), aplicando-se as respectivas tarifas mensais para os períodos de ponta e fora de ponta, conforme os dados históricos da distribuidora.

No Gráfico 8, a seguir, são apresentados os valores efetivamente pagos ao longo do ano de 2024 referentes unicamente ao consumo de energia elétrica nos períodos de ponta (P) e fora de ponta (FP). Essa análise desconsidera temporariamente outras parcelas que compõem a fatura de energia elétrica, como encargos, tributos, tarifas de uso do sistema de distribuição (TUSD), demanda contratada e taxas adicionais. O objetivo, neste ponto da avaliação, é isolar a variável do consumo energético para mensurar, com maior precisão, o impacto direto que a implantação da usina solar fotovoltaica teria sobre os custos variáveis da unidade consumidora.

Gráfico 8: Histórico de valores pagos em 2024 apenas pelo consumo mensal Ponta e Fora Ponta do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, com base nos dados disponibilizados pela fatura de energia do CFP, 2025.

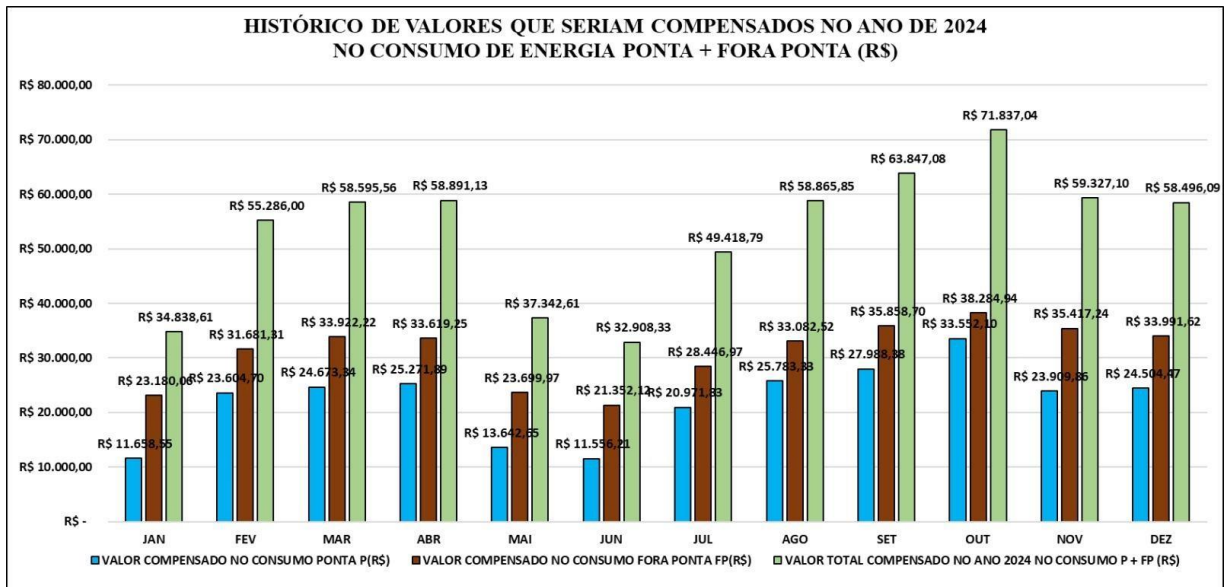
No Gráfico 9 abaixo, é feita a demonstração dos valores que seriam efetivamente compensados no consumo de energia elétrica ao longo dos meses de 2024, considerando os períodos de ponta (P) e fora de ponta (FP).

Nesta etapa da análise, aplicaram-se as tarifas de compensação específicas para cada posto tarifário, levando-se em conta o impacto da cobrança de ICMS sobre a parcela da TUSD, conforme permitido pela legislação vigente. Essa consideração é fundamental para aproximar os cálculos das condições reais praticadas pelas concessionárias de energia elétrica, refletindo de forma mais precisa a economia líquida obtida pela compensação.

Diferentemente da análise anterior, esta etapa são considerados os valores líquidos efetivamente compensáveis na fatura, já descontados os encargos não passíveis de compensação, como o ICMS incidente sobre a TUSD. Essa abordagem confere maior precisão

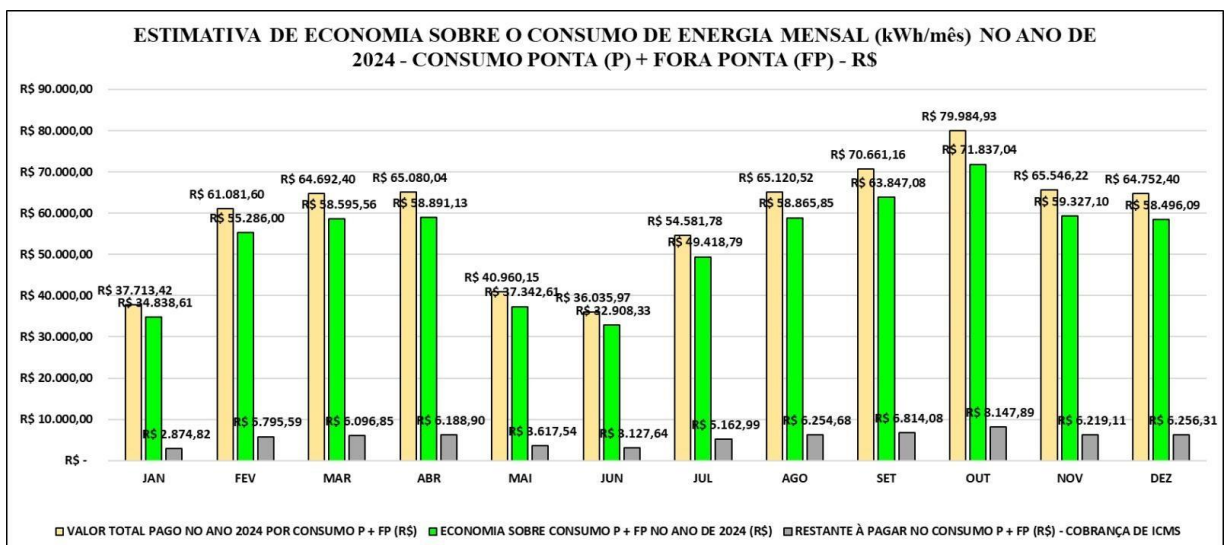
ao estudo, pois reflete com fidelidade a realidade financeira enfrentada pelas instituições consumidoras no modelo de geração distribuída. Assim, a análise proporciona uma estimativa mais confiável do montante de economia mensal proporcionada pela operação da usina solar fotovoltaica instalada no CFP, oferecendo subsídios concretos para a avaliação da viabilidade econômica do projeto.

Gráfico 9: Estimativa de valores que seriam compensados em 2024 no consumo mensal Ponta e Fora Ponta do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, com base nos dados disponibilizados pela fatura de energia do CFP, 2025.

Gráfico 10: Estimativa de Economia no ano de 2024 sobre consumo mensal Ponta e Fora Ponta do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, com base nos dados disponibilizados pela fatura de energia do CFP, 2025.

No Gráfico 10 acima, foi apresentada a comparação final entre o valor total pago pelo CFP mês a mês no ano de 2024 referente ao consumo de energia elétrica e o valor estimado de economia que seria obtido com a implantação da usina solar fotovoltaica no mesmo período, considerando os critérios reais de compensação energética. O mesmo gráfico evidencia agora um valor remanescente a ser pago em todos os meses, esse valor corresponde exclusivamente à incidência de ICMS sobre a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), parcela não compensável conforme estabelece a legislação tributária vigente.

A Tabela 12 abaixo apresenta os resultados gerais dessa primeira parte da análise, essa etapa objetivou estimar os valores que seriam compensados mensalmente pelo sistema fotovoltaico sobre o total consumido no ano, foram considerados para fins de cálculo apenas o volume de energia efetivamente consumido pela instituição em cada mês de 2024 (em kWh).

Tabela 12: Indicadores da estimativa de Economia Sobre o Consumo de Energia Ponta + Fora Ponta (Ano de 2024).

Indicador	Valor (R\$)	Descrição
Valor Total Pago no Ano de 2024 por Consumo P + FP (R\$)	R\$ 706.210,59	Valor que seria pago pela UFCG sem o sistema fotovoltaico pelo consumo anual
Economia Sobre Consumo P + FP no Ano de 2024 (Valor Compensado) (R\$)	R\$ 639.654,20	Valor compensado anual com base na geração estimada da usina fotovoltaica e na tarifa de compensação vigente
Percentual de Economia Sobre o Consumo P + FP	90,58%	Percentual de economia considerando apenas o consumo de energia
Restante a Pagar no Consumo P + FP (ICMS incidente sobre a TUSD) (R\$)	R\$ 66.556,39	Valor não compensável referente ao ICMS, conforme legislação vigente

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Portanto, esses números indicam que a compensação energética gerada pela usina fotovoltaica seria capaz de neutralizar aproximadamente **91%** dos custos com energia elétrica referentes ao consumo ativo da instituição, restando apenas a parcela de tributos que, por

determinação legal (conforme convênio ICMS 16/2015 do CONFAZ), não pode ser abatida por créditos de energia.

Dando continuidade à análise do impacto financeiro, esta segunda etapa tem como objetivo mensurar os ganhos econômicos não apenas sobre o consumo de energia elétrica nos períodos de ponta (P) e fora de ponta (FP), mas sobre o valor integral das faturas mensais de energia elétrica. Essa abordagem oferece uma visão mais abrangente da economia gerada pelo sistema, considerando todos os custos efetivamente pagos pela instituição ao longo do ano.

A seguir, no Figura 73, são apresentados os valores mensais integrais pagos nas faturas de energia no ano de 2024 pelo CFP, repassados pela administração da UFCG – Campus Cajazeiras, na pessoa do senhor Eduardo, prefeito do campus. Esses dados foram disponibilizados ao orientador do presente trabalho por meio de processo SEI (Sistema Eletrônico de Informações), garantindo a autenticidade e a precisão dos registros.

Figura 73: Valores pagos de fatura de energia pelo CPF no ano de 2024.

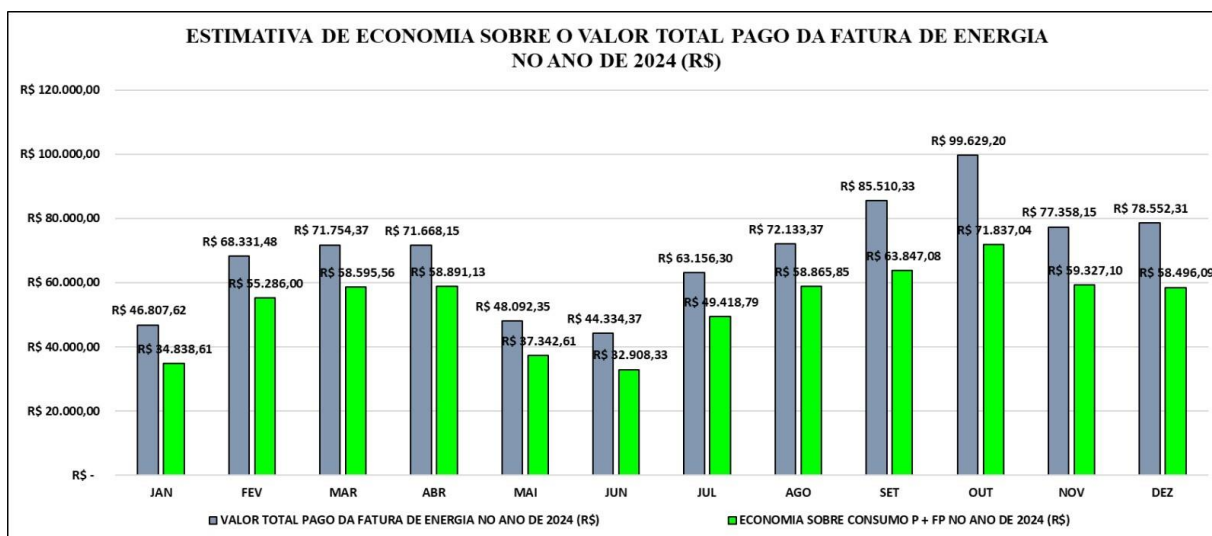
Consumo em 2024			
Mês	Documento	kWh(P+FP)	Valor (R\$)
Janeiro	4182214	71.373,56	46.807,62
Fevereiro	4275629	99.556,04	68.331,48
Março	4343157	106.695,84	71.754,37
Abril	4414052	106.386,48	71.668,15
Maio	4502927	72.957,48	48.092,35
Junho	4573424	65.954,24	44.334,37
Julho	4673146	90.054,36	63.156,30
Agosto	4780828	106.947,08	72.133,37
Setembro	4873499	116.205,84	85.510,33
Outubro	4992223	127.616,08	99.629,20
Novembro	5112516	113.908,80	77.358,15
Dezembro	5165850	108.621,48	78.552,31

Fonte: Subprefeitura do campus, encaminhado vis processo eletrônico no SEI pelo prefeito Eduardo, 2025.

Além do consumo de energia, as faturas de unidades consumidoras do Grupo A como a UFCG, incluem outras componentes tarifárias, como encargos setoriais, tributos (ICMS, PIS, COFINS), tarifa de demanda contratada (TUSD), taxa de iluminação pública e bandeiras tarifárias (quando houver). Portanto, é fundamental que a análise de viabilidade financeira também leve em conta esses custos adicionais, pois impactam diretamente no orçamento institucional. A seguir, no Gráfico 11, são apresentados os valores mensais integrais pagos nas

faturas de energia no ano de 2024 *versus* a economia mensal estimada proporcionada pelo sistema fotovoltaico, baseada no valor compensado em cada mês. Essa visualização permite verificar o comportamento da economia mês a mês e sua relevância dentro do valor total pago.

Gráfico 11: Estimativa de Economia no ano de 2024 sobre o valor total pago na fatura de energia elétrica do CFP.



Fonte: O autor do trabalho, com base nos dados disponibilizados pela fatura de energia do CFP, 2025.

Um ponto importante a se destacar, é que nesta etapa, não foi necessário discriminar o valor residual de ICMS sobre a TUSD, como feito na análise anterior, pois tal parcela já está embutida no total das faturas mensais informadas. Isso confere ao estudo um viés mais realista, ao refletir diretamente o impacto do sistema fotovoltaico sobre os custos totais com energia elétrica da instituição. A Tabela 12 a seguir consolida os principais indicadores financeiros relacionados à economia gerada pelo sistema fotovoltaico com base no valor integral das faturas de energia elétrica ano de 2024.

Os valores apresentados nesta etapa da análise contemplam não apenas o consumo de energia elétrica nos períodos de ponta e fora de ponta, mas também todas as demais parcelas que compõem a estrutura tarifária das faturas mensais da unidade consumidora. Isso inclui tributos como o ICMS, encargos setoriais definidos pela ANEEL, bem como a tarifa relativa à demanda contratada, que é o valor fixo cobrado pela concessionária com base na potência disponibilizada ao consumidor.

Ao considerar todos esses componentes financeiros, a avaliação torna-se mais abrangente e fiel à realidade enfrentada pela instituição. Isso permite estimar com maior

precisão os benefícios econômicos advindos da implantação da usina solar fotovoltaica, evidenciando o impacto positivo do projeto tanto na redução dos custos operacionais quanto no alívio orçamentário de longo prazo.

Tabela 13: Indicadores da estimativa de economia sobre valor total pago nas faturas mensais de energia no ano de 2024 pelo CFP.

Indicador	Valor (R\$)	Descrição
Valor total pago de fatura de energia no ano de 2024	R\$ 827.328,00	Soma dos valores pagos mensalmente pela UFCG em todas as faturas de energia de 2024
Economia sobre consumo P + FP no ano de 2024 (valor compensado no consumo)	R\$ 639.654,20	Valor que seria compensado pelo sistema fotovoltaico, considerando tarifas reais de compensação
Percentual médio de economia sobre o valor integral da fatura	77,32%	Percentual de economia obtido ao se comparar o valor compensado com o valor total das faturas

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Portando, com om base nos dados analisados, foi comprovado que a proposta de implantação da usina solar fotovoltaica, apresenta um elevado nível de viabilidade econômica, tanto sob a perspectiva do consumo energético quanto em relação ao custo total das faturas de energia elétrica.

No cenário da estimativa de economia sobre o consumo mensal de energia nos períodos de ponta e fora de ponta (P + FP) do ano de 2024, o sistema seria capaz de compensar aproximadamente **R\$ 639.654,20**, representando **90,70%** de economia sobre o consumo direto de energia elétrica. Tal percentual evidencia a expressiva capacidade de autossuficiência energética do sistema, mesmo considerando as limitações impostas pela cobrança de ICMS sobre a TUSD, que impede a compensação integral do consumo faturado.

Quando se aplicou a análise considerando o valor integral das faturas – que inclui não apenas o consumo, mas também tributos, encargos setoriais e a demanda contratada –, o desempenho do sistema ainda se mantém altamente satisfatório. Com um valor total pago de **R\$ 827.328,00** em 2024, o sistema proposto proporcionaria uma economia estimada de **R\$**

639.654,20, o que corresponde a uma redução de **77,40%** no valor global do consumo faturado. Essa economia consolidada representa um retorno financeiro significativo e recorrente, que contribui para a sustentabilidade econômica da instituição no médio e longo prazo. Toda base de dados criada por mim para realizar tais análises, encontra-se nos anexos do trabalho.

6.6.3 Payback Financeiro (Retorno do Investimento)

O *payback financeiro* é um dos principais indicadores utilizados para avaliar a viabilidade econômica de projetos de geração de energia solar fotovoltaica. Ele representa o tempo necessário para que o valor investido inicialmente na implantação da usina seja recuperado por meio das economias geradas na fatura de energia elétrica. Trata-se de uma métrica de interpretação, amplamente adotada tanto em análises técnicas quanto em processos de tomada de decisão financeira.

No contexto deste projeto, o cálculo do payback permite estimar com precisão em quantos anos a UFCG Campus Cajazeiras poderá alcançar o retorno total do investimento, considerando os benefícios econômicos mensais obtidos com a compensação energética ao longo da vida útil do sistema. Além da análise do tempo de retorno, este tópico também apresentará a economia total acumulada ao longo dos 30 anos de operação da usina fotovoltaica, demonstrando de forma quantitativa os ganhos financeiros progressivos proporcionados pela geração própria de energia

Para base de cálculos do investimento inicial utilizados nesta análise, optou-se pela proposta apresentada pela Empresa 01, sediada em Sousa-PB. Essa escolha se deu considerando não apenas os aspectos financeiros, mas sobretudo os critérios de segurança técnica e confiabilidade no atendimento pós-instalação. A Empresa 01 apresentou um histórico consolidado no mercado regional, com amplo acervo técnico, diversas obras realizadas e reputação consolidada no setor de energia solar fotovoltaica regional. Além disso, a empresa se destacou entre as concorrentes ao oferecer 6 anos de garantia sobre os serviços prestados, um diferencial relevante quando comparado às demais propostas recebidas, que previam apenas 1 e 2 anos de garantia do serviço, respectivamente.

Essa extensão de garantia e o suporte pós-venda reforçam a viabilidade técnica da proposta, assegurando maior tranquilidade ao contratante quanto à operação e à manutenção da usina ao longo do tempo. Diante desses fatores, a proposta da Empresa 01 foi adotada como

referência para a definição do investimento inicial total no valor de R\$ 2.655.387,88, valor que será utilizado nas simulações do fluxo de caixa, payback e retorno financeiro do sistema fotovoltaico projetado para o CFP.

A Tabela 13 a seguir apresenta os parâmetros considerados como dados de entrada para a realização das simulações de fluxo de caixa, payback, retorno sobre o investimento (ROI) e economia acumulada ao longo do período de análise do projeto da usina solar fotovoltaica a ser instalada.

Tabela 14: Dados de Entrada para Cálculo do Payback Financeiro.

PARÂMETRO	VALOR	DESCRIÇÃO
Investimento inicial total	R\$ 2.655.387,88	Valor total da proposta da Ative Energia Solar
Economia média mensal estimada (1º ano)	R\$ 53.304,52	Baseado na estimativa de geração e tarifas de 2024
Economia média anual estimada (1º ano)	R\$ 639.654,20	Valor projetado para o primeiro ano de operação
Período de análise	25 anos	Corresponde à vida útil média esperada dos painéis fotovoltaicos (Esse fator depende do fabricante dos painéis)
Performance Ratio (PR)	0,8	Eficiência média do sistema ao longo dos 25 anos, conforme especificações do fabricante
Reajuste anual da tarifa de energia	7%	Média de reajuste aplicado pelas distribuidoras de energia no Brasil
Potência da usina	885,50 kWp	Potência total instalada (corrente contínua – CC)
Despesa média anual com manutenção	R\$ 3.000,00	Estimativa de custos operacionais fixos por ano, diluído nesse valor possíveis manutenções como troca de inversores a cada 10 anos, limpeza a cada 06 meses dos painéis e serviço de gerenciamento e manutenção pago mensalmente a empresa contratada (valor de R\$ 0,02 por kWh de geração).

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Esses dados foram definidos com base nas informações levantadas ao longo do trabalho, considerando os custos estimados, desempenho da usina, condições do mercado e projeções energéticas. Com base nos parâmetros definidos na Tabela 13, que apresentam os dados de entrada para as simulações do fluxo de caixa, payback, retorno sobre o investimento (ROI) e economia acumulada, é possível agora avançar para a apresentação dos resultados obtidos. Esses cálculos têm como objetivo avaliar a viabilidade financeira do projeto da usina solar fotovoltaica a ser instalada, ao longo de um período de 25 anos. A seguir, são apresentados os resultados de cada métrica, na ordem de aplicação dos dados de entrada:

1. Payback (Tempo de Retorno de Investimento)

O Payback representa o tempo necessário para que o fluxo de caixa acumulado do projeto cubra o valor do investimento inicial. Esse cálculo é utilizado para avaliar o tempo que levará para que a usina comece a gerar retorno financeiro. A fórmula para o cálculo do Payback é a seguinte:

$$\text{Economia anual}_t = \text{Economia anual 1º ano} * (1 + \text{Reajuste}) - \text{despesa com manutenção anual} \quad (18)$$

$$\text{Economia anual}_t = \text{R\$ } 639.654,20 * 1,07 - \text{R\$ } 3.000,00$$

$$\text{Economia anual}_t \cong \text{R\$ } 681.429,99$$

Sendo a economia anual estimada no primeiro ano foi de **R\$ 639.654,20**, com um reajuste de **7%** ao ano. Além disso, as despesas com a manutenção anual da usina somam **R\$ 3.000,00**. O Payback foi determinado com base nesses valores, indicando o tempo necessário para que o projeto atinja o retorno do investimento inicial.

A partir dessas premissas, foi elaborada uma tabela com os cálculos do fluxo de caixa ao longo dos 25 anos como período de análise, para justificar esse tempo de retorno do investimento inicial, a Tabela 14 apresenta essa base de cálculos.

Tabela 15: Valores do Fluxo de caixa ao longo dos 25 anos.

TAXA DE REAJUSTE ANUAL (%)	DESPESA MÉDIA COM MANUTENÇÃO ANUAL (R\$)	INVESTIMENTO INICIAL (R\$)
1,07	R\$ 3.000,00	R\$ 2.655.387,88
FLUXO DE CAIXA (R\$ * ANO)		
ANO	ECONOMIA ANUAL (R\$)	PAYBACK
1	R\$ 639.654,20	-R\$ 2.015.733,68
2	R\$ 681.429,99	-R\$ 1.334.303,69
3	R\$ 726.130,09	-R\$ 608.173,59
4	R\$ 773.959,20	R\$ 165.785,61
5	R\$ 825.136,34	R\$ 990.921,95
6	R\$ 879.895,89	R\$ 1.870.817,84
7	R\$ 938.488,60	R\$ 2.809.306,44
8	R\$ 1.001.182,80	R\$ 3.810.489,24
9	R\$ 1.068.265,60	R\$ 4.878.754,84
10	R\$ 1.140.044,19	R\$ 6.018.799,03
11	R\$ 1.216.847,28	R\$ 7.235.646,32
12	R\$ 1.299.026,59	R\$ 8.534.672,91
13	R\$ 1.386.958,46	R\$ 9.921.631,36
14	R\$ 1.481.045,55	R\$ 11.402.676,91
15	R\$ 1.581.718,74	R\$ 12.984.395,65
16	R\$ 1.689.439,05	R\$ 14.673.834,69
17	R\$ 1.804.699,78	R\$ 16.478.534,47
18	R\$ 1.928.028,76	R\$ 18.406.563,24
19	R\$ 2.059.990,78	R\$ 20.466.554,02
20	R\$ 2.201.190,13	R\$ 22.667.744,15
21	R\$ 2.352.273,44	R\$ 25.020.017,59
22	R\$ 2.513.932,58	R\$ 27.533.950,18
23	R\$ 2.686.907,86	R\$ 30.220.858,04
24	R\$ 2.871.991,41	R\$ 33.092.849,45
25	R\$ 3.070.030,81	R\$ 36.162.880,27

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Onde o Payback é dado por:

$$\textbf{Payback} = \textbf{Ano onde o fluxo de caixa acumulado iguala o inves. inicial} \quad (19)$$

Portanto, o Payback que é o Tempo de Retorno de Investimento Inicial para a proposta do nosso projeto de implantação da matriz solar fotovoltaica na UFCG campus Cajazeiras, será de:

$$\textbf{Payback} = \textbf{4 anos}$$

2. Economia Total Acumulada ao Longo de 25 Anos

A Economia Total Acumulada é a soma das economias líquidas anuais (economia anual - manutenção), considerando o reajuste anual pela inflação de 7% a cada ano. Para o cálculo da economia total acumulada, a fórmula é:

$$\textbf{Economia Total Acumulada} = \sum_{t=1}^{25 \text{ ans}} \textbf{Economia anual}_t \quad (20)$$

Logo, com base no fluxo de caixa apresentado na tabela acima, a economia total acumulada prevista será de:

$$\textbf{Economia Total Acumulada} = \sum_{t=1}^{25 \text{ ans}} \textbf{R\$ 681.429,99}$$

$$\textbf{Economia Total Acumulada} = \textbf{R\$ 38.818.268,15}$$

3. Retorno sobre o Investimento (ROI)

O ROI é uma métrica que indica a rentabilidade do projeto ao longo do tempo, mostrando a relação entre o lucro gerado pela usina e o investimento inicial. Vamos utilizar

essa fórmula para o cálculo do ROI é:

$$ROI = \frac{\text{Economia Total Acumulado} - \text{Investimento Inicial}}{\text{Investimento Inicial}} * 100 \quad (21)$$

Logo,

$$ROI = \frac{R\$ 38.818.268,15 - R\$ 2.655.387,88}{R\$ 2.655.387,88} * 100$$

$$ROI = \frac{R\$ 36.162.880,27}{R\$ 2.655.387,88} * 100$$

Portanto,

$$ROI = 1.361,87 \%$$

O cálculo do ROI reflete a porcentagem do retorno financeiro sobre o valor investido, fornecendo uma visão clara da rentabilidade do projeto.

4. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é uma métrica que indica a taxa de rentabilidade anual do investimento, ou seja, a taxa de desconto que faz com que o valor presente líquido (VPL) do fluxo de caixa seja zero. A fórmula usada para o cálculo do VPL e, consequentemente, da TIR é:

$$VPL(0) = \sum_{t=0}^{25 \text{ anos}} \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (22)$$

Onde FC_t é o fluxo de caixa anual no ano t , r é a taxa interna de retorno e t representa

os períodos (de 0 a 25, neste caso). Para o nosso caso, teremos $FC_0 = - R\$ 2.655.387,88$ (investimento inicial negativo) e de FC_1 até FC_{25} são os fluxos de caixa anuais líquidos (subtraído o custo de manutenção de R\$ 3.000,00/ano). Portanto, a TIR calculado do projeto foi de:

$$TIR = 30,22 \%$$

Uma TIR de 30,22% ao ano significa que esse é o retorno anualizado do projeto com base nos fluxos de caixa esperados. Se o custo de capital ou a taxa mínima de atratividade for menor que esse valor (por exemplo, 10% ao ano), o investimento é altamente atrativo e lucrativo.

5. Fluxo de Caixa Anual (R\$ x Ano)

Para o Fluxo de Caixa do nosso projeto, o mesmo foi calculado considerando o valor do investimento inicial (negativo) e somando as economias líquidas (economia anual - manutenção) a cada ano. De acordo com a formula abaixo:

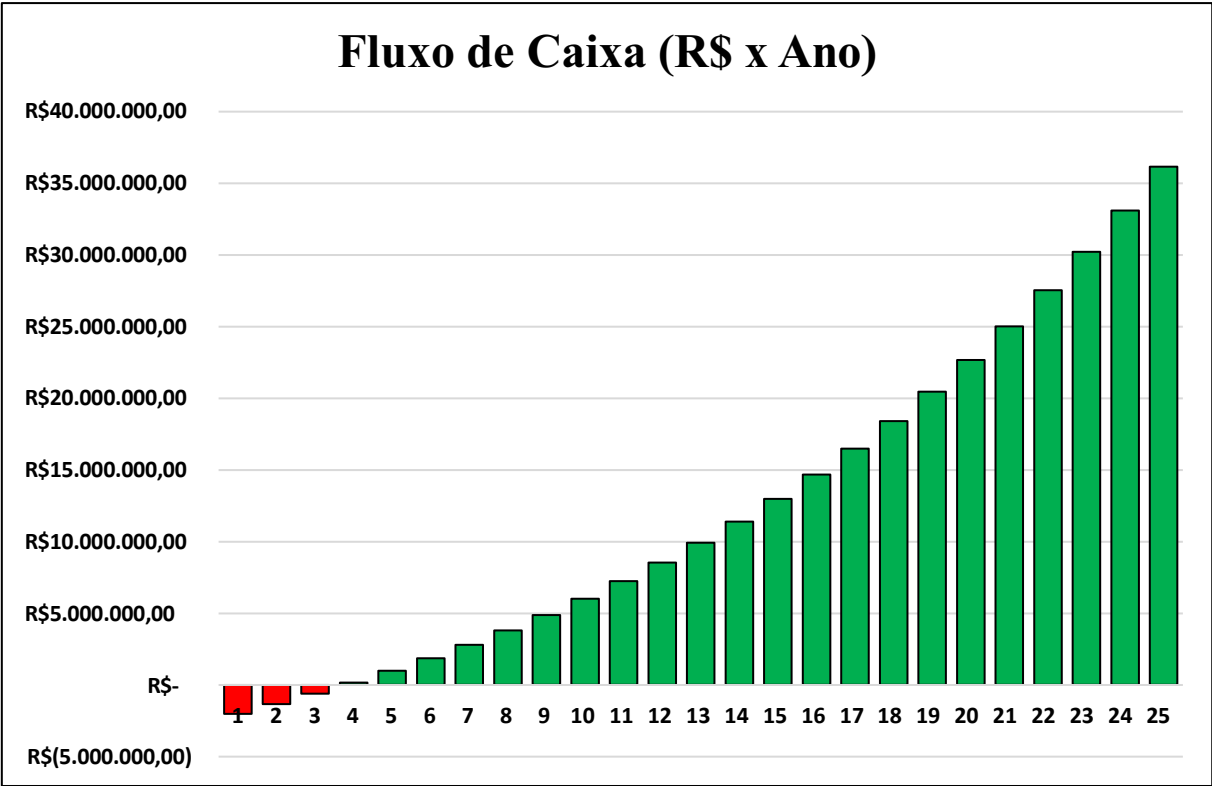
$$FC_t = E_t - C \quad (23)$$

Onde FC_t é Fluxo de caixa líquido no ano t , E_t é Economia com energia anual t , C é o custo anual médio de manutenção da usina (R\$ 3.000,00). Porém, nossa economia calculada é reajustada em 7% ao ano, logo a fórmula fica como sendo:

$$FC_t = E_1 * (1 + tr)^{(t-1)} - C \quad (24)$$

Onde E_1 representa a economia no primeiro ano (R\$ 639.654,20), tr é taxa de reajuste anual da economia (7% ou 0,07) e t é o representa o período analisado (1 a 25 anos). Baseado nessa formula e nos valores calculados e apresentados na Tabela 16, o Gráfico 12 apresenta de maneira gráfica o Fluxo de Caixa do nosso projeto, dentro do período escolhido de 25 anos.

Gráfico 12: Fluxo de caixa ao longo dos 25 anos.



Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Com base nos resultados obtidos nas análises financeiras, comprovou-se que o projeto da implantação da usina apresenta alta viabilidade econômica. A Tabela 16 abaixo apresenta a sínteses dos resultados financeiros obtidos no estudo.

Tabela 16: Indicadores Financeiros Obtidos.

INDICADOR FINANCEIRO	RESULTADO OBTIDO
Payback (Tempo de Retorno)	4 anos
Economia Total Acumulada (25 anos)	R\$ 38.818.268,15
Retorno sobre o Investimento (ROI)	1.361,87%
Taxa Interna de Retorno (TIR)	30,22%

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

6.7 Análise do Impacto Ambiental

A busca eminente por fontes de energia sustentáveis não se limita apenas à viabilidade técnica e econômica, mas também envolve profundas análises ambientais. No contexto das mudanças climáticas e da urgência por mitigações na emissão de GEE, a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, por exemplo, representa uma alternativa eficaz para a redução da pegada de carbono institucional. Será apresentado nessa seção os impactos ambientais positivos esperados, tendo como foco principal a mitigação das emissões de CO₂.

A geração de eletricidade a partir da matriz elétrica tradicional brasileira, embora majoritariamente composta por fontes renováveis, ainda possui uma parcela significativa oriunda de fontes fósseis, especialmente em momentos de acionamento das termelétricas. Por isso, cada megawatt-hora (MWh) de energia gerada por sistemas solares fotovoltaicos que substitui a energia da rede contribui diretamente para a redução das emissões de GEE.

Para quantificar essa contribuição, será utilizado o fator médio de emissão de CO₂ do setor elétrico brasileiro, publicado anualmente pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). A estimativa de redução será baseada em duas etapas: A primeira etapa estimar a quantidade de CO₂ que teria sido emitida pela UFCG campus Cajazeiras, ao longo do ano de 2024, considerando o consumo total de energia elétrica registrado mês a mês. A segunda etapa da análise consiste em estimar a redução efetiva nas emissões de CO₂ proporcionada pela geração de energia a partir da fonte solar fotovoltaica, projetada para atender à demanda elétrica.

6.7.1 Redução de Emissões de CO₂

Para realização das estimativas de redução de CO₂, o fator de emissão médio de dióxido de carbono (CO₂) do setor elétrico brasileiro é um indicador fundamental para a avaliação dos impactos ambientais associados ao consumo e à geração de energia elétrica. Esse fator é oficialmente publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2023), com base nos dados disponibilizados pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE, 2022), que integra os esforços do governo federal para garantir a transparência na comunicação das emissões de GEE no Brasil.

Essa plataforma compila e processa informações a respeito das emissões provenientes

de diferentes setores da economia nacional, incluindo o setor elétrico. Na Figura 74 abaixo é apresentando as Emissões de GEE pelo setor de energia entre os anos de 1990 a 2022.

Figura 74: Emissão de GEE do Brasil pelo setor de energia entre 1990 a 2022.

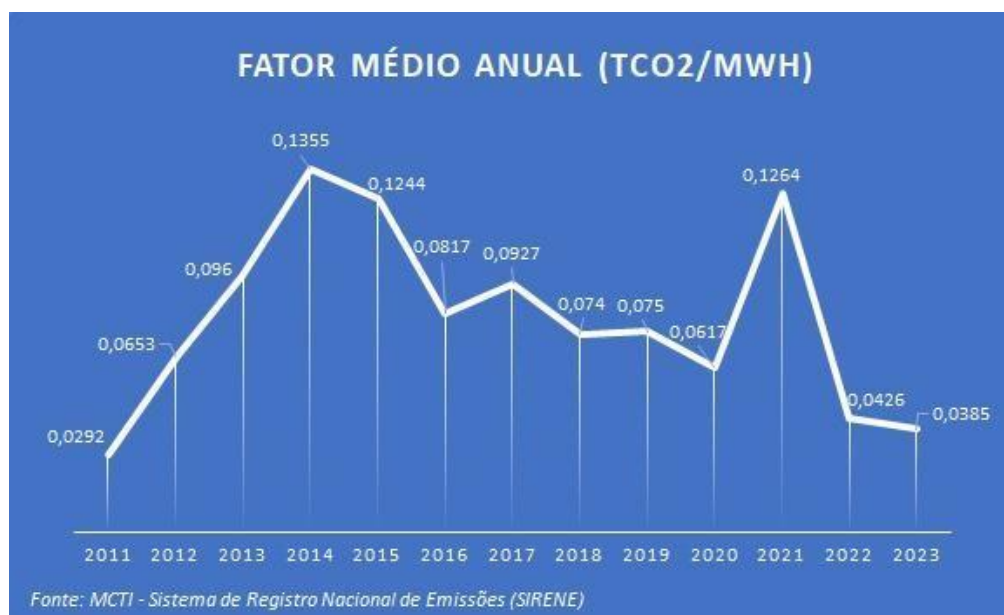


Fonte: MCTI. Emissões de GEE por setor econômico. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-de-gee-por-setor-1>>. Acesso em 20 de abril de 2025.

A metodologia empregada para o cálculo do fator de emissão considera toda a energia gerada para abastecer o Sistema Interligado Nacional (SIN), coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2023). São levadas em conta, especialmente, as fontes fósseis de geração elétrica, como o carvão mineral, óleo combustível e gás natural, cuja queima libera significativas quantidades de CO₂ na atmosfera.

O fator médio anual é calculado a partir da razão entre a quantidade total de CO₂ emitida pelas usinas termelétricas e o total de energia elétrica efetivamente gerada e consumida no SIN ao longo do mesmo período. Essa métrica representa, portanto, o impacto médio ambiental de cada megawatt-hora (MWh) consumido em termos de emissões de dióxido de carbono. A Figura 75 abaixo apresenta os resultados divulgados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2024) para o fator médio anual de 2011 a 2023.

Figura 75: Fator médio anual de emissão de dióxido de carbono (CO₂) em ton.CO₂/MWh.



Fonte: MCTI. Dados do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE). Disponível em: <
<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos>>. Acesso em 20 de abril de 2025.

Logo, baseado nos dados mais recentes divulgados pelo MCTI, em 2023 o Brasil registrou a menor emissão de CO₂ para o setor elétrico nos últimos doze anos. A utilização deste fator de emissão permite quantificar de forma precisa a redução potencial de CO₂ decorrente da substituição da energia da rede por energia fotovoltaica. Portanto, para os critérios adotados nos cálculos a partir de agora, vamos adotar o fator mais recente de 2023 disponibilizado pelo (MCTI, 2023):

$$\text{Fator de Emissão Médio de CO}_2 = 0,0385 \text{ tonCO}_2/\text{MWh} \quad (25)$$

Ou, convertendo para quilogramas:

$$\text{Fator de Emissão Médio de CO}_2 = 38,50 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}$$

Com base no Fator de Emissão Médio de CO₂ conhecido, vamos para primeira etapa das análises, onde essa será baseada em estimar a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) que teria sido emitida pela UFCG campus Cajazeiras, ao longo do ano de 2024, considerando o consumo total de energia elétrica registrado mês a mês.

Com base nesse coeficiente e nos dados mensais de consumo de energia elétrica da UFCG (em kWh), a metodologia adotada consiste na conversão de cada valor de consumo mensal para MWh e posterior multiplicação pelo fator de emissão citado. Esse procedimento permite calcular, de forma estimada, a quantidade de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂) que a instituição teria emitido caso todo o fornecimento energético tivesse origem na matriz convencional do SIN.

A Tabela 17 a seguir apresentará os valores mensais de consumo de energia elétrica em kWh e MWh em 2024, acompanhados das respectivas estimativas de emissões de CO₂, permitindo, posteriormente, uma comparação direta com a economia ambiental proporcionada pela usina fotovoltaica projetada neste trabalho.

Tabela 17: Quantidades de emissão de CO₂ baseado nos consumos do ano de 2024.

MÊS/ANO DE REFERÊNCIA	CONSUMO TOTAL (kWh/mês)	CONSUMO TOTAL (MWh/mês)	FATOR DE EMISSÃO CO ₂ (tCO ₂ /MWh)	EMIÇÃO CO ₂ (tCO ₂)	EMIÇÃO CO ₂ (kgCO ₂)
01 - JAN/2024	71.183,56	71,18	0,0385	2,7406	2.740,5671
02 - FEV/2024	99.251,04	99,25	0,0385	3,8212	3.821,1650
03 - MAR/2024	106.414,84	106,41	0,0385	4,0970	4.096,9713
04 - ABR/2024	106.019,48	106,02	0,0385	4,0817	4.081,7500
05 - MAI/2024	72.622,48	72,62	0,0385	2,7960	2.795,9655
06 - JUN/2024	65.592,24	65,59	0,0385	2,5253	2.525,3012
07 - JUL/2024	89.750,36	89,75	0,0385	3,4554	3.455,3889
08 - AGO/2024	106.669,08	106,67	0,0385	4,1068	4.106,7596
09 - SET/2024	115.850,84	115,85	0,0385	4,4603	4.460,2573
10 - OUT/2024	127.200,08	127,20	0,0385	4,8972	4.897,2031
11 - NOV/2024	113.318,80	113,32	0,0385	4,3628	4.362,7738
12 - DEZ/2024	107.972,48	107,97	0,0385	4,1569	4.156,9405
TOTAL	1.181.845,28	1.181,85	0,0385	45,50	45.501,04

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Foram adotadas as seguintes bases de cálculo:

$$\text{Emissão CO}_2 \text{ (tCO}_2\text{)} = \text{Energia consumida (MWh)} * \text{Fator (tCO}_2\text{/MWh)} \quad (26)$$

$$\text{Emissão } CO_2 (tCO_2) = 1.181,85 (MWh/ano) * 0,0385 (tCO_2/MWh)$$

$$\text{Emissão } CO_2 (tCO_2) \cong 45,50 tCO_2$$

Com base nos dados obtidos, foi estimada uma emissão total de **45,50 toneladas** de dióxido de carbono (tCO_2), equivalente a aproximadamente **45.501,04 kg de CO_2** lançados na atmosfera provenientes da geração de energia elétrica que foi necessária para suprir a demanda do CPF no ano de 2024. Esse montante representa o impacto ambiental indireto da instituição ao consumir energia elétrica proveniente da matriz energética convencional brasileira, que ainda possui participação de fontes fósseis como gás natural, carvão mineral e óleo combustível, especialmente em períodos de escassez hídrica ou acionamento de termelétricas.

Dessa forma, se a usina solar fotovoltaica proposta neste trabalho já estivesse em plena operação durante o ano de 2024, a UFCG **teria deixado de emitir integralmente essas 45,50 toneladas de CO_2** , contribuindo de forma significativa para a mitigação dos impactos ambientais e para o cumprimento das metas de redução de GEE estabelecidas em acordos nacionais e internacionais. Esse dado reforça o papel estratégico das instituições públicas no protagonismo da transição energética e na adoção de soluções sustentáveis no setor elétrico.

Dando continuidade à análise, a segunda etapa consiste em estimar os benefícios ambientais projetados com a entrada em operação da usina fotovoltaica da UFCG, considerando sua capacidade de geração anual. Para isso, aplicaremos o mesmo fator oficial de emissão de CO_2 à energia simulada pelo software PV*SOL, permitindo mensurar a redução estimada de emissões ao longo de um ano de operação da planta solar. Vamos adotar a seguinte base de cálculos:

$$\text{Redução de } CO_2 (tCO_2) = \text{Energia gerada } (MWh/ano) * \text{Fator } (tCO_2/MWh) \quad (27)$$

Logo:

$$\text{Redução de } CO_2 (tCO_2) = \frac{1.555.988 (kWh/ano)}{1.000} * \text{Fator } (tCO_2/MWh)$$

$Redução\ de\ CO^2\ (tCO^2) = 1.555,988\ (MWh/ano) * 0,0385\ (tCO_2/MWh)$

Portanto, a partir desse base de cálculos tem-se a estimativa de quanto de CO₂ que a universidade deixará de lançar na atmosfera, diante da implantação da planta solar que está sendo proposta nesse projeto:

$Redução\ de\ CO^2\ (tCO^2) = 59,90\ tCO_2$

Por fim, a Tabela 18 a seguir apresenta uma síntese dos resultados obtidos na análise de emissões de CO₂, permitindo comparar o cenário atual UCG, com base nos dados de consumo de energia elétrica no ano de 2024 e sem geração de sua própria energia, com o cenário projetado para após a implantação da usina solar fotovoltaica proposta neste trabalho.

Tabela 18: Comparativo das Emissões de CO₂ da UFCG com e sem Usina Fotovoltaica.

SITUAÇÃO	ENERGIA CONSIDERADA (kWh/ano)	CENÁRIOS DE CO ₂ (tCO ₂ /ano)	CENÁRIOS DE CO ₂ (kgCO ₂ /ano)
Consumo atual sem geração fotovoltaica (2024)	1.181.932,00	45,50	45.501,04
Redução com geração da usina fotovoltaica	1.555.988,00	59,91	59.905,54

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Essa etapa do projeto buscou evidenciar de maneira significativa os aspectos voltados a contribuição ambiental do sistema fotovoltaico, ao quantificar a redução potencial de emissões de gases de efeito estufa decorrente da geração de energia renovável no campus universitário.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente pesquisa foi proposta em avaliar, de forma ampla e criteriosa, a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina solar fotovoltaica no CFP. Com base em dados reais de consumo, ferramentas de simulação de alto desempenho e fundamentos teóricos sólidos, foi possível alcançar uma compreensão profunda do potencial energético da região, bem como das oportunidades de economia e sustentabilidade que a transição para a energia solar fotovoltaica pode proporcionar.

A análise será organizada em cinco eixos fundamentais: a viabilidade técnica da implantação da usina solar fotovoltaica; a viabilidade econômica frente aos investimentos e retornos estimados; os impactos ambientais positivos associados à redução das emissões de CO₂; e, por fim, a conectividade com a metodologia adotada, demonstrando como cada etapa técnica e analítica contribuiu para os desdobramentos e validações do projeto. Eixos esses, que compõem juntos a proposta fundamental de trabalho.

7.1 Síntese dos Resultados Obtidos

Serão apresentadas abaixo as sínteses do principais pontos que foram os objetivos do trabalho: a viabilidade técnica da implantação da usina solar fotovoltaica; a viabilidade econômica frente aos investimentos e retornos estimados; os impactos ambientais positivos associados à redução das emissões de CO₂; a relevância acadêmica e institucional para a UFCG; e, por fim, a conectividade com a metodologia adotada, demonstrando como cada etapa técnica e analítica contribuiu para os desdobramentos e validações do projeto.

- **Viabilidade técnica**

A viabilidade técnica do projeto de implantação de uma usina solar fotovoltaica CFP, foi comprovada a partir dos dados de dimensionamento e simulação obtidos ao longo do estudo. A potência total da usina projetada foi de **885,50 kWp**, utilizando **1.610 módulos** fotovoltaicos com potência unitária de **550 Wp**, conectados a **6 inversores** trifásicos de **100 kW** de potência cada.

A simulação energética realizada no software **PV*SOL premium 2025 (R5)** estimou uma geração anual de **1.555.988 kWh/ano**, com um Fator Solar (FS) de **146,41 kWh/kWp** e

um índice de desempenho (**Performance Ratio - PR**) de **80%**, e uma irradiância média diária de **6,10 kWh/m².dia.**, conforme apresentado na Tabela 19 e Figura 76 a seguir:

Tabela 19: Dados técnicos consolidados da simulação no PV*SOL.

PARÂMETRO	QUANTIFICAÇÃO
Performance Ratio (PR)	0,80
Rendimento anual específico	1.757,03 kWh/kWp.ano
Fator Solar médio mês (FS)	146,41 kWh/kWp.mês
Geração anual média estimada	1.555.988 kWh/ano
Irradiação média diária	6,10 kWh/m².dia
Geração mensal média estimada	129.665,66 kWh/ano
Potência Total CC (kWp)	885,50 kWp
Potência Total CA (kW)	600 kW
Nº de painéis de 550 Wp	1.610 painéis
Nº de inversores de 100 kW	6 unidades

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Figura 76: Estimativa mensal de geração de energia da usina fotovoltaica simulada no software PV*SOL.

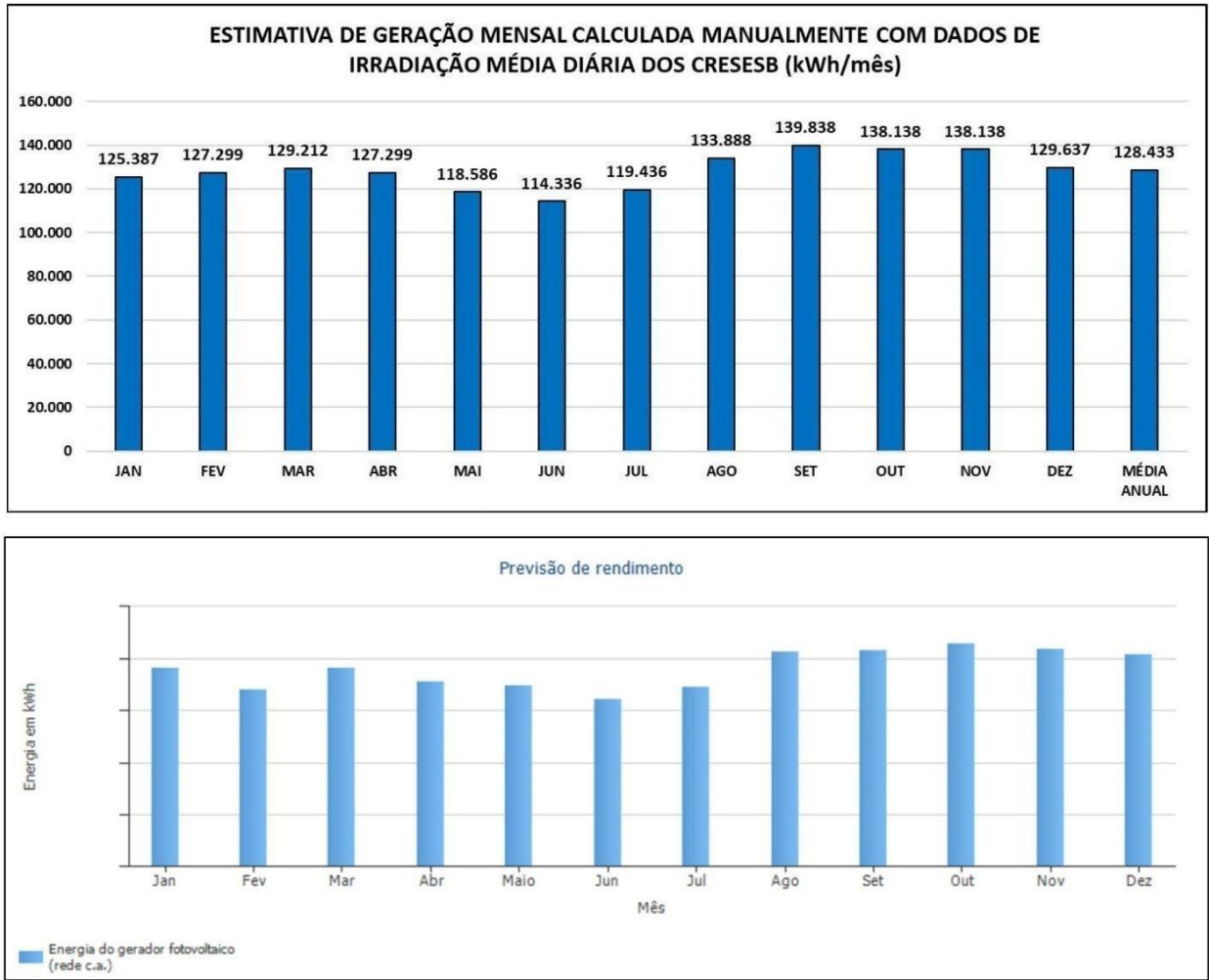


Fonte: O autor do trabalho, utilizando o software *PV*SOL Premium 2025 (R5)*, 2025.

Esses dados foram comparados com os valores calculados por método empírico, utilizando a base de dados solarimétrica do **CRESESB**, considerando uma irradiância média diária de **6,043 kWh/m²/dia**. A partir dessa base, foi estimada uma geração anual de **1.541.195 kWh/ano** e um fator solar de **145,0 kWh/kWp**.

A diferença percentual entre os dois métodos foi de apenas **0,95%** na geração anual estimada, **0,96%** no Fator Solar (FS) e **0,93%** na Irradiação média diária no plano inclinado, o que demonstra uma elevada coerência entre os dados simulados e os dados calculados manualmente, validando assim a consistência e a precisão técnica das ferramentas e metodologias adotadas. A Figura 77 e a Tabela 19 abaixo apresentam toda essa análise comparativa, de maneira quantitativa e visual.

Figura 77: Comparativo visual da estimativa de geração de energia: Método Empírico (CRESESB) x Simulação PV*SOL (Meteonorm).



Fonte: O autor do trabalho, utilizando dados do CRESESB e PV*SOL Premium 2025 (R5), 2025.

Tabela 20: Comparativo de indicadores: PV*SOL *versus* Método Empírico.

INDICADOR TÉCNICO	PV*SOL (BASE Meteonorm)	MÉTODO EMPÍRICO (BASE CRESESB)	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
Geração Anual Estimada (kWh/ano)	1.555.988,71	1.541.195,00	0,95%
Fator Solar (kWh/kWp)	146,41	145,00	0,96%
Performance Ratio (PR) (%)	80,00%	-	-
Irradiação Média Diária (kWh/m².dia)	6,100	6,043	0,93%
Potência Instalada do Sistema (kWp)	885,5	885,5	-

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

• **Viabilidade econômica**

A análise de viabilidade econômica da implantação da usina solar fotovoltaica no CFP, demonstrou resultados altamente favoráveis, tanto sob a ótica do retorno financeiro quanto da estabilidade e previsibilidade dos ganhos ao longo dos anos.

Utilizando as tarifas reais (Consumo e Compensação) praticadas pela ENERGISA-PB ao longo de 2024 e considerando o consumo médio mensal da unidade consumidora (agrupando os períodos de ponta e fora de ponta), a economia estimada no primeiro ano de operação do sistema foi de **R\$ 639.654,20**, representando **90,70%** de economia sobre o consumo de energia elétrica e **77,40%** de economia sobre o valor integral da fatura.

Para o cenário de análise de longo prazo (25 anos), projetando-se um reajuste médio anual da tarifa de energia de **7%** e considerando um investimento inicial de **R\$ 2.655.387,88**, o Gráfico 13 e a Tabela 21 abaixo apresentam toda essa análise comparativa, de maneira quantitativa e visual os seguintes indicadores foram obtidos:

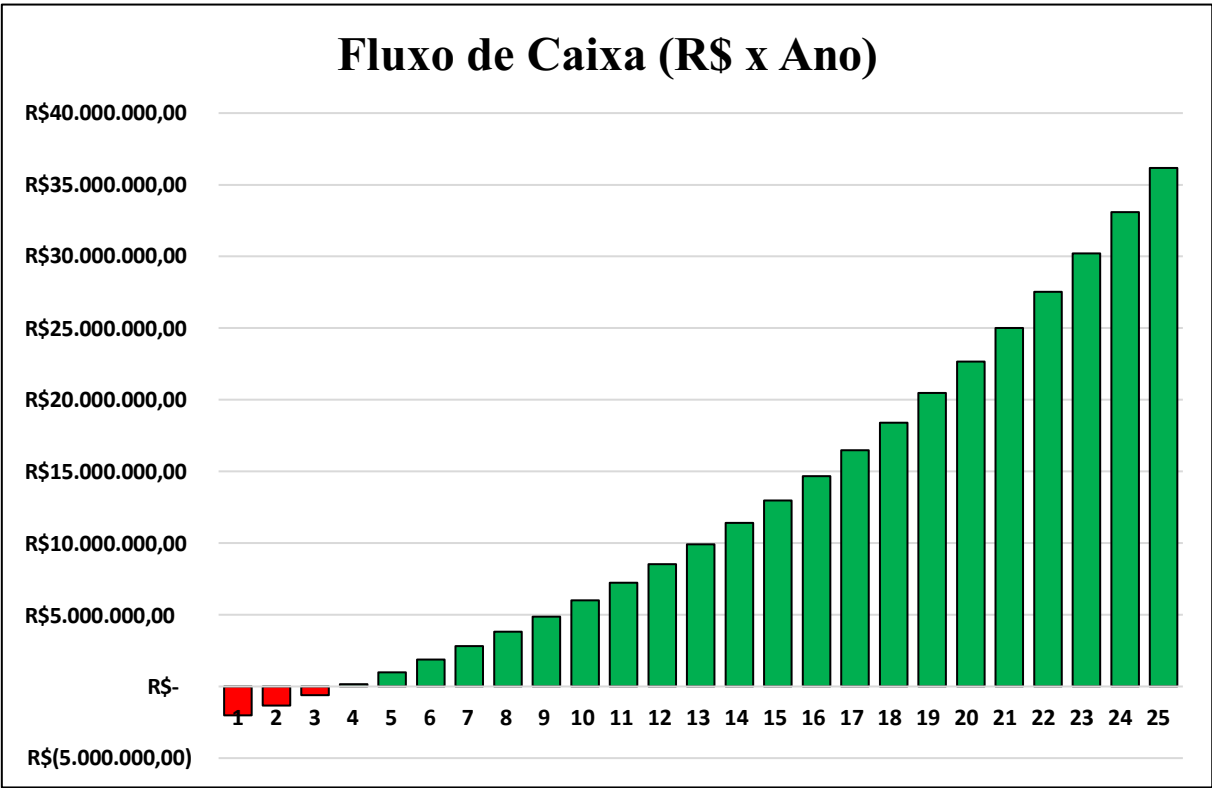
Tabela 21: Indicadores Financeiros Consolidados da Usina Fotovoltaica.

INDICADOR FINANCEIRO	RESULTADO OBTIDO	DESCRIÇÃO
Investimento Inicial Total	R\$ 2.655.387,88	Custo total previsto para implantação da usina solar
Economia Anual Estimada	R\$ 639.654,20	Economia sobre o consumo de energia no primeiro ano de operação

Payback (Tempo de Retorno)	4 anos	Tempo necessário para o retorno integral do valor investido
Economia Total Acumulada (25 anos)	R\$ 38.818.268,15	Valor estimado de economia gerada com a operação da usina ao longo do período
Retorno sobre o Investimento (ROI)	1.361,87%	Lucro obtido sobre o investimento inicial ao longo de 25 anos
Taxa Interna de Retorno (TIR)	30,22%	Rentabilidade percentual anual do projeto considerando o fluxo de caixa

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Gráfico 13: Fluxo de caixa ao longo dos 25 anos.



Fonte: O autor do trabalho, 2025.

A projeção da economia ao longo do período evidencia uma crescente redução dos custos com energia elétrica, tornando a planta um ativo financeiro sustentável, capaz de gerar retorno expressivo mesmo com custos reduzidos de manutenção e operação (estimados em R\$ 3.000,00/ano).

A escolha da Empresa 01, com sede em Sousa-PB, como fornecedora ideal para

implantação da usina, baseou-se em critérios técnicos e mercadológicos. Dentre os três fornecedores analisados, a mesma apresentou não apenas uma proposta comercial compatível com os requisitos do projeto, mas também diferenciais mostrados da Tabela 21 abaixo.

Tabela 22: Justificativas Técnicas e Comerciais para Escolha da Empresa Fornecedora.

CRITÉRIO AVALIADO	DESCRIÇÃO
Atuação Consolidada	Maior histórico de atuação no mercado estadual, demonstrando confiabilidade e experiência.
Suporte Técnico Regionalizado	Atendimento e assistência técnica local, garantindo agilidade na resolução de possíveis demandas.
Garantia Estendida no Serviço Prestado	Garantia de 6 anos nos serviços executados, superior às concorrentes (1 e 2 anos).
Qualidade dos Equipamentos	Utilização de equipamentos de marcas consolidadas, como WEG (painéis) e Huawei (inversores).

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

A análise integrada dos indicadores de retorno financeiro e da confiabilidade do fornecedor reforça a viabilidade do projeto e sua contribuição para a sustentabilidade econômica da instituição ao longo de décadas.

- **Impacto Ambiental**

A implantação da usina solar fotovoltaica no CFP representa não apenas um avanço técnico e econômico, mas também um marco significativo no compromisso ambiental da instituição. Por meio da substituição parcial da energia proveniente da rede elétrica convencional, alimentada em uma parcela por fontes fósseis e termelétricas em períodos de baixa hidraulicidade, é possível mensurar a contribuição direta da UFCG para a redução da emissão de gases de efeito estufa.

Com base nos dados fornecidos pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o fator médio de emissão de CO₂ do setor elétrico brasileiro foi de **0,0385 tCO₂/MWh** em 2023. Quando aplicamos esse fator sobre a energia estimada de geração anual da usina — **1.555.988 kWh/ano** ou **1.555,99 MWh/ano** — obteve-se uma redução direta estimada de **59,90**

toneladas de CO₂ por ano.

Além disso, é importante destacar que, apenas no ano de 2024, o consumo total de energia elétrica da UFCG resultou na emissão estimada de **45,50 toneladas de CO₂**, segundo a mesma metodologia. A implantação da usina solar permitiria, portanto, compensar e superar a pegada de carbono associada ao consumo da instituição. A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 23: Emissões Evitadas de CO₂ com a Usina Solar da UFCG.

INDICADOR AMBIENTAL	RESULTADO ESTIMADO	UNIDADE DE MEDIDA	DESCRIÇÃO
Emissão estimada sem usina (com base no consumo de 2024)	45,50	tCO ₂	Emissões de CO ₂ associadas ao consumo anual da UFCG no ano de 2024
Geração estimada da usina fotovoltaica	1.555.988	kWh/ano	Energia elétrica anual que será gerada pela planta solar da UFCG
Fator de emissão do setor elétrico brasileiro (MCTI/2023)	0,0385	tCO ₂ /MWh	Valor oficial utilizado para cálculo das emissões evitadas
Emissão evitada com a usina solar	59,90	tCO ₂	Redução estimada das emissões de CO ₂ com a geração solar anual

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Portanto, esses resultados dialogam diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Agenda 2030 da ONU, especialmente os ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), demonstrando o alinhamento institucional da UFCG com práticas de sustentabilidade ambiental e responsabilidade social.

- **Conectividade com a Metodologia**

A solidez dos resultados obtidos neste estudo está diretamente associada ao rigor metodológico adotado em cada uma das etapas desenvolvidas. Desde os levantamentos iniciais

até as análises finais, houve uma articulação contínua entre teoria, prática e simulações computacionais, assegurando consistência técnica e científica ao projeto.

A articulação entre as etapas metodológicas não apenas garantiu coerência aos resultados obtidos, como também demonstrou que o sucesso da implantação de um sistema fotovoltaico de grande porte depende diretamente da integração entre planejamento energético, ferramentas de modelagem tridimensional, simulações especializadas e análise financeira detalhada.

Ao respeitar essa sequência lógica e interdependente de procedimentos, o presente trabalho assegurou que cada decisão técnica estivesse fundamentada em dados empíricos, fortalecendo a confiabilidade dos resultados e aumentando a assertividade da proposta apresentada. A Tabela 23 compila a conectividade entre as etapas metodológicas adotadas no trabalho.

Tabela 24: Conectividade entre as Etapas Metodológicas e os Resultados Obtidos.

ETAPA METODOLÓGICA	DESCRIÇÃO	EVIDÊNCIA TÉCNICA / RESULTADO APRESENTADO
Mapeamento Energético Local	Avaliação dos índices de irradiação solar por meio do CRESESB e LABREN, para definição do potencial energético local.	Tabela Comparativa de Irradiação (CRESESB x LABREN)
Modelagem 3D via DroneDeploy	Criação de modelo tridimensional do campus com base em 698 imagens aéreas, essencial para análise de sombreamento e topografia.	Imagens da Modelagem 3D e Mapas de Elevação
Design da Usina via PV*SOL Premium 2025 (R5)	Importação do modelo 3D para o PV*SOL e simulação com dados do Meteonorm, otimizando layout e performance dos módulos.	Layout Final da Usina Simulado no PV*SOL

Dimensionamento e Equipamentos	Cálculo da potência ideal da usina, com definição da quantidade de módulos e inversores baseados nos dados reais da UFCG.	Tabela Técnica com Modelos de Painéis WEG e Inversores Huawei
Comparação com Métodos Empíricos	Validação da simulação (PV*SOL) com estimativas manuais baseadas no CRESESB, demonstrando coerência e precisão entre os métodos.	Gráfico Comparativo PV*SOL vs. CRESESB
Análise Financeira	Cálculo de indicadores como Payback, TIR e ROI, com projeção da economia acumulada ao longo de 25 anos.	Gráfico de Fluxo de Caixa e Tabela de Economia Acumulada
Impacto Ambiental	Quantificação da redução de emissões de CO ₂ após implantação da usina, vinculando o projeto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.	Tabela: Emissões Evitadas de CO ₂ (tCO ₂)

Fonte: O autor do trabalho, 2025.

Portando, diante das análises científicas, técnicas, financeiras e ambientais desenvolvidas ao longo deste trabalho, conclui-se que a proposta de implantação de uma usina solar fotovoltaica no CFP apresenta elevada viabilidade sob múltiplas perspectivas. A integração entre metodologias fundamentadas em dados reais e ferramentas de simulação de alta precisão garantiu a confiabilidade dos resultados. Além de proporcionar significativa economia para a instituição, o projeto representa um passo concreto rumo à sustentabilidade, alinhando-se aos compromissos ambientais da universidade. Os indicadores consolidados refletem não apenas a efetividade do projeto, mas também sua relevância estratégica para o futuro energético da UFCG.

8. CONCLUSÕES

Como visto, neste trabalho apresentamos uma análise profunda, detalhada e aplicada, acerca dos aspectos que envolver o cenário energético nacional e global, especialmente no que se refere a energia solar fotovoltaica. As etapas foram bem definidas metodologicamente, passando desde o embasamento físico dos fenômenos relacionados à energia solar até os cálculos técnicos e simulações computacionais, ao longo do mesmo buscou-se demonstrar com clareza como um projeto desse porte pode gerar impactos positivos em múltiplas esferas.

Ao longo do desenvolvimento, foi possível integrar a teoria à prática, a partir de conceitos fundamentais da Física para embasar tecnicamente cada etapa do projeto. Através da análise dos índices solares, do mapeamento geoespacial do campus, da modelagem 3D e das simulações realizadas no software PV*SOL, foram alcançados resultados que reforçam a coerência e a precisão do dimensionamento proposto.

Nesse sentido, podemos ver que a pergunta norteadora feita lá em nossa introdução, foi respondida ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, com todo o embasamento necessário que mesma necessitaria. A proposta implantação da matriz solar no campus do CFP se mostrou por meio de comprovações apresentadas como uma alternativa viável e altamente promissora para transformar a matriz energética institucional, promovendo ganhos ambientais concretos, como a redução de mais de 59 toneladas de CO₂ anualmente; ganhos econômicos relevantes, com economia anual superior a R\$ 639 mil e um payback inferior a 5 (cinco) anos; e ganhos sustentáveis, alinhados aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e à responsabilidade socioambiental que deve orientar as instituições públicas no Brasil.

Além disso, este trabalho contribui para o debate acadêmico e para futuras propostas de eficiência energética, servindo como referência para outros campi e instituições. Ao demonstrar que é possível unir conhecimento científico, planejamento técnico e viabilidade econômica em um único projeto, este estudo reforça o papel da universidade como agente transformador do território em que está inserida, especialmente no contexto regional do Sertão Paraibano.

Por fim, fico com o sentimento que conduzi o trabalho com responsabilidade, dedicação e propósito. Estou satisfeito com os resultados alcançados e espero ter cumprido com as expectativas acadêmicas e pessoais propostas desde o início, contribuindo de forma efetiva para a construção de um futuro mais sustentável e energeticamente consciente.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, Agência Nacional de energia Elétrica. **Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída**. ANEEL, Brasil, junho 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br>>. Acesso em 14 de abril de 2025.

ARTAXO, P. **Mudanças climáticas e suas consequências para o Brasil**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 34, n. 99, p. 25-44, 2020.

ASSAD, L.. **Matriz energética diversificada é opção mais segura para o país**. Ciência e Cultura, v. 63, n. 2, p. 6-8, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039: Instalações elétricas em média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=90>>. Acesso em: 28 fev 2025.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. **Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil**. Interciencia, v. 43, n. 10, p. 680- 688, 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **SIRENE - Sistema de Registro Nacional de Emissões**. Brasília: MCTI, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-de-gee-por-setor-1>>. Acesso em: 19 abr. 2025.

BUCKERIDGE, M. S. **O efeito estufa e a biodiversidade**. 2006. Disponível em: <<http://felix.ib.usp.br/pessoal/marcos/minhawe5/schedule.htm>>. Acesso em 12 de abril de 2025.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE – C3S. ERA5. **Global Climate Highlights 2023. ECMWF, 2024**. Disponível em: <<https://climate.copernicus.eu/2023-was-hottest-year-record>>. Acesso em 01 de abril de 2025.

CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Energia Solar Fotovoltaica**. Brasil: CRESESB, jun. 2008. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CREUTZIG, F. et al. **The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change**. Nature Energy, v. 2, 2017.

JUNIOR, J. C. **Projeto de um sistema fotovoltaico para energização de um equipamento de pesca com eletricidade**. 2008. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<https://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001166.pdf>> Acesso em: mar. 2025.

DAMASIO, F.; STEFFANI, M. H. **Ensinando Física com consciência ecológica e com materiais descartáveis**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 593-597, 2007.

DOBSON, G. M. B. **Origin and Distribution of the Polyatomic Molecules in the Atmosphere**. Proceedings of the Royal Society A, v. 236, p. 187–193, 1957.

DUARTE, D. H. S.; LAMBERTS, R. **Avaliação do Potencial de Energia Solar: Teoria e Prática**. Dissertação de mestrado. 157f. Florianópolis: EdUFSC, 2016.

DUARTE, H. F.; PEREIRA, E. B. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/atlas>>. Acesso em 18 de abril de 2025.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: Wiley, 1980.

DUPONT, F. H.; GRASSI, F.; ROMITTI, L. **Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável**. Renewable Energies: seeking for a sustainable energy matrix. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 1, p. 70-81, 2015.

ENERGISA. **Norma de Distribuição Unificada 002: Fornecimento de energia elétrica em tensão primária**. Revisão energisa. Junho/2019, ENERGISA/GTD-NRM/Nº028/2019. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/normas-tecnicas>>. Acesso em 16 de abril de 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em 28 de abril de 2025.

EQUIPE GISTEMP. **Análise de temperatura de superfície GISS (GISTEMP), versão 4**. Nova York: Instituto Goddard de Estudos Espaciais da NASA, 2025. Disponível em: <<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>>. Acesso em: 4 abr. 2025.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J. D. **Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO interaction**. Nature, London, v. 315, n. 6016, p. 207-210, 1985.

FERREIRA, F. F.; SILVA, R. R.; LIMA, J. A. **Impactos Econômicos e Ambientais da Energia Solar Fotovoltaica em Instituições de Ensino Superior**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 7, n. 3, p. 45-62, 2018.

FLEMING, J. **Historical Perspectives on Climate Change**. New York: Oxford University Press, 1998.

GARCEZ, C. G. **Distributed electricity generation in Brazil: An analysis of policy context, design and impact**. Utilities Policy, v. 49, p. 104-115, 2017.

GEODESIGN INTERNACIONAL. **Recurso Solar**. 2017. Disponível em: <<https://recursosolar.geodesign.com.br/energiasolar.html>>. Acesso em 10 de abril de 2025.

GIAMPIETRO, M. et al. **The biofuel delusion: The fallacy of large scale agro-biofuels production**. Routledge, 2009.

GOLDEMBERG, J. **Energia: o desafio do século XXI**. São Paulo: Companhia das Letras, 2009.

GOLDEMBERG, J. **Energia: o dilema do Brasil**. São Paulo: Companhia das Letras, 2006.

GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J. R. **Política energética no Brasil**. Estudos avançados, v. 19, p. 215-228, 2005.

GOLDEMBERG, J. **A energia no Brasil: subsídios para uma política energética sustentável**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

GONÇALVES, L. S. et al. **Fundamentos e aplicações da energia solar fotovoltaica**. Caderno de Engenharia e Ambiente, v. 10, n. 2, p. 45-56, 2015.

GREEN, M. A. **Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1982.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2017.

IPCC. **Alterações Climáticas 2014 Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade**. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wg2_spmport-1.pdf. Acesso em 04 de abril de 2025.

JACCARD, M. **Sustainable fossil fuels- the unusual suspect in the quest for clean and enduring energy**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

KASENBURG, N.; WERNER, M.; CLAUSEN, J. **Solar Radiation Forecasting Using Numerical Weather Prediction and Satellite Data**. Renewable Energy, v. 86, p. 1372–1383, 2016.

KREITH, F.; KREIDER, J. F. **Principles of Solar Engineering**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1978.

LE TREUT, H. et al. **Mudanças climáticas e seus impactos: avaliação científica**. In: PAECH, D. et al. (Org.). **Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)**. 4. ed. Genebra: IPCC, 2007.

LENSSEN, N. G. A.; SCHMIDT, M.; HENDRICKSON, P.; JACOBS, M.; MENNE, M.; RUEDY, R. **Um conjunto de incerteza observacional GISTEMPv4**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 129, n. 17, p. e2023JD040179, 2024. DOI: 0.1029/2023JD040179. Acesso em: 4 abr. 2025.

LIMA, G. G. **A questão ambiental e os desafios da sustentabilidade socioambiental**. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA, v. 4, n. 1, p. 47-58.

LOPES, T. R.; SANTOS, A. G. **Avaliação Técnica para Projetos Fotovoltaicos em Instituições Públicas**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 10, n. 3, p. 45-59, 2021

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

MILLER, G. T. **Ciência ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2008

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE–Empresa et al. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, p. 1970-2010, 2007.

MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S. **Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone**. *Nature*, v. 249, p. 810–812, 1974.

MORAIS, L. C. D. **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras**. 2015. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017. (Estudo técnico). Disponível em: http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/32259/energia_solar_limp.pdf. Acesso em: 11 abr. 2025.

NASA. **Earth features: Bhartia Q&A**. 2012. Disponível em: <https://www.nasa.gov/topics/earth/features/bhartia-qa.html>. Acesso em: 16 abr. 2025.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 21f. Monografia (Pós-Graduação em Fontes Alternativas de Energia) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004. Disponível em: https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf. Acesso em 11 de abril de 2022.

NDC. **Contribuição do Brasil às Nações Unidas - Contribuição nacionalmente determinada (iNDC) para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: MMA, 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRASIL_iNDC_portugues.pdf. Acesso em março de 2025.

OLIVEIRA, T. R.; **Geração De Energia X Impacto Ambiental**. Trabalho de conclusão de curso ao Curso de Engenharia Elétrica da UEMG. 111f. 2011. Disponível em: http://www.waltenomartins.com.br/tcc_2011_Thalles.pdf. Acesso em março de 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil). **Dados de Geração do SIN**. Rio de Janeiro: ONS, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br>. Acesso em: 19 abr. 2025.

PBMC. **Sumário executivo: impactos, vulnerabilidades e adaptação. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: PBMC, 2013. 28 p. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4307/1/2013_sumario_executivo_impactos_vulnerabilidades_e_adaptacao.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.

PEREZ, R. et al. **A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation**. *Solar Energy*, v. 73, n. 5, p. 307-317, 2002.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 2002. 568 p. ISBN 978-85-213-0004-5.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Avaliação científica do esgotamento da camada de ozônio: 2018**. Nairobi: PNUMA, 2018. Disponível em: <<https://ozone.unep.org/node/3597>>. Acesso em: 27 abr. 2025.

RIBEIRO, S. F.; LIMA, D. C. **Planejamento energético e sustentabilidade: um estudo em universidades públicas brasileiras**. *Revista de Planejamento e Políticas Públicas*, v. 40, p. 101-118, 2018.

RODRIGUES, M. A. **Um experimento de baixo custo para medir a temperatura e a potência do Sol e refletir sobre o efeito estufa**. Teresina (não publicado), 2014

ROGNER, H.-H.; AGUILERA, R. F.; ARCHER, C.; BERTANI, R.; BHATTACHARYA, S. C.; DUSSEAU, M. B.; GAGNON, L.; HABERL, H.; HOOGWIK, M.; JOHNSON, A.; ROGNER, M. L.; WAGNER, H.; YAKUSHEV, V. Energy resources and potentials. In: JOHANSSON, T. B.; PATWARDHAN, A.; NAKICENOVIC, N.; GOLDEMBERG, J. (ed.). **Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future**. Cambridge: Cambridge University Press; Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2012. p. 423–512.

Disponível em: <<https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/10061/>>. Acesso em: 27 abr. 2025

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004. 114 p. ISBN 978-85-87583-04-8. Disponível em: <<https://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2025.

RÜTHER, R. **Energia fotovoltaica: fundamentos, tecnologias e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2017. 272 p. ISBN 978-85-7975-232-0.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Editora Garamond, 2000.

SETZER, A. W.; ARTAXO, P. **As mudanças climáticas globais e o Brasil**. In: GOLDENBERG, M. (Org.) **Mudanças climáticas: passado, presente e futuro**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 103-124.

SOLOMON, S. **Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history**. *Reviews of Geophysics*, v. 37, n. 3, p. 275–316, 1999.

SOUZA, M. **Transição Energética e Sustentabilidade: uma análise crítica da matriz elétrica mundial**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 2, p. 45-62, 2020.

TEIXEIRA, R. L. P.; PESSOA, Z. S. **Interfaces entre adaptação climática e energias renováveis: notas para um debate teórico-analítico**. *Revista gestão e Sustentabilidade Ambiental*. Natal, v. 11, n. 3, p. 144-156, jul. 2022. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/10798/11918>. Acesso em fevereiro de 2025.

TOLMASQUIM, M. T. **Geração de energia elétrica: planejamento, dimensionamento e operação dos sistemas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2016. 296 p. ISBN 978-85-61940-26-3.

TOLMASQUIM, M. T. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil**. *Estudos avançados*, v. 26, p. 247-260, 2012.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil: subsídios para formulação de políticas públicas**. EPE. Rio de Janeiro. 2016.

VIEIRA, K. R. C. F. & BAZZO, W. A. **Discussões acerca do aquecimento global: uma proposta CTS para abordar esse tema controverso em sala de aula**. Ciência & Ensino, 2007.

WORLD BANK GROUP. **Global Solar Atlas: Solar resource data and tools**. Washington, D.C.: World Bank; ESMAP, 2020. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info>>. Acesso em: 19 abr. 2025.

YERGIN, D. **O prêmio: a épica busca por petróleo, dinheiro e poder**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2008. 928 p. ISBN 978-85-98038-04-4.

10. ANEXOS

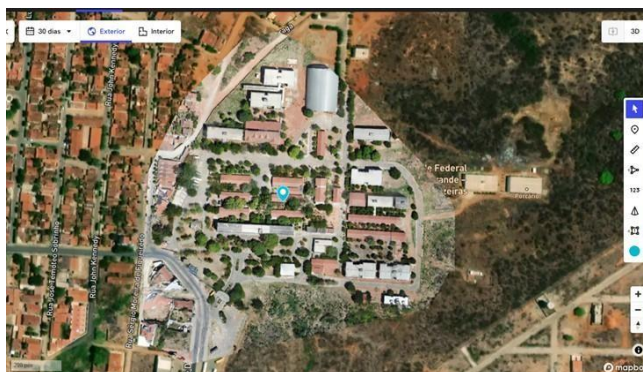
10.1 Relatório Completo de simulações no PV*SOL

Nome do projeto: UFCG - Campus
Cajazeiras

19/03/2025

Seu sistema fotovoltaico

Endereço da instalação



Vista geral do projeto



Figura: Imagem panorâmica, Modelagem 3D

Sistema fotovoltaico

3D, Sistema fv conectado à rede

Dados climáticos	Cajazeiras- pb, BRA (1996 - 2015)
Fonte dos valores	Meteonorm 8.1(i)
Potência do gerador fotovoltaico	885,5 kWp
Area do gerador fotovoltaico	4.159,05 m ²
Quantidade de módulos	1.610
Quantidade de inversores	6

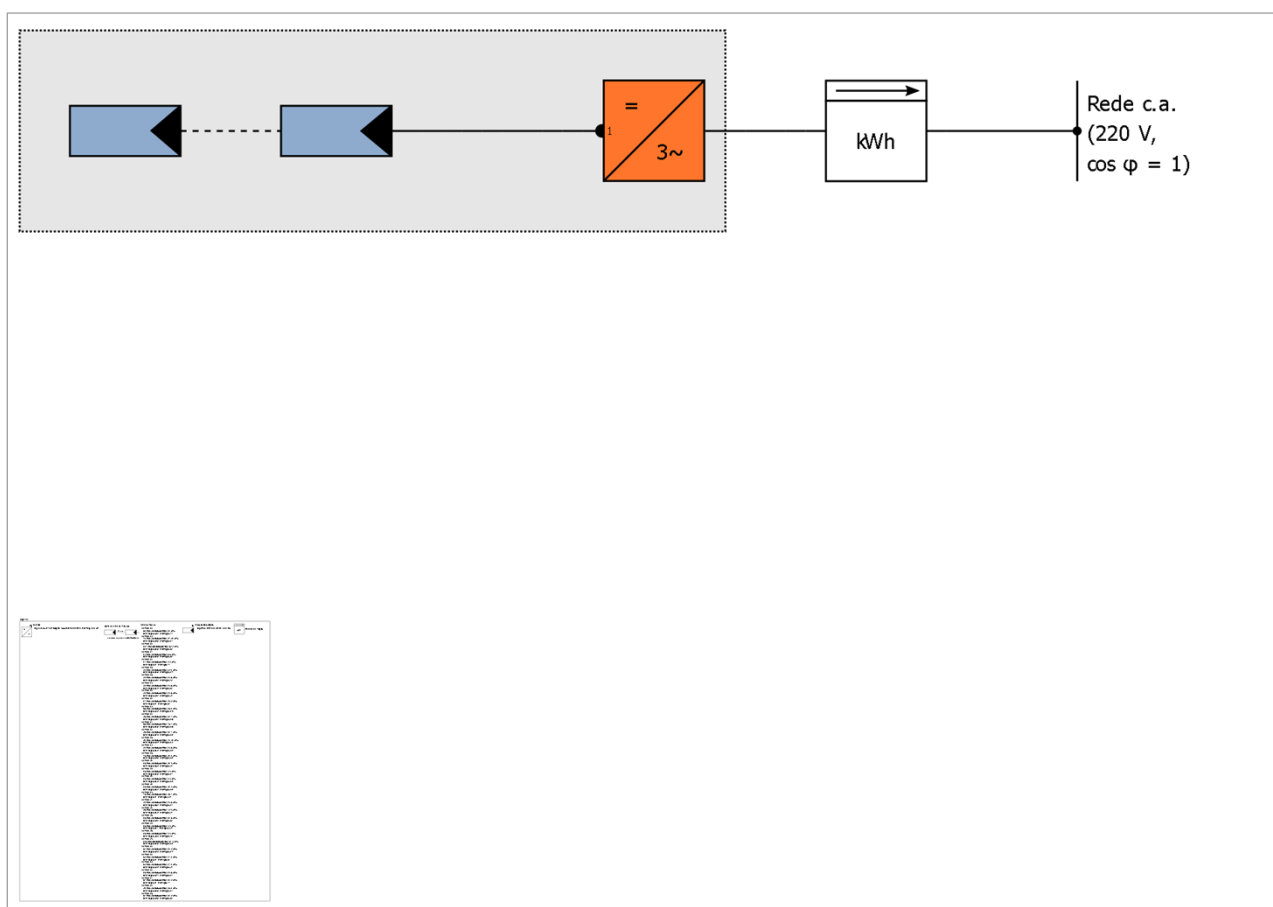


Figura: Esquema elétrico

Previsão de rendimento

Previsão de rendimento

Potência do gerador fotovoltaico	885,50 kWp
Rendimento anual específico	1.757,03 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	80,00 %
Diminuição do rendimento por sombreamento	0,6 %
Injeção na rede	1.555.988 kWh/Ano
Injeção na rede no primeiro ano (incl. degradação do módulo)	1.555.988 kWh/Ano
Consumo em espera (Inversor)	161 kWh/Ano

Balanco / Conceito de injeção

Injeção total

Os resultados foram determinados com base em um modelo de cálculo matemático da Valentin Software GmbH (algoritmos PV*SQL). Os rendimentos efetivos do sistema de energia solar podem variar em função de oscilações meteorológicas, da eficiência dos módulos e dos inversores, e outros fatores.

Configuração do sistema

Vista geral

Dados do sistema

Tipo de sistema	3D, Sistema fv conectado à rede
-----------------	---------------------------------

Dados climáticos

Localização	Cajazeiras- pb, BRA (1996 - 2015)
Fonte dos valores	Meteonorm 8.1(i)
Resolução dos dados	1 min
Modelos de simulação utilizados:	
- Irradiação difusa no plano horizontal	Hofmann
- Irradiação sobre o plano inclinada	Hay & Davies

Áreas do módulo

1. Área do módulo - 01-Área 01

Gerador fotovoltaico, 1. Área do módulo - 01-Área 01

Nome	01-Área 01
Módulos fotovoltaicos	60 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	4 °
Orientação	Sul 170 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	155,0 m ²



Figura: 1. Área do módulo - 01-Área 01

2. Área do módulo - 01-Área 02

Gerador fotovoltaico, 2. Área do módulo - 01-Área 02

Nome	01-Área 02
Módulos fotovoltaicos	45 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	5 °
Orientação	Sul 176 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	116,2 m ²



Figura: 2. Área do módulo - 01-Área 02

3. Área do módulo - 01-Área 03

Gerador fotovoltaico, 3. Área do módulo - 01-Área 03

Nome	01-Área 03
Módulos fotovoltaicos	114 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	6 °
Orientação	Norte 358 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	294,5 m ²



Figura: 3. Área do módulo - 01-Área 03

4. Área do módulo - 01-Área 04

Gerador fotovoltaico, 4. Área do módulo - 01-Área 04

Nome	01-Área 04
Módulos fotovoltaicos	12 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	8 °
Orientação	Norte 358 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	31,0 m ²



Figura: 4. Área do módulo - 01-Área 04

5. Área do módulo - 01-Área 05

Gerador fotovoltaico, 5. Área do módulo - 01-Área 05

Nome	01-Área 05
Módulos fotovoltaicos	14 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	4 °
Orientação	Norte 3 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	36,2 m ²

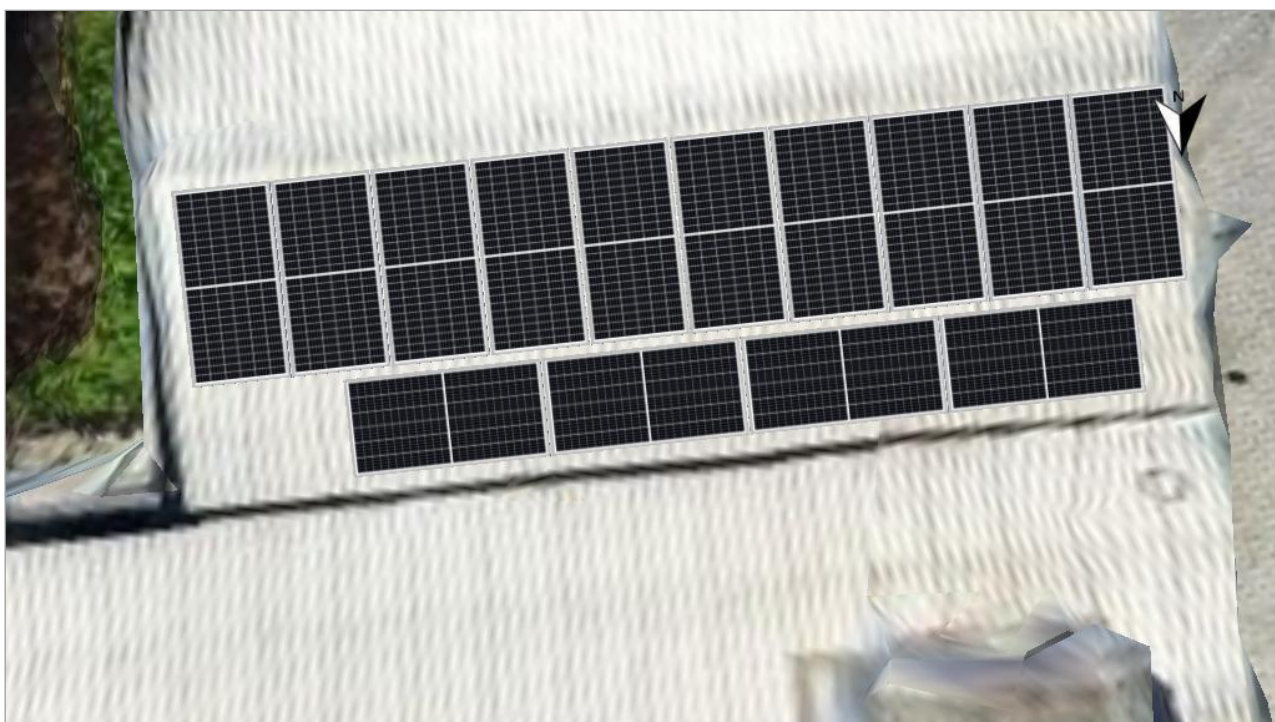


Figura: 5. Área do módulo - 01-Área 05

6. Área do módulo - 01-Área 06

Gerador fotovoltaico, 6. Área do módulo - 01-Área 06

Nome	01-Área 06
Módulos fotovoltaicos	22 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	14 °
Orientação	Norte 358 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	56,8 m ²



Figura: 6. Área do módulo - 01-Área 06

7. Área do módulo - 01-Área 08

Gerador fotovoltaico, 7. Área do módulo - 01-Área 08

Nome	01-Área 08
Módulos fotovoltaicos	72 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	9 °
Orientação	Sul 175 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	186,0 m ²



Figura: 7. Área do módulo - 01-Área 08

8. Área do módulo - 01-Área 09

Gerador fotovoltaico, 8. Área do módulo - 01-Área 09

Nome	01-Área 09
Módulos fotovoltaicos	72 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	8 °
Orientação	Norte 357 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	186,0 m ²



Figura: 8. Área do módulo - 01-Área 09

9. Área do módulo - 01-Área 10

Gerador fotovoltaico, 9. Área do módulo - 01-Área 10

Nome	01-Área 10
Módulos fotovoltaicos	72 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	7 °
Orientação	Sul 173 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	186,0 m ²



Figura: 9. Área do módulo - 01-Área 10

10. Área do módulo - 01-Área 11

Gerador fotovoltaico, 10. Área do módulo - 01-Área 11

Nome	01-Área 11
Módulos fotovoltaicos	54 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	6 °
Orientação	Norte 0 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	139,5 m ²



Figura: 10. Área do módulo - 01-Área 11

11. Área do módulo - 01-Área 12

Gerador fotovoltaico, 11. Área do módulo - 01-Área 12

Nome	01-Área 12
Módulos fotovoltaicos	66 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	19 °
Orientação	Sul 177 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	170,5 m ²



Figura: 11. Área do módulo - 01-Área 12

12. Área do módulo - 01-Área 13

Gerador fotovoltaico, 12. Área do módulo - 01-Área 13

Nome	01-Área 13
Módulos fotovoltaicos	28 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	16 °
Orientação	Sul 175 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	72,3 m ²



Figura: 12. Área do módulo - 01-Área 13

13. Área do módulo - 01-Área 14

Gerador fotovoltaico, 13. Área do módulo - 01-Área 14

Nome	01-Área 14
Módulos fotovoltaicos	88 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	16 °
Orientação	Norte 356 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	227,3 m ²



Figura: 13. Área do módulo - 01-Área 14

14. Área do módulo - 01-Área 15

Gerador fotovoltaico, 14. Área do módulo - 01-Área 15

Nome	01-Área 15
Módulos fotovoltaicos	28 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	15 °
Orientação	Norte 359 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	72,3 m ²

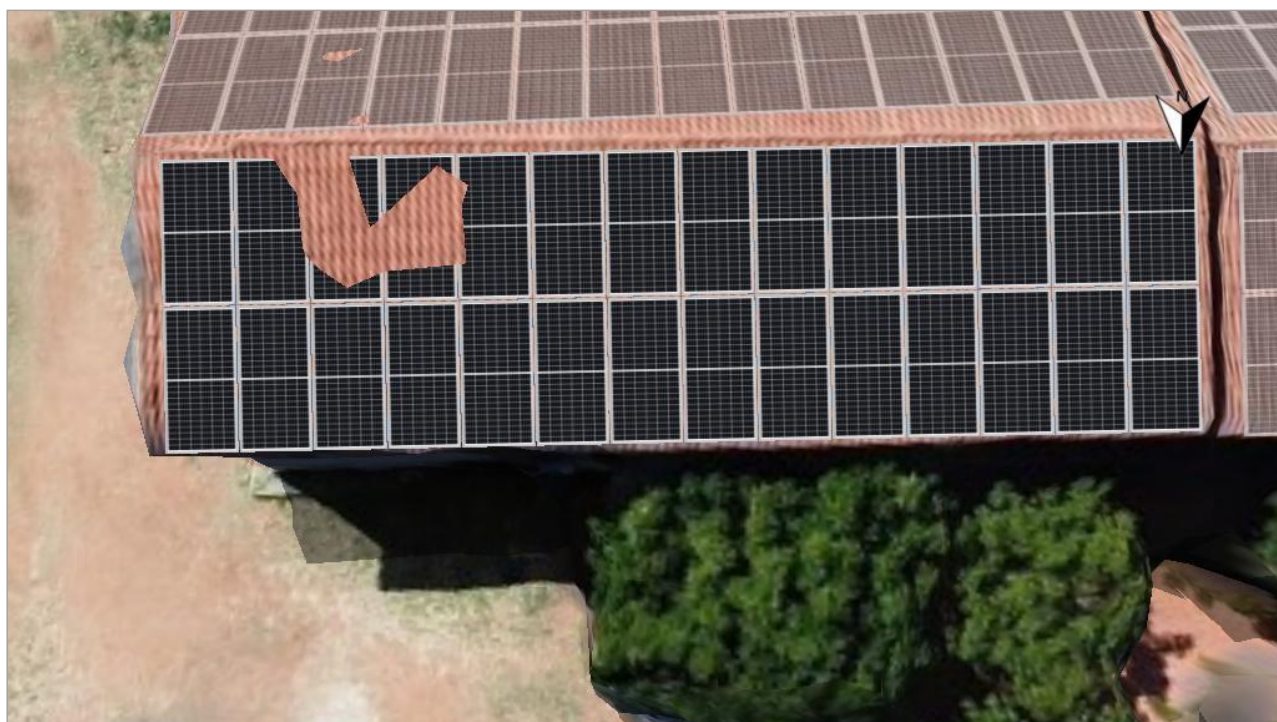


Figura: 14. Área do módulo - 01-Área 15

15. Área do módulo - 01-Área 16

Gerador fotovoltaico, 15. Área do módulo - 01-Área 16

Nome	01-Área 16
Módulos fotovoltaicos	75 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	12 °
Orientação	Sul 177 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	193,7 m ²



Figura: 15. Área do módulo - 01-Área 16

16. Área do módulo - 01-Área 17

Gerador fotovoltaico, 16. Área do módulo - 01-Área 17

Nome	01-Área 17
Módulos fotovoltaicos	72 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	11 °
Orientação	Norte 357 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	186,0 m ²



Figura: 16. Área do módulo - 01-Área 17

17. Área do módulo - 01-Área 18

Gerador fotovoltaico, 17. Área do módulo - 01-Área 18

Nome	01-Área 18
Módulos fotovoltaicos	46 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	10 °
Orientação	Sul 178 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	118,8 m ²



Figura: 17. Área do módulo - 01-Área 18

18. Área do módulo - 01-Área 21

Gerador fotovoltaico, 18. Área do módulo - 01-Área 21

Nome	01-Área 21
Módulos fotovoltaicos	38 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	7 °
Orientação	Sul 182 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	98,2 m ²



Figura: 18. Área do módulo - 01-Área 21

19. Área do módulo - 01-Área 22

Gerador fotovoltaico, 19. Área do módulo - 01-Área 22

Nome	01-Área 22
Módulos fotovoltaicos	18 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	3 °
Orientação	Sul 158 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	46,5 m ²



Figura: 19. Área do módulo - 01-Área 22

20. Área do módulo - 01-Área 23

Gerador fotovoltaico, 20. Área do módulo - 01-Área 23

Nome	01-Área 23
Módulos fotovoltaicos	18 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	11 °
Orientação	Norte 357 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	46,5 m ²

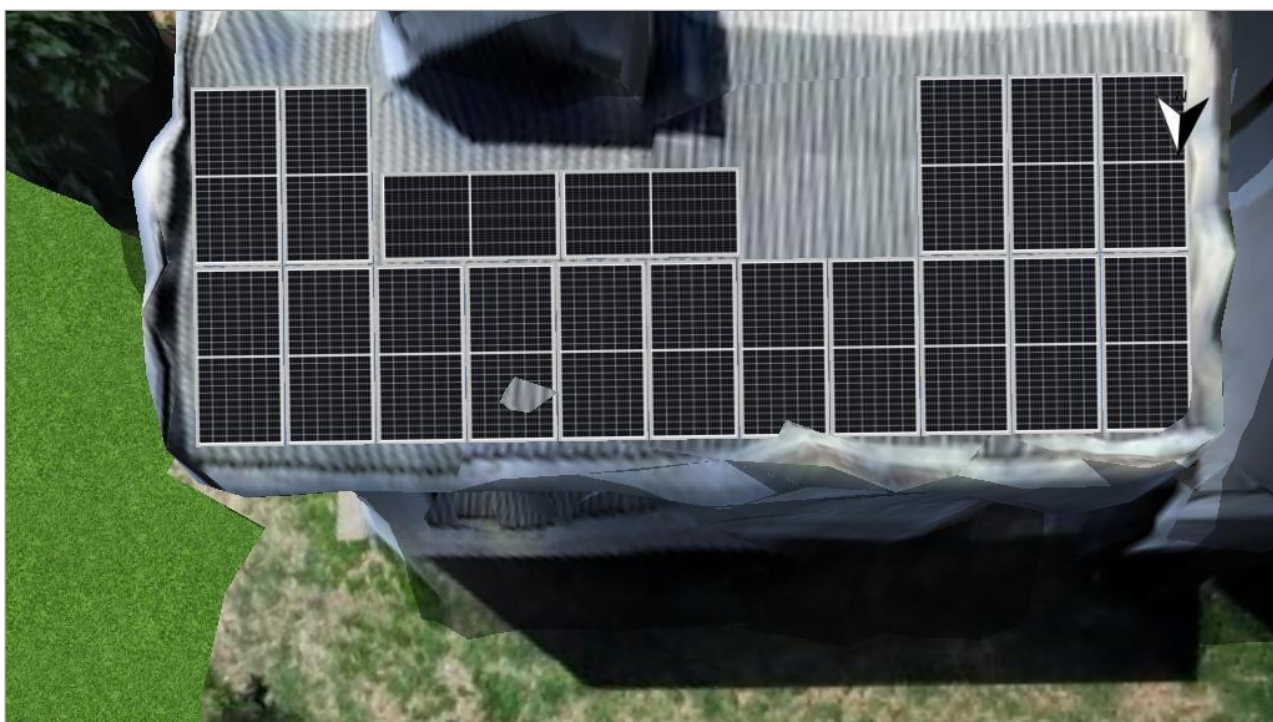


Figura: 20. Área do módulo - 01-Área 23

21. Área do módulo - 01-Área 20

Gerador fotovoltaico, 21. Área do módulo - 01-Área 20

Nome	01-Área 20
Módulos fotovoltaicos	38 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	10 °
Orientação	Norte 355 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	98,2 m ²



Figura: 21. Área do módulo - 01-Área 20

22. Área do módulo - 01-Área 19

Gerador fotovoltaico, 22. Área do módulo - 01-Área 19

Nome	01-Área 19
Módulos fotovoltaicos	48 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	12 °
Orientação	Norte 0 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	124,0 m ²



Figura: 22. Área do módulo - 01-Área 19

23. Área do módulo - 01-Área 24

Gerador fotovoltaico, 23. Área do módulo - 01-Área 24

Nome	01-Área 24
Módulos fotovoltaicos	72 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	5 °
Orientação	Sul 183 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	186,0 m ²



Figura: 23. Área do módulo - 01-Área 24

24. Área do módulo - 01-Área 25

Gerador fotovoltaico, 24. Área do módulo - 01-Área 25

Nome	01-Área 25
Módulos fotovoltaicos	78 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	7 °
Orientação	Norte 357 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	201,5 m ²



Figura: 24. Área do módulo - 01-Área 25

25. Área do módulo - 01-Área 26

Gerador fotovoltaico, 25. Área do módulo - 01-Área 26

Nome	01-Área 26
Módulos fotovoltaicos	56 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	6 °
Orientação	Sul 175 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	144,7 m ²



Figura: 25. Área do módulo - 01-Área 26

26. Área do módulo - 01-Área 27

Gerador fotovoltaico, 26. Área do módulo - 01-Área 27

Nome	01-Área 27
Módulos fotovoltaicos	18 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	12 °
Orientação	Leste 83 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	46,5 m ²



Figura: 26. Área do módulo - 01-Área 27

27. Área do módulo - 01-Área 28

Gerador fotovoltaico, 27. Área do módulo - 01-Área 28

Nome	01-Área 28
Módulos fotovoltaicos	18 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	9 °
Orientação	Oeste 269 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	46,5 m ²



Figura: 27. Área do módulo - 01-Área 28

28. Área do módulo - 01-Área 29

Gerador fotovoltaico, 28. Área do módulo - 01-Área 29

Nome	01-Área 29
Módulos fotovoltaicos	118 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	13 °
Orientação	Norte 356 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	304,8 m ²



Figura: 28. Área do módulo - 01-Área 29

29. Área do módulo - 01-Área 30

Gerador fotovoltaico, 29. Área do módulo - 01-Área 30

Nome	01-Área 30
Módulos fotovoltaicos	64 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	14 °
Orientação	Sul 179 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	165,3 m ²



Figura: 29. Área do módulo - 01-Área 30

30. Área do módulo - 01-Área 31

Gerador fotovoltaico, 30. Área do módulo - 01-Área 31

Nome	01-Área 31
Módulos fotovoltaicos	62 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	6 °
Orientação	Norte 1 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	160,2 m ²



Figura: 30. Área do módulo - 01-Área 31

31. Área do módulo - 01-Área 32

Gerador fotovoltaico, 31. Área do módulo - 01-Área 32

Nome	01-Área 32
Módulos fotovoltaicos	62 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	7 °
Orientação	Sul 172 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	160,2 m ²



Figura: 31. Área do módulo - 01-Área 32

32. Área do módulo - 01-Área 33

Gerador fotovoltaico, 32. Área do módulo - 01-Área 33

Nome	01-Área 33
Módulos fotovoltaicos	36 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	3 °
Orientação	Sul 174 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	93,0 m ²

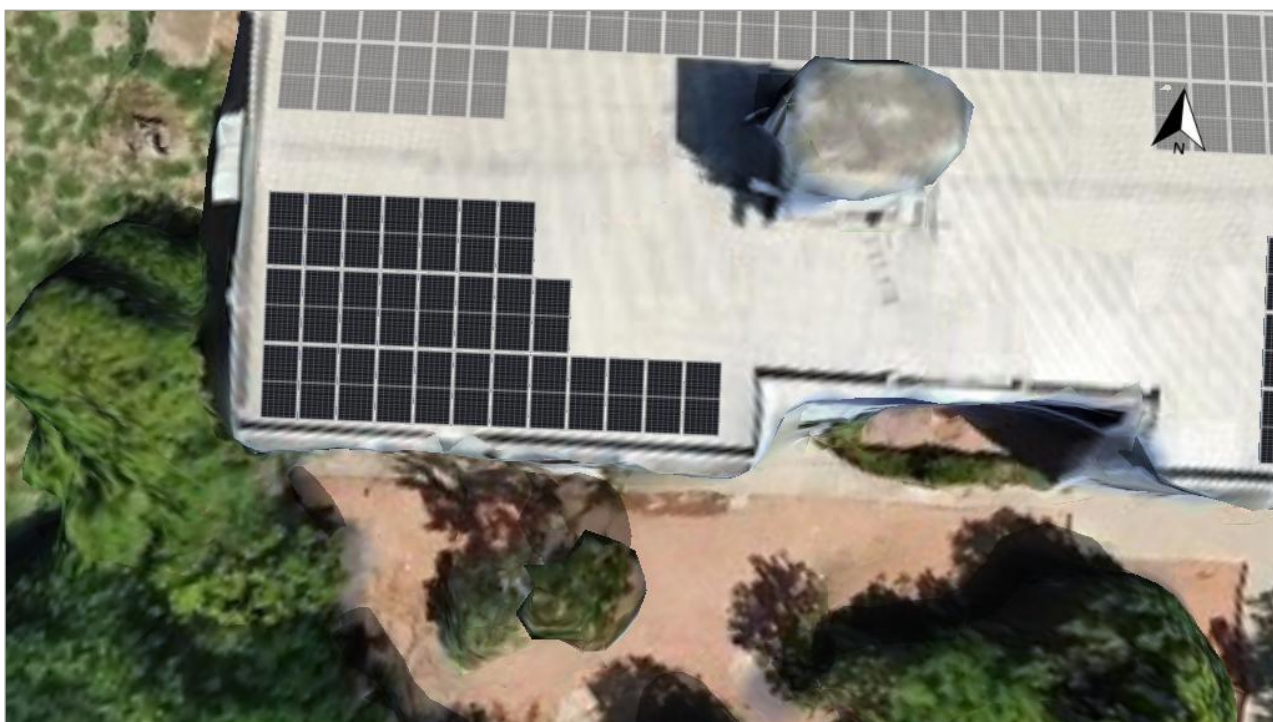


Figura: 32. Área do módulo - 01-Área 33

33. Área do módulo - 01-Área 34

Gerador fotovoltaico, 33. Área do módulo - 01-Área 34

Nome	01-Área 34
Módulos fotovoltaicos	64 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	4 °
Orientação	Norte 5 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	165,3 m ²



Figura: 33. Área do módulo - 01-Área 34

34. Área do módulo - 01-Área 35

Gerador fotovoltaico, 34. Área do módulo - 01-Área 35

Nome	01-Área 35
Módulos fotovoltaicos	70 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	5 °
Orientação	Norte 358 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	180,8 m ²



Figura: 34. Área do módulo - 01-Área 35

35. Área do módulo - 01-Área 36

Gerador fotovoltaico, 35. Área do módulo - 01-Área 36

Nome	01-Área 36
Módulos fotovoltaicos	64 x WPV 550 HMM3 (v2)
Fabricante	WEG
Inclinação	8 °
Orientação	Sul 178 °
Situação de montagem	Paralelo ao telhado - boa ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	165,3 m ²



Figura: 35. Área do módulo - 01-Área 36

Linha do horizonte, Modelagem 3D

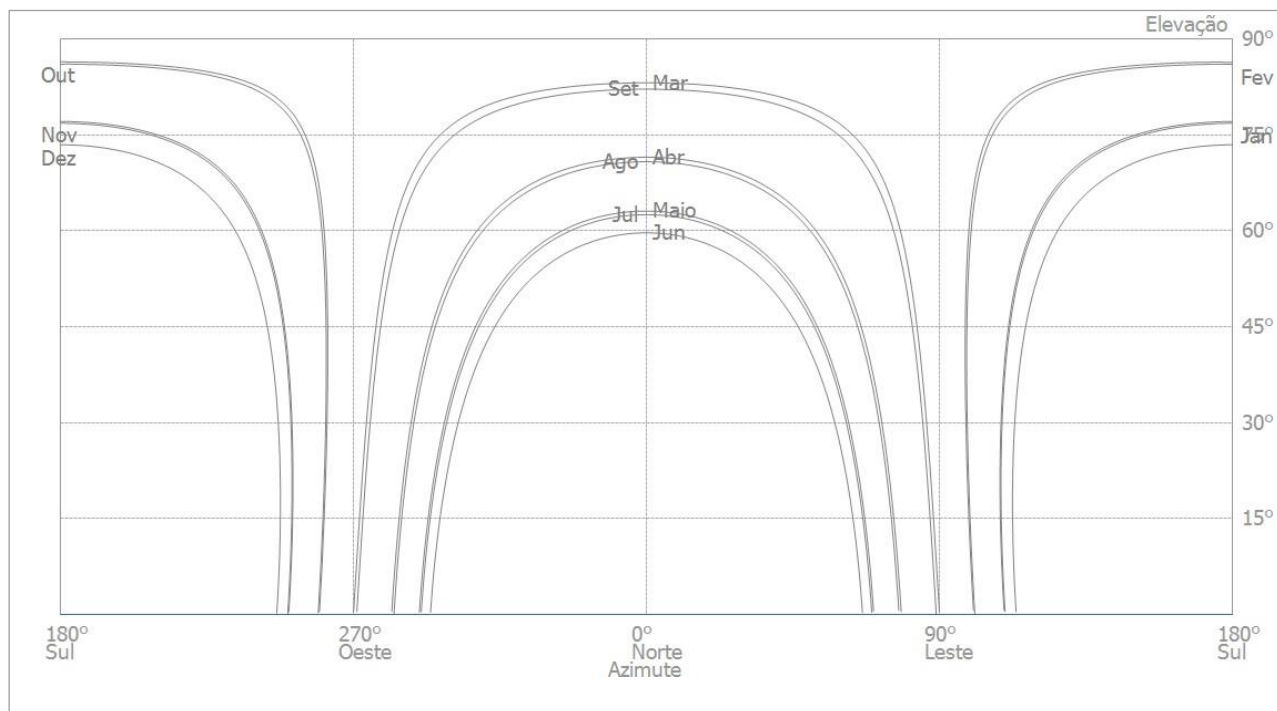


Figura: Horizonte (Modelagem 3D)

Diagrama, planta e lista de peças

Diagrama do circuito

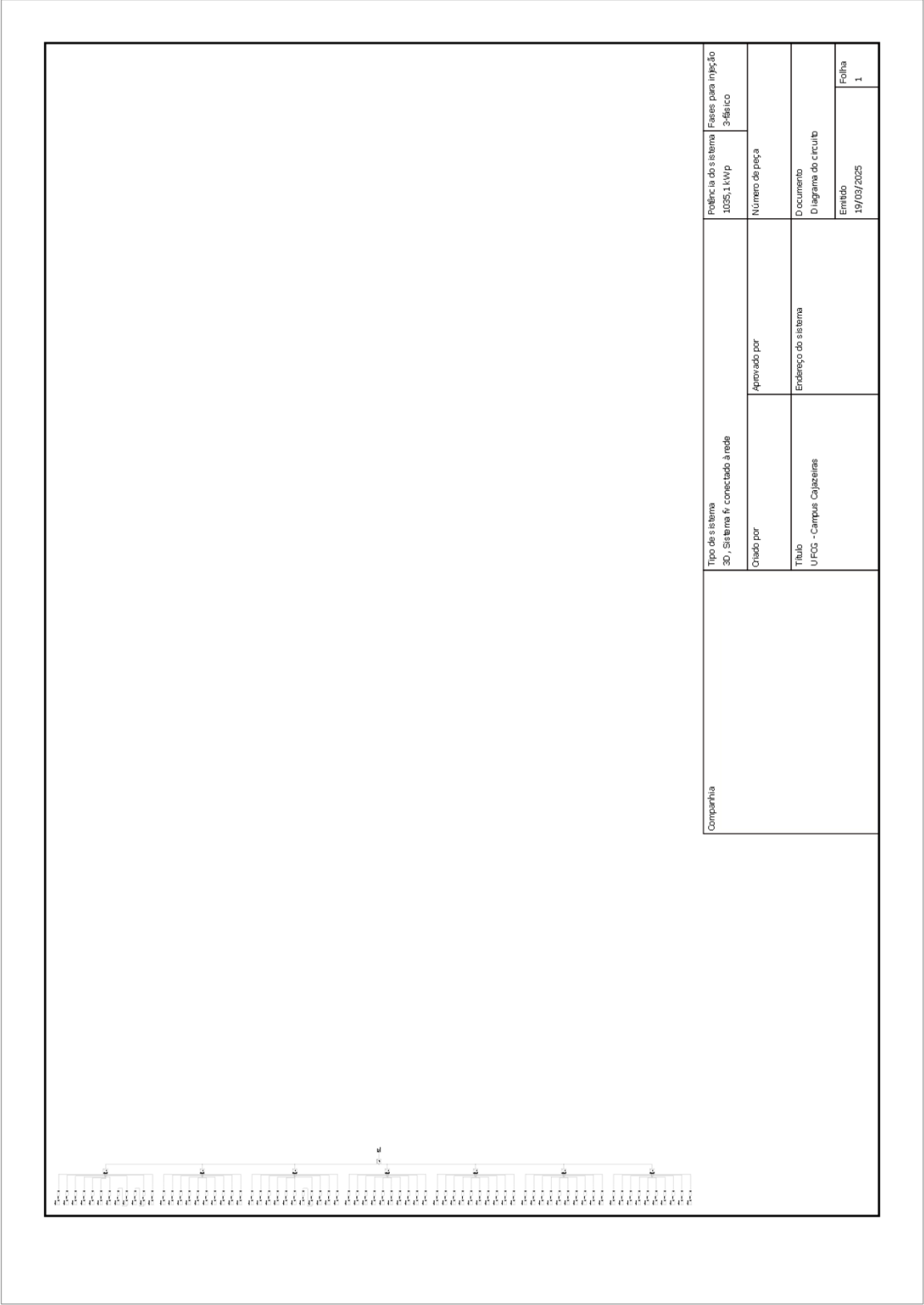


Figura: Diagrama do circuito

Plano geral

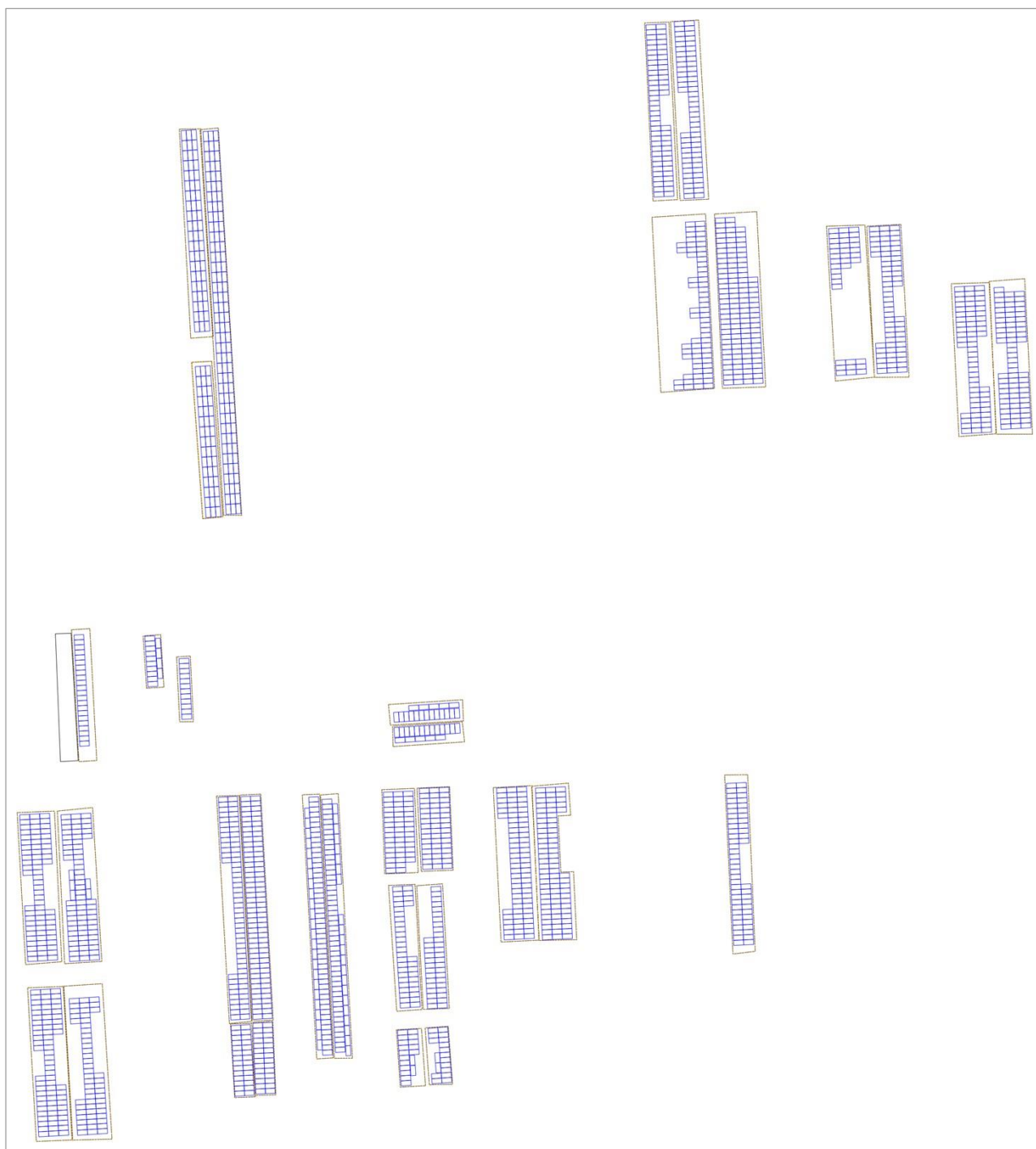


Figura: Plano geral

Lista de peças

Lista de peças

#	Tipo	Nº do artigo	Fabricante	Nome	Quantidade	Unidade
1	Módulo fotovoltaico		WEG	WPV 550 HMM3	1610	Peça
2	Inversor		Huawei Technologies	SUN2000-100KTL-M1 (400Vac)	6	Peça
3	Componentes			Medidor de injeção	1	Peça

10.2 Código em Python do gráfico da Distribuição espectral da Radiação de Corpo Negro (Lei de Planck)

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
h = 6.626e-34
c = 3.0e8
k = 1.381e-23
wavelengths = np.linspace(1e-9, 3e-6, 500)
def planck(wavelength, T):
    a = 2.0 * h * c**2
    b = h * c / (wavelength * k * T)
    intensity = a / ((wavelength**5) * (np.exp(b) - 1.0))
    return intensity
temperatures = [3000, 4000, 5778, 7000]
plt.figure(figsize=(10, 6))
for T in temperatures:
    intensity = planck(wavelengths, T)
    plt.plot(wavelengths * 1e9, intensity, label=f'{T} K')
plt.axvspan(380, 750, color='gray', alpha=0.3, label='Espectro Visível')
plt.title('Distribuição Espectral da Radiação de Corpo Negro (Lei de Planck)')
plt.xlabel('Comprimento de Onda (nm)')
plt.ylabel('Intensidade Relativa')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```


10.3 Código em Python do gráfico da Atenuação da irradiância solar incidente a diferentes condições atmosféricas

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
hora = np.linspace(5, 20, 300)
ghi_topo = 1000 * np.sin((np.pi / 15) * (hora - 5))
ghi_topo[ghi_topo < 0] = 0
ghi_sem_nuvens = ghi_topo * 0.8
ghi_parcialmente_nublado = ghi_topo * 0.6
ghi_nublado = ghi_topo * 0.3 * (1 + 0.1 * np.sin(5 * (hora - 5)))
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(hora, ghi_topo, 'g-', label='Topo da Atmosfera')
plt.plot(hora, ghi_sem_nuvens, 'b-', label='Sem Nuvens')
plt.plot(hora, ghi_parcialmente_nublado, 'r-', label='Parcialmente Nublado')
plt.plot(hora, ghi_nublado, 'k-', label='Nublado')
plt.xlabel('HORA DO DIA')
plt.ylabel('GHI (W/m²)')
plt.title('NRLE Golden, CO - Irradiância Diária Média')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('irradiancia_diaria_media_plot.png')
```

10.4 Código em Python do gráfico da resultante das componentes da Irradiação Solar

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Dados de irradiação diária média em kWh/m²/dia (base fictícia inspirada em dados do CRESESB)

meses = ['Jan', 'Fev', 'Mar', 'Abr', 'Mai', 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Set', 'Out', 'Nov', 'Dez']

ghi = [5.8, 5.7, 5.6, 5.4, 5.0, 4.6, 4.8, 5.3, 5.6, 5.9, 6.0, 6.1]

dni = [6.7, 6.5, 6.4, 6.2, 5.5, 5.1, 5.2, 5.9, 6.1, 6.6, 6.9, 7.0]

dhi = [1.1, 1.2, 1.1, 1.0, 0.9, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.1, 1.0, 1.0]

# Plot

plt.figure(figsize=(10,6))

plt.plot(meses, ghi, marker='o', label='GHI (Global Horizontal Irradiance)')

plt.plot(meses, dni, marker='s', label='DNI (Direct Normal Irradiance)')

plt.plot(meses, dhi, marker='^', label='DHI (Diffuse Horizontal Irradiance)')

# Títulos e labels

plt.title('Irradiação Solar Média Mensal por Tipo\nDados médios em kWh/m²/dia')

plt.xlabel('Meses')

plt.ylabel('Irradiação (kWh/m²/dia)')

plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)

plt.legend()

plt.tight_layout()

# Salvar imagem

plt.savefig("grafico_irradiacao_mensal.png", dpi=300)

plt.show()
```

10.5 Código em Python do gráfico do fenômeno da Energia dos Fótons vs. Corrente Gerada

```
from matplotlib import pyplot as plt

import numpy as np

# Constantes

h = 4.135667696e-15 # Constante de Planck em eV.s

c = 3e8 # Velocidade da luz em m/s

q = 1.602e-19 # Carga do elétron em C

Eg = 1.1 # Bandgap típico para silício em eV

# Comprimento de onda (em nm)

wavelength_nm = np.linspace(200, 1200, 1000)

wavelength_m = wavelength_nm * 1e-9

# Energia dos fótons (em eV)

energy_eV = (h * c) / wavelength_m

# Corrente gerada: 0 abaixo da bandgap, constante acima (modelo simplificado)

current = np.piecewise(energy_eV,
[energy_eV < Eg, energy_eV >= Eg],
[0, 1])

# Gráfico

plt.figure(figsize=(10, 6))

plt.plot(energy_eV, current, label='Corrente Gerada', color='darkblue', linewidth=2)

plt.axvline(x=Eg, color='red', linestyle='--', label=f'Band Gap = {Eg} eV')

plt.xlabel('Energia dos Fótons (eV)')

plt.ylabel('Corrente Gerada (unidade relativa)')

plt.title('Energia dos Fótons vs. Corrente Gerada')

plt.grid(True)

plt.legend()
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.savefig("energia_vs_corrente_grafico.png", dpi=300)
```

VALOR MÉDIO PAGO POR CONSUMO DE ENERGIA MENSAL (kWh/mês) NO ANO DE 2024 - CONSUMO FORA PONTA (FP) - R\$														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	
CONSUMO COBRADO (kWh/mês)	64.185,80	85.297,80	91.761,04	91.000,56	64.473,92	58.625,84	77.246,96	91.083,72	99.065,40	108.097,64	99.741,60	94.269,28	1.024.849,56	SOMA
TARIFA CONSUMO FP (R\$)	R\$ 0,377210	R\$ 0,389880	R\$ 0,388040	R\$ 0,387790	R\$ 0,385860	R\$ 0,382310	R\$ 0,386550	R\$ 0,381260	R\$ 0,379990	R\$ 0,372090	R\$ 0,373070	R\$ 0,378830	R\$ 0,381907	MÉDIA
VALOR PAGO CONSUMO (R\$)	R\$ 24.211,53	R\$ 33.255,91	R\$ 35.606,95	R\$ 35.289,11	R\$ 24.877,91	R\$ 22.413,24	R\$ 29.859,81	R\$ 34.726,58	R\$ 37.643,86	R\$ 40.222,05	R\$ 37.210,60	R\$ 35.712,03	R\$ 391.029,58	SOMA
VALOR MÉDIO PAGO POR CONSUMO DE ENERGIA MENSAL (kWh/mês) NO ANO DE 2024 - CONSUMO PONTA (P) - R\$														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	
CONSUMO COBRADO (kWh/mês)	6.997,76	13.953,24	14.653,80	15.018,92	8.148,56	6.966,40	12.503,40	15.585,36	16.785,44	19.102,44	13.577,20	13.703,20	156.995,72	SOMA
TARIFA CONSUMO P (R\$)	R\$ 1,929460	R\$ 1,994210	R\$ 1,984840	R\$ 1,983560	R\$ 1,973630	R\$ 1,955490	R\$ 1,977220	R\$ 1,950160	R\$ 1,967020	R\$ 2,081560	R\$ 2,087000	R\$ 2,119240	R\$ 2,000283	MÉDIA
VALOR PAGO CONSUMO (R\$)	R\$ 13.501,90	R\$ 27.825,69	R\$ 29.085,45	R\$ 29.790,93	R\$ 16.082,24	R\$ 13.622,73	R\$ 24.721,97	R\$ 30.393,95	R\$ 33.017,30	R\$ 39.762,88	R\$ 28.335,62	R\$ 29.040,37	R\$ 315.181,01	SOMA
VALOR MÉDIO PAGO POR CONSUMO DE ENERGIA ANUAL (kWh/mês) NO ANO DE 2024 - CONSUMO PONTA (P) + FORA PONTA (FP) - R\$														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	
VALOR PAGO POR CONSUMO PONTA P(R\$)	R\$ 13.501,90	R\$ 27.825,69	R\$ 29.085,45	R\$ 29.790,93	R\$ 16.082,24	R\$ 13.622,73	R\$ 24.721,97	R\$ 30.393,95	R\$ 33.017,30	R\$ 39.762,88	R\$ 28.335,62	R\$ 29.040,37	R\$ 315.181,01	SOMA
VALOR PAGO POR CONSUMO FORA PONTA FP(R\$)	R\$ 24.211,53	R\$ 33.255,91	R\$ 35.606,95	R\$ 35.289,11	R\$ 24.877,91	R\$ 22.413,24	R\$ 29.859,81	R\$ 34.726,58	R\$ 37.643,86	R\$ 40.222,05	R\$ 37.210,60	R\$ 35.712,03	R\$ 391.029,58	SOMA
VALOR TOTAL PAGO NO ANO 2024 POR CONSUMO P + FP (R\$)	R\$ 37.713,42	R\$ 61.081,60	R\$ 64.692,40	R\$ 65.080,04	R\$ 40.960,15	R\$ 36.035,97	R\$ 54.581,78	R\$ 65.120,52	R\$ 70.661,16	R\$ 79.984,93	R\$ 65.546,22	R\$ 64.752,40	R\$ 706.210,59	SOMA

VALOR MÉDIO COMPENSADO NO CONSUMO DE ENERGIA MENSAL (kWh/mês) NO ANO DE 2024 - CONSUMO FORA PONTA (FP) - R\$														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	
CONSUMO COBRADO (kWh/mês)	64.185,80	85.297,80	91.761,04	91.000,56	64.473,92	58.625,84	77.246,96	91.083,72	99.065,40	108.097,64	99.741,60	94.269,28	1.024.849,56	SOMA
TARIFA CONSUMO FP (R\$)	R\$ 0,377210	R\$ 0,389880	R\$ 0,388040	R\$ 0,387790	R\$ 0,385860	R\$ 0,382310	R\$ 0,386550	R\$ 0,381260	R\$ 0,379990	R\$ 0,372090	R\$ 0,373070	R\$ 0,378830	R\$ 0,381907	MÉDIA
VALOR PAGO CONSUMO (R\$)	R\$ 24.211,53	R\$ 33.255,91	R\$ 35.606,95	R\$ 35.289,11	R\$ 24.877,91	R\$ 22.413,24	R\$ 29.859,81	R\$ 34.726,58	R\$ 37.643,86	R\$ 40.222,05	R\$ 37.210,60	R\$ 35.712,03	R\$ 391.029,58	SOMA
CONSUMO COMPENSÁVEL (kWh/mês)	64.185,80	85.297,80	91.761,04	91.000,56	64.473,92	58.625,84	77.246,96	91.083,72	99.065,40	108.097,64	99.741,60	94.269,28	1.024.849,56	SOMA
TARIFA DE COMPENSAÇÃO FP (R\$)	R\$ 0,361140	R\$ 0,371420	R\$ 0,369680	R\$ 0,369440	R\$ 0,367590	R\$ 0,364210	R\$ 0,368260	R\$ 0,363210	R\$ 0,361970	R\$ 0,354170	R\$ 0,355090	R\$ 0,360580	R\$ 0,363897	MÉDIA
VALOR COMPENSADO (R\$)	R\$ 23.180,06	R\$ 31.681,31	R\$ 33.922,22	R\$ 33.619,25	R\$ 23.699,97	R\$ 21.352,12	R\$ 28.446,97	R\$ 33.082,52	R\$ 35.858,70	R\$ 38.284,94	R\$ 35.417,24	R\$ 33.991,62	R\$ 372.536,91	SOMA
RESTANTE À PAGAR (R\$)	R\$ 1.031,47	R\$ 1.574,60	R\$ 1.684,73	R\$ 1.669,86	R\$ 1.177,94	R\$ 1.061,13	R\$ 1.412,85	R\$ 1.644,06	R\$ 1.785,16	R\$ 1.937,11	R\$ 1.793,35	R\$ 1.720,41	R\$ 18.492,67	SOMA
% COBRADO DE ICMS NA TARIFA	-426,02%	-473,48%	-473,15%	-473,19%	-473,49%	-473,44%	-473,16%	-473,43%	-474,22%	-481,60%	-481,95%	-481,75%	-R\$ 4,715733	MÉDIA
VALOR MÉDIO COMPENSADO NO CONSUMO DE ENERGIA MENSAL (kWh/mês) NO ANO DE 2024 - CONSUMO PONTA (P) - R\$														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	
CONSUMO COBRADO (kWh/mês)	6.997,76	13.953,24	14.653,80	15.018,92	8.148,56	6.966,40	12.503,40	15.585,36	16.785,44	19.102,44	13.577,20	13.703,20	156.995,72	SOMA
TARIFA CONSUMO P (R\$)	R\$ 1,929460	R\$ 1,994210	R\$ 1,984840	R\$ 1,983560	R\$ 1,973630	R\$ 1,955490	R\$ 1,977220	R\$ 1,950160	R\$ 1,967020	R\$ 2,081560	R\$ 2,087000	R\$ 2,119240	R\$ 2,000283	MÉDIA
VALOR PAGO CONSUMO (R\$)	R\$ 13.501,90	R\$ 27.825,69	R\$ 29.085,45	R\$ 29.790,93	R\$ 16.082,24	R\$ 13.622,73	R\$ 24.721,97	R\$ 30.393,95	R\$ 33.017,30	R\$ 39.762,88	R\$ 28.335,62	R\$ 29.040,37	R\$ 315.181,01	SOMA
CONSUMO COMPENSÁVEL (kWh/mês)	6.997,76	13.953,24	14.653,80	15.018,92	8.148,56	6.966,40	12.503,40	15.585,36	16.785,44	19.102,44	13.577,20	13.703,20	156.995,72	SOMA
TARIFA DE COMPENSAÇÃO P (R\$)	R\$ 1,666040	R\$ 1,691700	R\$ 1,683750	R\$ 1,682670	R\$ 1,674240	R\$ 1,658850	R\$ 1,677290	R\$ 1,654330	R\$ 1,667420	R\$ 1,756430	R\$ 1,761030	R\$ 1,788230	R\$ 1,696832	MÉDIA
VALOR COMPENSADO (R\$)	R\$ 11.658,55	R\$ 23.604,70	R\$ 24.673,34	R\$ 25.271,89	R\$ 13.642,65	R\$ 11.556,21	R\$ 20.971,83	R\$ 25.783,33	R\$ 27.988,38	R\$ 33.552,10	R\$ 23.909,86	R\$ 24.504,47	R\$ 267.117,29	SOMA
RESTANTE À PAGAR (R\$)	R\$ 1.843,35	R\$ 4.220,99	R\$ 4.412,11	R\$ 4.519,04	R\$ 2.439,60	R\$ 2.066,51	R\$ 3.750,14	R\$ 4.610,62	R\$ 5.028,92	R\$ 6.210,78	R\$ 4.425,76	R\$ 4.535,90	R\$ 48.063,72	SOMA
% COBRADO DE ICMS NA TARIFA	-1365,25%	-1516,94%	-1516,95%	-1516,92%	-1516,95%	-1516,96%	-1516,93%	-1516,95%	-1523,12%	-1561,95%	-1561,91%	-1561,93%	-R\$ 15,160631	MÉDIA
VALOR MÉDIO COMPENSADO NO CONSUMO DE ENERGIA ANUAL (kWh/mês) NO ANO DE 2024 - CONSUMO PONTA (P) + FORA PONTA (FP) - R\$														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	

VALOR COMPENSADO NO CONSUMO PONTA P(R\$)	R\$ 11.658,55	R\$ 23.604,70	R\$ 24.673,34	R\$ 25.271,89	R\$ 13.642,65	R\$ 11.556,21	R\$ 20.971,83	R\$ 25.783,33	R\$ 27.988,38	R\$ 33.552,10	R\$ 23.909,86	R\$ 24.504,47	R\$ 267.117,29	SOMA
VALOR COMPENSADO NO CONSUMO FORA PONTA FP(R\$)	R\$ 23.180,06	R\$ 31.681,31	R\$ 33.922,22	R\$ 33.619,25	R\$ 23.699,97	R\$ 21.352,12	R\$ 28.446,97	R\$ 33.082,52	R\$ 35.858,70	R\$ 38.284,94	R\$ 35.417,24	R\$ 33.991,62	R\$ 372.536,91	SOMA
VALOR TOTAL COMPENSADO NO ANO 2024 NO CONSUMO P + FP (R\$)	R\$ 34.838,61	R\$ 55.286,00	R\$ 58.595,56	R\$ 58.891,13	R\$ 37.342,61	R\$ 32.908,33	R\$ 49.418,79	R\$ 58.865,85	R\$ 63.847,08	R\$ 71.837,04	R\$ 59.327,10	R\$ 58.496,09	R\$ 639.654,20	SOMA

ESTIMATIVA DE ECONOMIA SOBRE O CONSUMO DE ENERGIA MENSAL (kWh/mês) NO ANO DE 2024 - CONSUMO PONTA (P) + FORA PONTA (FP) - R\$														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	
VALOR TOTAL PAGO NO ANO 2024 POR CONSUMO P + FP (R\$)	R\$ 37.713,42	R\$ 61.081,60	R\$ 64.692,40	R\$ 65.080,04	R\$ 40.960,15	R\$ 36.035,97	R\$ 54.581,78	R\$ 65.120,52	R\$ 70.661,16	R\$ 79.984,93	R\$ 65.546,22	R\$ 64.752,40	R\$ 706.210,59	SOMA
ECONOMIA SOBRE CONSUMO P + FP NO ANO DE 2024 (R\$)	R\$ 34.838,61	R\$ 55.286,00	R\$ 58.595,56	R\$ 58.891,13	R\$ 37.342,61	R\$ 32.908,33	R\$ 49.418,79	R\$ 58.865,85	R\$ 63.847,08	R\$ 71.837,04	R\$ 59.327,10	R\$ 58.496,09	R\$ 639.654,20	SOMA
PERCENTUAL DE ECONOMIA SOBRE O CONSUMO P + FP (%)	92,38%	90,51%	90,58%	90,49%	91,17%	91,32%	90,54%	90,40%	90,36%	89,81%	90,51%	90,34%	90,70%	MÉDIA
RESTANTE À PAGAR NO CONSUMO P + FP (R\$) - COBRANÇA DE ICMS	R\$ 2.874,82	R\$ 5.795,59	R\$ 6.096,85	R\$ 6.188,90	R\$ 3.617,54	R\$ 3.127,64	R\$ 5.162,99	R\$ 6.254,68	R\$ 6.814,08	R\$ 8.147,89	R\$ 6.219,11	R\$ 6.256,31	R\$ 66.556,39	SOMA

ESTIMATIVA DE ECONOMIA SOBRE O VALOR TOTAL PAGO DA FATURA DE ENERGIA NO ANO DE 2024 (R\$)														
COMPONENTE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAIS	
VALOR TOTAL PAGO DA FATURA DE ENERGIA NO ANO DE 2024 (R\$)	R\$ 46.807,62	R\$ 68.331,48	R\$ 71.754,37	R\$ 71.668,15	R\$ 48.092,35	R\$ 44.334,37	R\$ 63.156,30	R\$ 72.133,37	R\$ 85.510,33	R\$ 99.629,20	R\$ 77.358,15	R\$ 78.552,31	R\$ 827.328,00	SOMA
ECONOMIA SOBRE CONSUMO P + FP NO ANO DE 2024 (R\$)	R\$ 34.838,61	R\$ 55.286,00	R\$ 58.595,56	R\$ 58.891,13	R\$ 37.342,61	R\$ 32.908,33	R\$ 49.418,79	R\$ 58.865,85	R\$ 63.847,08	R\$ 71.837,04	R\$ 59.327,10	R\$ 58.496,09	R\$ 639.654,20	SOMA
PERCENTUAL DE ECONOMIA SOBRE O VALOR INTEGRAL DA FATURA (%)	74,43%	80,91%	81,66%	82,17%	77,65%	74,23%	78,25%	81,61%	74,67%	72,10%	76,69%	74,47%	77,40%	MÉDIA